

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси»

№ 50(122)2016

Збірник наукових праць

Видання засноване в 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ „ХПІ” – 2016р. – No50(1222) – 154 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ No5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

Координаційна рада:

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

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

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, 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. Грабчєнко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепєков, 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.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дьомін Д. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

Заст. відповідального редактора: Акімов О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків,

Відповідальний секретар: Пензєв П. С., НТУ «ХПІ»;

Члени редколегії: Березуцький В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дмитрієв В. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Дудніков А. А., канд. техн. наук, ПДАА, Полтава, Заблоцький В. К., д-р техн. наук, ДДМА, Краматорськ, Заміховський Л. М., д-р техн. наук, ІФТУНГ, Івано-Франківськ, Євстратов В. О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Погрібний М. А., проф., НТУ «ХПІ», Харків, Пономаренко О. І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків, Соболев О. В., д-р фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Шоман О. В., д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Jozef Voynarovskyy, проф., Сілезького політехнічного інституту, Польща, Rab Nawaz Lodhi, проф. Bahria University Islamabad Pakistan, Пакистан, Меркер Е. Е., д-р техн. наук, проф., Старооскольський технологічний інститут – філія Національного дослідницького технологічного інституту «Московський інститут сталі і сплавів», Росія

*У 2015 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)***

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ „ХПІ”

Протокол № 12 від «08» грудня 2016 р.

УДК 661.666:620

О. В. МИРОНЮК, В. А. ДУДКО, Д. В. БАКЛАН, К. О. СМОЛЬНИЧЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕНЕРГІЄЮ ПОВЕРХНІ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ ТА МІЦНІСТЮ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ НА ЇХ ОСНОВІ

При конструюванні композиційних матеріалів є важливим прогнозування міцності матеріалу, що можна зробити за допомогою вивчення взаємозв'язку між силою адгезії та параметрами міцності. У роботі оцінено вплив термічної активації на значення поверхневої енергії вуглецевих волокон. Визначено вплив добавок: поверхнево-активної речовини ЕФКА 3299 та тетраетоксисилану на значення поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці. За моделлю Оуенса-Вендта розраховано значення кутів змочування поверхні наповнювача матрицею та співвіднесені з механічною міцністю композицій.

Ключові слова: вуглецеве волокно, поверхнева енергія, модель Оуенса-Вендта, адгезія композиційних матеріалів.

Для конструирования композиционных материалов важным является прогнозирование его прочности, что можно сделать с помощью изучения связи между силой адгезии и параметрами прочности. В работе оценено влияние термической активации на значение поверхностной энергии углеродного волокна. Изучено влияние добавок: поверхностно-активного вещества ЕФКА 3299 и тетраэтоксисилана на значение поверхностной энергии фенолформальдегидной матрицы. С помощью модели Оуенса-Вендта рассчитаны значения углов смачивания поверхности наполнителя матрицей и соотнесены с прочностью композиций.

Ключевые слова: углеродное волокно, поверхностная энергия, модель Оуенса-Вендта, адгезия композиционных материалов.

For design of composite materials, it is important to predict its mechanical properties, which can be done by studying the relationship between the strength of adhesion, which can be found by experimental measuring of surface energy, and mechanical properties of the material. Nowadays relationships between these two parameters are still a field of debates. In this work we tried to clarify this question by analyzing the effect of additives that reduce wetting angle on the mechanical properties of the composite. The effect of thermal activation on the surface energy of a carbon fiber was estimated. The effect of additives the surface-active substances ЕФКА 3299 and tetraethoxysilane on the surface energy of the phenol-formaldehyde matrix was studied. Using the Owens/Wendt model, the values of the wetting angles of the filler surface by a matrix are calculated and correlated with the strength of the compositions.

Keywords: carbon fiber, surface energy, Owens-Wendt model, adhesion of composite materials.

Вступ. Композити армовані волокнами швидко зростаюча індустрія і є частиною революції в сучасних матеріалах розроблених в 80-х і 90-х років.

Існують численні приклади армованих матеріалів:

1. Композити армовані вуглецевими волокнами, які міцніші та легші за сталь. Що добре підходить для аерокосмічної, автомобільної та спортивної галузей [1].

2. Композити армовані скляним волокном використовуються там, де потрібний жорсткий, легкий та корозійно стійкий матеріал [2].

3. Органічні волокна, такі як арамідне волокно Кевлар 49 (полі-п-фенілентерефталамід) зазвичай використовуються в якості армуючого матеріалу в гумовій матриці, щоб покращити механічні властивості шин або в епоксидної матриці, щоб зробити високоміцні пластмаси [3].

4. Деревина, волокниста суміш целюлози, лігніну та інших полімерних матеріалів, є «природним» композитним матеріалом, який часто комбінують зі смолою, щоб зробити з фанери або картон [4].

5. Керамічні волокна, такі як оксид алюмінію або карбід кремнію, які використовуються в якості армуючого матеріалу в композитах з металічною матрицею (алюміній або титан) для виготовлення конструкційних матеріалів з низької щільності [5].

Основна характеристика будь-якого композитного матеріалу – це сила міжфазного зв'язку. Основні властивості композиту, такі як міжшарове зрушення і міцність на вигин може бути досягнута шляхом регулювання міцності міжфазного зв'язку. Тому, адгезія на межі поділу волокно-матриця є критичною властивістю композиту, яка повинна бути визначена.

Часто межа поділу може бути сконструйована за допомогою модифікації поверхні волокна для оптимізації адгезії між матрицею та волокном. Поверхнева енергія армуючого волокна є мірою адгезивних властивостей поверхні волокон, які можуть бути використані для прогнозування адгезії на межі поділу волокно-матриця.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У високо наповнених композиційних матеріалах майже весь об'єм можна вважати перебуваючим у стані міжфазної взаємодії між наповнювачем та матрицею [6]. Через це дуже важливим для механічних властивостей композитів є сила міжфазного зв'язку та адгезивної взаємодії. Але значення фундаментальної адгезії розрахованої теоретично за допомогою термодинаміки дуже відрізняються від значень практичної адгезії, або по іншому сили адгезії, що безпосередньо впливає на міцність зв'язку між матрицею та наповнювачем.

Традиційно для опису адгезивного розриву використовується рівняння Дюпре:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}, \quad (1)$$

Для практичних розрахунків більш уживана техніка з використання змочування твердої поверхні. Для розрахунку роботи адгезії в цьому випадку використовується рівняння Дюпре-Юнга:

$$W_a = \gamma_1 (1 + \cos\theta), \quad (2)$$

© О. В. Миронюк, В. А. Дудко, Д. В. Баклан, К. О. Смольниченко. 2016

Але окрім цієї складової при розрахунку загальної роботи адгезивного розриву вводять дисипативну складову Ψ , що включає в себе роботу, що витрачається на пластичну та в'язкоеластичну деформацію. [7]

Тоді загальне рівняння буде мати вигляд:

$$W_p = W_A + \Psi, \quad (3)$$

де відношення дисипативної енергії до роботи адгезії $\Psi \gg W_A$.

Як підтвердження в роботі [8], розрахована робота адгезії за рівнянням 1 склала приблизно 120 мДж/м², але практично отримана енергія розриву склала $2 \cdot 10^9$ мДж/м², тобто на 7 порядків.

У роботі [9], зазначається, що метод розрахунку роботи адгезії на основі кута змочування показує погані результати через те, що не враховується донорно-акцепторна взаємодія. Та для покращення результатів розрахунку використовується додатково вплив кислотно-основної взаємодії між поверхнями наповнювачу та матриці.

Хоча у роботі [10], був показаний вплив між змочуванням наповнювача за допомогою тестової рідини (ДМСО) та механічними властивостями композиту. Тому кореляція між поверхневою енергією складових композиційного матеріалу, їх адгезивної міцності та механічних параметрів композиту досі залишаються не встановленими.

Ціль та задачі дослідження. Проведені дослідження ставили за мету дослідити взаємозв'язок між значенням поверхневої енергії волокнистого наповнювача та комплексними параметрами механічної міцності композицій на його основі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Встановити значення та покомпонентний розподіл поверхневої енергії волокнистого наповнювача та фенолформальдегідної матриці;
2. Оцінити вплив термічної активації на значення поверхневої енергії вуглецевих волокон, визначити вплив добавок: поверхнево-активної речовини та тетраетоксисилану на значення поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці;
3. Використовуючи модель Оуенса-Вендта, спрогнозувати значення кутів змочування поверхні наповнювача матрицею;
4. Встановити механічну міцність композицій та визначити її кореляцію зі спрогнозованими значеннями

ми кутів змочування на межі поділу фаз полімернаповнювач.

Матеріали та методи дослідження впливу зміни поверхневої енергії волокнистих наповнювачів та полімерної матриці на механічну міцність композицій. Композиції були виготовлені на основі фенолформальдегідної смоли резольного типу та вуглецевого волокна отриманого шляхом піролізу вторинної сировини (Англія). В якості модифікаторів використовувались тетраетоксисилан (BASF, Німеччина), ЕФКА 3299 (BASF, Німеччина). Як розчинник використовувався ізопропіловий спирт Sigma-Aldrich (США).

Для термоактивації поверхні вуглецевого волокна його піддавали термічній обробці у муфельній печі (SNOL 8,2/1100, Росія) при температурі 700 °С протягом 30 хвилин.

Приготування композиції відбувалося шляхом розчинення смоли у розчиннику, після чого додавалися ТЕОС та ЕФКА 3299 та перемішувалися. Волокно змочували у вакуумній камері та витримували при тиску -0.5 бар, протягом 15 хвилин для видалення пухирців повітря з поверхні і покращення якості змочування волокна. Суміш висушували протягом 12 годин у сушильній шафі СНОЛ 24/200 (Росія) при температурі 70 °С до вологості 3–5 %. Після цього із матеріалу формували зразки у вигляді балок з квадратним перерізом 1,65 см та довжиною 15 см. Формування відбувалось у гідравлічному пресі ДЕ 2428.01 (Росія) з тиском у 5 тон, при температурі 120 °С протягом 30 хвилин.

Випробування на згин проводилися за ГОСТ 4648-2014 (Пластмассы. Метод испытання на статический изгиб). Випробування на стиснення проводилися за ГОСТ 4651-2014 (Пластмассы. Метод испытання на сжатие).

Оцінка поверхневої енергії методом Оуенса-Вендта розглянуто у [11]. Експериментально метод Вільгельмі детально описаний в [12].

Результати дослідження впливу зміни поверхневої енергії волокнистих наповнювачів та полімерної матриці на механічну міцність композицій. Для опису розподілу компонентів поверхневої енергії в роботі було використано модель Оуенса-Вендта, оскільки об'єкти, що розглядаються можна віднести до середньополярних речовин, не схильних до вираженої кислотно-основної взаємодії. У відповідності до цього, використовуючи метод Вільгельмі, визначено вплив термічної активації на поверхневу енергію вуглецевого волокна (табл. 1).

Таблиця 1 – Розподіл поверхневої енергії вуглецевого волокна

Матеріал	σ , мН/м	σ^D , мН/м	σ^P , мН/м
Необроблене волокно	41,8	21,5	20,3
Активоване волокно	43,8	20,9	22,9

Збільшення полярної компоненти поверхневої енергії після термічної активації пов'язано з підвищенням вмісту оксиген-вмісних активних центрів на поверхні вуглецевого волокна. Невеликий ступінь цього збільшення зумовлений відносною інертністю матеріалу.

Розподіл поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці (ФФ) та вплив на цей розподіл добавки поверхнево-активної речовини (ЕФКА 3299) та тетраетоксисилану (ТЕОС) визначено із застосуванням методу сидячої краплі (табл. 2).

Таблиця 2 – Розподіл поверхневої енергії фенолформальдегідної матриці

Матеріал	σ , мН/м	σ^D , мН/м	σ^P , мН/м
ФФ	49,20	22,47	26,43
ФФ + ЕФКА 3299	36,94	31,92	5,02
ФФ + ТЕОС + ЕФКА 3299	49,95	22,28	27,67

Полярна компонента поверхневої енергії фенолформальдегідної смоли є достатньо високою і порівняна з цією компонентою вуглецевого волокна. При введенні поверхнево-активної речовини відбувається значне зниження загального значення енергії поверхні за рахунок зменшення саме цієї компоненти внаслідок концентрації та орієнтації в поверхневих шарах молекул цього модифікатора. Введення ТЕОС в систему значно підвищує її полярність.

Для характеристики взаємодії в системі наповнювач-матриця було розраховано значення косинусів кутів змочування поверхні вуглецевого волокна фенолформа-

льдегідним полімером (табл. 3) за модифікованим рівнянням Оуенса-Вендта (1):

$$\cos\theta = \frac{2}{\sigma_m} \left(\sqrt{\sigma_m^D \times \sigma_n^D} + \sqrt{\sigma_m^P \times \sigma_n^P} \right) - 1, \quad (1)$$

де σ_m – поверхнева енергія матриці; σ_m^D – її дисперсна компонента; σ_m^P – її полярна компонента; σ_n^D – дисперсна компонента поверхневої енергії наповнювача; σ_n^P – її полярна компонента.

Таблиця 3 – Розрахункові значення кутів змочування для систем наповнювач-матриця.

Матриця	Кут змочування, град.	
	Необроблене волокно	Активоване волокно
ФФ	33	27
ФФ + ЕФКА 3299	15	12
ФФ + ТЕОС + ЕФКА 3299	34	29

Введення в систему змочувача, як видно з табл. 3, відповідно до моделі повинне значно підвищити взаємодію на межі розподілу фаз і, таким чином, енергію адгезії матриці до поверхні вуглецевого волокна. Присутність ТЕОС в системі нівелює цей вплив поверхнево-активної речовини.

Встановлено, що діаметр досліджених вуглецевих волокон (рис. 1) складає 8 мкм., середня довжина – 12 мм.

Склад дослідних композицій, які були використані для визначення механічної міцності наведено в табл. 4.

Результати визначення міцності композицій на згин та стиснення (табл. 5) вказують на їх підвищення при активації поверхні волокна, введенні поверхнево-активної речовини до складу композиції та введення ТЕОС до складу композиції.

Слід зауважити, що при активації поверхні вуглецевого волокна та при введенні змочувача між прогнозованою зміною значення кута змочування та по-

казниками міцності існує кореляція, яка, однак не зберігається при введенні ТЕОС в композицію.

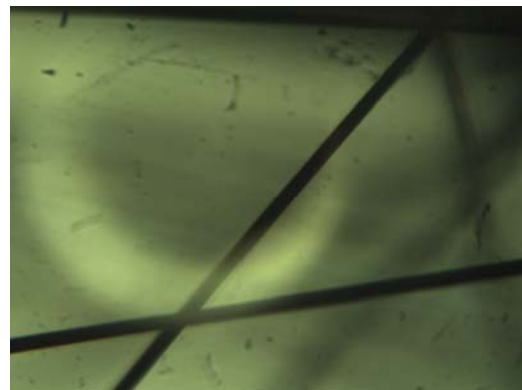


Рис. 1 – Вуглецеві волокна. Збільшення в 400 разів

Таблиця 4 – Склад дослідних композицій

№ п/п	Вміст компонентів, мас. %				
	Волокно необр.	Волокно акт.	ФФ смола	ТЕОС	ЕФКА 3299
1	37,0	–	63,0	–	–
2	–	37,0	63,0	–	–
3	–	36,6	62,0	–	1,4
4	–	34,8	59,0	4,8	1,4

Таблиця 5 – Механічні показники композицій

№ п/п	Міцність на згин, МПа	Міцність на стиснення, МПа
1	30	26
2	38	24
3	57	36
4	75	50

Обговорення результатів впливу зміни поверхневої енергії волокнистих наповнювачів та полімерної матриці на механічну міцність композицій

Одержані в ході дослідження взаємозв'язку між значеннями механічної міцності та кутом змочування на межі поділу фаз результати підтверджують очікуване підвищення міцності при зміні поверхневих енергій компонентів системи. Це відбувається у випадку термічної активації поверхні волокна, яка супроводжується гідрофілізацією (табл. 1) і підтверджується зростанням полярної компоненти поверхневої енергії. Слід зазначити, що в системі, яка розглядається, ступінь гідрофілізації є незначним. Введення поверхнево-активної речовини практично в 2 рази знижує кут змочування поверхні наповнювача полімерною матрицею, що визначає зростання механічних показників композиту на 50 % від початкової величини (табл. 5). В той же час, додавання до композиту тетраетоксисилану, виходячи з розрахунків за моделлю, повинне було призвести до падіння міцності матеріалу. Але на практиці має місце підвищення цього показника додатково на 30 %.

Останній факт може знайти такі найбільш ймовірні пояснення:

1. Тетраетоксисилан вступає в хімічну взаємодію з гідрофілізованою поверхнею вуглецевого волокна, формуючи значно більш міцний зв'язок з нею, ніж це дозволяє зробити ван-дерваальсівська взаємодія.

2. Тетраетоксисилан приймає участь в процесах поліконденсації фенолформальдегідної смоли, що призводить до зміни механічних властивостей (модуль еластичності, деформаційна пластичність) матриці.

Перше припущення підтверджується результатами [13] з модифікації поверхні вуглецевого волокна тетраетоксисиланом. В цьому випадку в системі спостерігається утворення хімічного зв'язку, і вона виключається з ряду об'єктів, які розглядаються теорією Оуенса-Вендта.

Наявність хімічної взаємодії між гідроксильними групами фенолформальдегідної смоли та тетраетоксисиланом показана в роботі [14]. Зазначається, що в ході одержання фенолформальдегідного полімеру та його поліконденсації відбуваються складні перетворення ТЕОС, зокрема утворюються хімічно зв'язані з матрицею нанорозмірні конденсаційні частинки SiO_2 , які вочевидь змінюють такі механічні характеристики матриці як модуль еластичності та пластичність.

Очевидно, що факт значних розбіжностей експериментальних результатів та теоретично прогнозованих покладає межі застосованості теорії Оуенса-Вендта для оцінки міжфазної взаємодії в полімерних композиціях. Вони полягають у виключенні з розгляду тих систем, в яких відбуваються хімічні перетворення складників при компаундуванні.

Залежність між міцністю композицій на згин та стиснення і розрахунковими кутами змочування має кореляційний характер і може порівнюватися в різних композиціях тільки при умові збереження постійних механічних параметрів матриці та волокон. Це призводить до висунення додаткових вимог по відношенню до модифікаторів, ефективність яких досліджується: вони повинні бути хімічно інертними по відношенню до реак-

ційних груп олігомерів; вони не повинні змінювати надмолекулярну структуру полімеру або пластифікувати матрицю.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Встановлено, що поверхнева енергія вуглецевого волокна становить 41,8 мН/м, дисперсна компонента складає 21,5 мН/м, а полярна – 20,3 мДж/м²; поверхнева енергія отвердженої фенолформальдегідної матриці – 49,2 мН/м а дисперсна та полярна компоненти – 22,5 та 26,4 мН/м відповідно.

2. Визначено, що термічна активація незначно підвищує полярну компоненту поверхневої енергії вуглецевого волокна (до 23,0 мН/м). Введення змочувача в цілому знижує поверхневу енергію фенолформальдегідної смоли до 37 мН/м за рахунок зниження полярної її компоненти до 5 мН/м. Введення тетраетоксисилану в матрицю значно підвищує її поверхневу енергію за рахунок збільшення полярної компоненти до 27 мН/м.

3. З використанням моделі Оуенса-Вендта спрогнозовано значення кутів змочування поверхні волокнистого наповнювача полімерною матрицею. В залежності від складу композиції, вони знаходяться в межах від 12 (для системи на основі активованого волокна і матриці, модифікованої змочувачем) до 34 градусів (для системи на основі неактивованого волокна та матриці модифікованої змочувачем та тетраетоксисиланом).

4. Встановлено, що механічна міцність композицій при додаванні до їх складу змочувача підвищується на 50 %, а при введенні тетраетоксисилану – практично в 2 рази. Останнє вказує на незастосовуваність моделі Оуенса-Вендта до систем, в яких має місце міжкомпонентна хімічна взаємодія. При прогнозуванні впливу добавок, взаємодія яких відбувається лише на рівні ван-дерваальсівських сил, модель дозволяє одержати кореляцію між розрахунковими результатами та експериментальними даними.

Список літератури:

1. Composite Materials in the Airbus A380 – From History to Future [Electronic resource]. – Available at: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/paper-1695.pdf>
2. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Electronic resource]. – Available at: <http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/14023180.pdf>
3. Magat E. E. Fibers from Extended Chain Aromatic Polyamides, New Fibers and Their Composites [Text] / E. E. Magat // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1980. – № 294 (1411). – P. 463–472. doi: [10.1098/rsta.1980.0055](https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0055)
4. Caroline, B. Green Composites: Polymer Composites and the Environment [Text] / Baillie Caroline. – CRC Press, 2005. – 308 p.
5. Ceramic Fibers and Coatings: Advanced Materials for the Twenty-First Century [Text] / National Research Council // The National Academies Press. – 1998. – 112 p. doi: [10.17226/6042](https://doi.org/10.17226/6042)
6. Irzhak, V. I. Structural aspects of polymer network formation upon curing of oligomer systems [Text] / V. I. Irzhak, S. M. Mezhevikovskii // Russian Chemical Reviews. – 2008. – № 78 (2). – P. 165–194. doi: [10.1070/rc2009v078n02abeh003896](https://doi.org/10.1070/rc2009v078n02abeh003896)
7. Bascom, W. D. The surface properties of carbon fibers and their adhesion to organic polymers [Text] / W. D. Bascom, L. T. Drzal // Hercules aerospace co magna UT. – 1987.
8. Bascom, W. D. Fracture Markings on Stress-corroded Epoxy/Aluminum Butt Joints [Text] / W. D. Bascom, S. T. Gadomski, C. M. Henderson, R. L. Jones // The Journal of

- Adhesion. – 1976. – № 8 (3). – P. 213–222. doi: [10.1080/00218467608075084](https://doi.org/10.1080/00218467608075084)
9. Dutschk, V. “Fundamental” and “practical” adhesion in polymer-fiber systems [Text] / V. Dutschk, E. Pisanova, S. Zhandarov, B. Lauke // *Mechanics of Composite Materials*. – 1998. – № 34 (4). – P. 309–320. doi: [10.1007/bf02257899](https://doi.org/10.1007/bf02257899)
 10. Dillingham, R. G. Surface Energy and Adhesion in Composite-Composite Adhesive Bonds [Text] / R. G. Dillingham, B. R. Oakley // *The Journal of Adhesion*. – 2006. – № 82 (4). – P. 407–426. doi: [10.1080/00218460600683944](https://doi.org/10.1080/00218460600683944)
 11. Миронюк, А. В. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей / А. В. Миронюк, А. В. Придатко, П. В. Сиволопов, В. А. Сви́дєрський // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 1/6 (67). – С. 23–26. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/20797/18938>
 12. Lander, L. M. A systematic comparison of contact angle methods [Text] / L. M. Lander, L. M. Siewierski, W. J. Brittain, E. A. Volger // *Langmuir*. – 1993. – № 9 (8). – P. 2237–2239. doi: [10.1021/la00032a055](https://doi.org/10.1021/la00032a055)
 13. Hoffman, W. P. Characterizing the nano-surface of carbon fibers in order to gain a better understanding of the interfaces they form [Text] / W. P. Hoffman // *Composite Interfaces*. – 1993. – № 1 (1). – P. 15–35. doi: [10.1163/156855493x00293](https://doi.org/10.1163/156855493x00293)
 14. Zuo, X. H. Tribological behavior of phenolic resin composites modified using tetraethyl orthosilicate [Text] / X. H. Zuo, W. Li, Z. L. Yu, F. M. Ma, M. Ruan // *Tribology Transactions*. – 2012. – № 56 (1). – P. 115–120. doi: [10.1080/10402004.2012.732197](https://doi.org/10.1080/10402004.2012.732197)
 4. Caroline, B. (2005). *Green Composites: Polymer Composites and the Environment*. CRC Press., 308.
 5. National Research Council (1998). *Ceramic Fibers and Coatings*. The National Academies Press, 112. doi: [10.17226/6042](https://doi.org/10.17226/6042)
 6. Irzhak, V. I., Mezhevikovskii, S. M. (2009). Structural aspects of polymer network formation upon curing of oligomer systems. *Russian Chemical Reviews*, 78 (2), 165–194. doi: [10.1070/rc2009v078n02abeh003896](https://doi.org/10.1070/rc2009v078n02abeh003896)
 7. Bascom, W. D., Drzal, L. T. (1987). The surface properties of carbon fibers and their adhesion to organic polymers. *Hercules aerospace co magna UT*.
 8. Bascom, W. D., Gadomski, S. T., Henderson, C. M., Jones, R. L. (1976). Fracture Markings on Stress-corroded Epoxy/Aluminum Butt Joints. *The Journal of Adhesion*, 8 (3), 213–222. doi: [10.1080/00218467608075084](https://doi.org/10.1080/00218467608075084)
 9. Dutschk, V., Pisanova, E., Zhandarov, S., Lauke, B. (1998). “Fundamental” and “practical” adhesion in polymer-fiber systems. *Mechanics of Composite Materials*, 34 (4), 309–320. doi: [10.1007/bf02257899](https://doi.org/10.1007/bf02257899)
 10. Dillingham, R. G., Oakley, B. R. (2006). Surface Energy and Adhesion in Composite-Composite Adhesive Bonds. *The Journal of Adhesion*, 82 (4), 407–426. doi: [10.1080/00218460600683944](https://doi.org/10.1080/00218460600683944)
 11. Myronyuk, A. V., Prydatko, A. V., Syvolapov, P. V., Svyderskyi, V. A. (2014). Features of evaluation of wetting of polymeric surfaces. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 1/6 (67), 23–26. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/20797/18938>
 12. Lander, L. M., Siewierski, L. M., Brittain, W. J., Vogler, E. A. (1993). A systematic comparison of contact angle methods. *Langmuir*, 9 (8), 2237–2239. doi: [10.1021/la00032a055](https://doi.org/10.1021/la00032a055)
 13. Hoffman, W. P. (1993). Characterizing the nano-surface of carbon fibers in order to gain a better understanding of the interfaces they form. *Composite Interfaces*, 1 (1), 15–35. doi: [10.1163/156855493x00293](https://doi.org/10.1163/156855493x00293)
 14. Zuo, X. H., Li, W., Yu, Z. L., Ma, F. M., Ruan, M. (2013). Tribological Behavior of Phenolic Resin Composites Modified Using Tetraethyl Orthosilicate. *Tribology Transactions*, 56 (1), 115–120. doi: [10.1080/10402004.2012.732197](https://doi.org/10.1080/10402004.2012.732197)

Bibliography (transliterated):

1. Composite Materials in the Airbus A380 – From History to Future. Available at: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/paper-1695.pdf>
2. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Available at: <http://tocs.ulb-tu-darmstadt.de/14023180.pdf>
3. Magat, E. E. (1980). Fibres from Extended Chain Aromatic Polyamides. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 294 (1411), 463–472. doi: [10.1098/rsta.1980.0055](https://doi.org/10.1098/rsta.1980.0055)

Надійшла (received) 11. 11. 2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження взаємозв'язку між енергією поверхні волокнистих наповнювачів та міцністю полімерних композицій на їх основі/ О. В. Миронюк, В. А. Дудко, Д. В. Баклан, К. О. Смольниченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.3–8. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование взаимосвязи между энергией поверхности волокнистых наполнителей и прочностью полимерных композиций на их основе/ А. В. Миронюк, В. А. Дудко, Д. В. Баклан, К. А. Смольниченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.3–8. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of the relationship between the surface energy of fibrous fillers and the strength of polymer compositions based on them/ О. Myronyuk, V. Dudko, D. Baklan, K. Smolnychenko// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.3–8. – Biblogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Миронюк Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: whizershines@gmail.com.

Дудко Володимир Андрійович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: ad777v@gmail.com.

Баклан Денис Віталійович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: denis-baklan@yandex.ru.

Смольниченко Катерина Олександрівна – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: kateyko97@gmail.com.

Мирунюк Алексей Владимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри «Хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: whizershines@gmail.com.

Дудко Владимир Андреевич – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: ad777v@gmail.com.

Баклан Денис Витальевич – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: denis-baklan@yandex.ru.

Смольниченко Катерина Александровна – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Кафедра хімічної технології композиційних матеріалів»; пр. Перемоги, 37, г. Київ, Україна, 03056; e-mail: kateyko97@gmail.com.

Myronyuk Oleksiy – PhD, associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: whizershines@gmail.com.

Dudko Volodymyr – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: ad777v@gmail.com.

Baklan Denis – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: denis-baklan@yandex.ru.

Smolnychenko Kateryna – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of chemical technology of composition materials; Peremohy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: kateyko97@gmail.com.

УДК 537.623

М. М. ЛУТЧИН

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ

В даній статті розглянуті способи представлення явища гістерезису. Використання гістерезису спостерігається в електротехніці, біології, гідрології, економіці, філософії та соціології. Моделювання здійснюється з урахуванням особливостей вхідних даних та необхідної точності розрахунків. Показані переваги та недоліки моделей Маделунга, Джона Чана, Джилса-Атертона, Прейзаха, Релея та графоаналітичний. Рекомендується для підвищення точності моделювання використовувати комбіновані методи або виконувати їх модифікацію з урахуванням особливостей представлення гістерезису.

Ключові слова: гістерезис, часткові петлі, крива намагнічування, модель Маделунга, модель Джона Чана, модель Джилса-Атертона, модель Прейзаха

В данной статье рассмотрены способы представления явления гистерезиса. Учет гистерезиса наблюдается в электротехнике, биологии, гидрологии, экономике, философии и социологии. Моделирование осуществляется с учетом особенностей исходных данных и требуемой точности расчетов. Показаны преимущества и недостатки моделей Маделунга, Джона Чана, Джилса-Атертона, Прейзаха, Релея и графоаналитических. Рекомендуется для повышения точности моделирования использовать комбинированные методы или выполнять их модификацию с учетом особенностей представления гистерезиса.

Ключевые слова: гистерезис, частичные петли, кривая намагничивания, модель Маделунга, модель Джона Чана, модель Джилса-Атертона, модель Прейзаха

In the paper, models of hysteresis are presented. Modeling is carried out with a specific of initial data and in accordance with the accuracy of calculations. Preisach model is highly accurate description of the process, but requires a large number of input parameters. Models of John Chan and Jiles-Atherton have highly simple calculations. They enable to simulate a real process conditions for a match characteristics. Rayleigh model provides accurate results in initial magnetization. This model recommended for use in the calculation of the steady state. Semigraphical methods give only an idea of the progress of hysteresis effects. It is recommended to improve the accuracy of modeling to use combined methods or to perform its modification allowing for the representing of specific features of hysteresis.

Keywords: hysteresis, partial loop, magnetization curve, Madelung model, John Chan model, Jiles-Atherton model, Preisach model of hysteresis

Вступ. Явище гістерезису характеризує системи, що не відповідають миттєву реакцію на прикладені відносно них дії. Поведінка таких систем визначається зовнішніми факторами впливу в даний момент та попередніми її станами. Використання гістерезису спостерігається в електротехніці, біології, гідрології, економіці, філософії та соціології [1–3].

Поява математичних моделей опису гістерезису викликана значною кількістю прикладних задач. Тому метою даної роботи є опис основних принципів моделювання зазначеного явища.

В якості прикладу для порівняння використаємо електромагнітний гістерезис.

Метод Маделунга. В 1905 р. у статті Маделунга були сформульовані наближені закономірності побудови часткових кривих та циклів перемагнічування [4]. Разом з тим, відсутність пояснень його правил призвело до неправильного їх тлумачення, а внаслідок

© М. М. Лутчин. 2016

до цього і обмеженого їх практичного використання. В роботах [5, 6] приводяться уточнення та рекомендації.

Основні принципи графоаналітичного методу сформульовані наступним чином та проілюстровані на рис. 1.

Правило 1. Хід будь-якої часткової кривої $B = f(H)$ однозначно визначається точкою повороту (точкою, в якій одночасно змінюються знаки приросту B та H), яка являється початком для цієї кривої.

Зазначене твердження має місце не лише для кривих, початки яких знаходяться на одній із віток граничної петлі гістерезису, але і для будь-якої кривої всередині максимальної петлі. Звідси слідує, що будь-яка точка 1, яка знаходиться всередині максимальної петлі, є початком тільки для однієї зростаючої кривої 1–2 та однієї спадаючої кривої 1–3.

Проте точка 1 може знаходитися на нескінченній кількості зростаючих та спадаючих кривих з різними точками повороту.

Якщо точка повороту знаходиться на граничній петлі гістерезису (гілки якої формуються з множини нескінченно віддалених точок $H = \pm \infty$), то при її розташуванні на зростаючій вітці максимальної петлі вона може бути початком лише однієї спадаючої гілки, наприклад точка 1' гілки 1'–3'. У випадку розміщення точки повороту на спадаючій вітці граничної петлі, вона є початком лише для однієї зростаючої гілки часткової петлі.

Правило 2. Якщо яку-небудь точку 2 кривої 4–5, яка починається у точці 4, зробити точкою повороту, то нова часткова крива прийде у початкову точку 4.

Тобто всі часткові цикли – замкнені так, як їх часткові та кінцеві точки співпадають. Також зазначене правило указує на те, що зростаюча та спадаюча гілки одного і того ж циклу (петлі) не перетинаються між собою.

Правило 3. Продовження будь-якої кривої, наприклад 1–3, за точку повороту 3, яка замикає частковий цикл 3–1–3, співпадає з попередньою кривою 5–3, так ніби циклу 3–1–3 взагалі не було, а намагнічування відбувалося неперервно від точки 5 згідно кривої 5–4, яка проходить через точку 3.

Дане твердження виконується однаково для процесів намагнічування, розмагнічування та перемагнічування. Тобто крива 6–7 після її продовження за точку 7 співпадає з основною кривою початкового намагнічування, а крива 1'–3' – зі зростаючою гілкою граничної петлі.

Правило 4. Всі часткові криві, які виходять з різних точок з однаковою індукцією B , та які мають однаковий знак приросту індукції, можуть бути суміщені шляхом паралельного переміщення у горизонтальному напрямі.

Наприклад, взаємно суміщаються спадаючі криві 1–3 та 1'–3', а також зростаючі криві 3–1 та 3'–1'.

то зазначити, що крива 6–7 отримується за рахунок паралельного переносу кривої повернення.

У даному методі зазначається спосіб перебігу перехідного процесу через побудову сімейства гістерезисних петель.

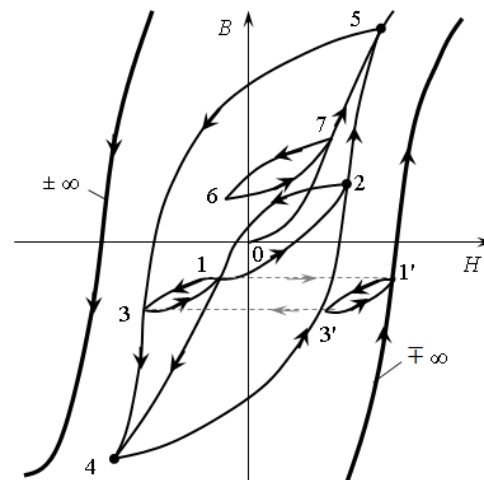


Рис. 1 – Часткові цикли намагнічування

Модель Джона Чана. Високою популярністю при моделюванні гістерезису за допомогою сучасних програмних комплексів користується модель Дж. Чана [7,8], оскільки її реалізація потребує мінімальну кількість вхідних даних. Так зростаюча та спадаюча гілки граничної петлі представляються виразами:

$$B_{\text{зр}}(H) = B_s \frac{H + H_c}{|H + H_c| + H_c \left(\frac{B_s}{B_r} - 1 \right)} + \mu_0 H,$$

$$B_{\text{сп}}(H) = B_s \frac{H - H_c}{|H - H_c| + H_c \left(\frac{B_s}{B_r} - 1 \right)} + \mu_0 H,$$

де B_r – залишкова індукція, H_c – коерцитивна сила, B_s – індукція насичення.

Початкова крива намагнічування може бути визначена з рівняння:

В реальних умовах перемагнічування здійснюється не по граничній петлі, а по частковим циклам, що формуються за змінами напруженості магнітного поля. При цьому всі часткові цикли перемагнічування обмежені границями максимальної петлі гістерезису. Згідно моделі нижня гілка часткового циклу отримується переміщенням відповідно нижньої гілки граничного циклу вертикально вгору на величину індукції B_d ($0 \leq B_d \leq B_r$). Верхня гілка часткового циклу отримана шляхом переміщення відповідно верхньої гілки граничного циклу вниз на таку ж величину B_d .

Зазначимо, що використання моделі Джона Чана рекомендовано для аналітичних досліджень, коли необхідно отримати тільки картину перехідного процесу.

Модель Джилса–Атертона. Однією з найпоширеніших на сьогодні являється модель Джилса–Атертона, яка використовується не лише для моделю-

вання властивостей магнітних матеріалів, але і для радіотехнічних цілей.

Особливістю моделі є представлення основної кривої намагнічування функцією.

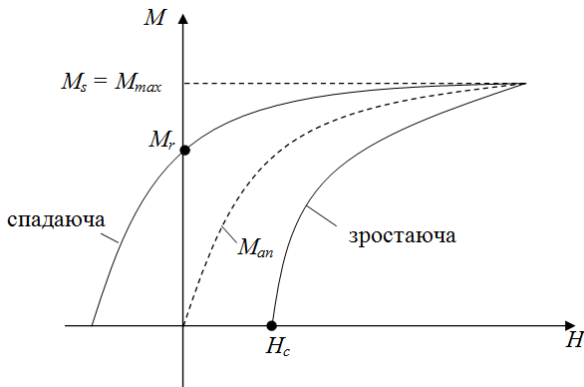


Рис. 2 – Петля гістерезису $M=f(H)$

Основна властивість моделі гістерезису – розклад намагніченості M на спадаючу M_{cn} та зростаючу M_{irr} складові [9]:

$$M = M_{irr} + M_{rev}.$$

Загальну намагніченість M можна представити з врахуванням кривої намагніченості M_{an} [10]:

$$M = cM_{an} + (1-c)M_{irr},$$

де c – змінний параметр області, який визначається згідно виразу:

$$c \cong \frac{\chi'_{in}}{\chi'_{an}} \text{ з } \chi'_{in} = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=0}, \quad \chi'_{an} = \left. \frac{dM_{an}}{dH} \right|_{H=0}.$$

Продиференціюємо рівняння та отримаємо:

$$\frac{dM}{dH} = c \frac{dM_{an}}{dH} + (1-c) \frac{dM_{irr}}{dH}.$$

Намагніченість зростаючої гілки петлі гістерезису описується наступним диференціальним рівнянням згідно [9 – 11]:

$$dM_{irr} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} dH,$$

де k – константа, згідно [12] пропорційна втратам на гістерезис (площі петлі) [А/м]; α – масштабуючий коефіцієнт (параметр основного поля), який пов'язує намагніченість M та інтенсивність ефективного магнітного поля $H_e = H + \alpha M$ [11], $\delta = \text{sgn}\left(\frac{dH}{dt}\right)$ – знаковий параметр складової (якщо $dH/dt > 0$, то $\delta = 1$, при $dH/dt < 0$, то $\delta = -1$).

Зміна намагніченості у загальному вигляді буде:

$$\frac{dM}{dH} = c \frac{dM_{an}}{dH} + (1-c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})}.$$

Намагніченість кривої намагнічування M_{an} описується функцією Ланжевїна [9, 11, 12]:

$$M_{an} = M_s \left[\coth\left(\frac{H_e}{a}\right) - \frac{a}{H_e} \right],$$

де a – параметр форми [13] [А/м]:

$$a = \frac{M_s}{3} \left(\frac{1}{\chi_{an}} + \alpha \right).$$

Модель Прейзаха. Теоретичні основи класичної теорії Прейзаха про ферромагнітні матеріали сьогодні вважаються фундаментальними в теорії опису перехідних електромагнітних процесів в матеріалах. Процес намагнічування модельованого зразка відбувається не миттєво, а з кінцевою швидкістю, зразок складається з невеликих доменних областей з однаковою величиною намагнічування H (диполь Прейзаха) [14].

Кожен окремий диполь характеризується прямокутним асиметричним циклом гістерезису (рис. 3).

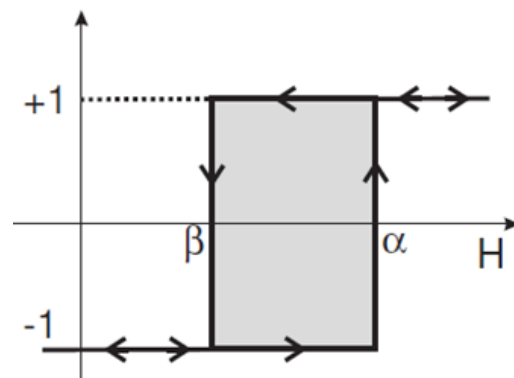


Рис. 3 – Елементарний цикл Прейзаха

Будь-який диполь може перебувати в додатному стані насичення (1) або від'ємному (-1). Перехід між станами визначається напруженістю магнітного поля H і відповідно становить:

1 при $H \geq \alpha$;

(-1; 1) при $\beta < H < \alpha$;

-1 при $H \leq \beta$.

Якщо рух відбувається по зростаючій гілці петлі гістерезису $H_{зр}$, то границі змінюються наступним чином: в точці стану α відбувається зміна полярності диполу з від'ємної на додатну. І навпаки для спадаючої гілки $H_{сп}$ відносно стану β . Точки α та β являються розривами першого роду функції петлі гістерезису.

Рівняння Максвелла з урахуванням магнітної поляризації J прийме вигляд [15]:

$$M_m(h_m) = \chi_0 h_m + \nu h_m^2,$$

де χ_0 – початкова сприйнятливість; ν – постійна Релея; h_m і M_m – амплітуди змінних поля та намагніченості або максимальні значення комутуючого постійного поля і намагніченості.

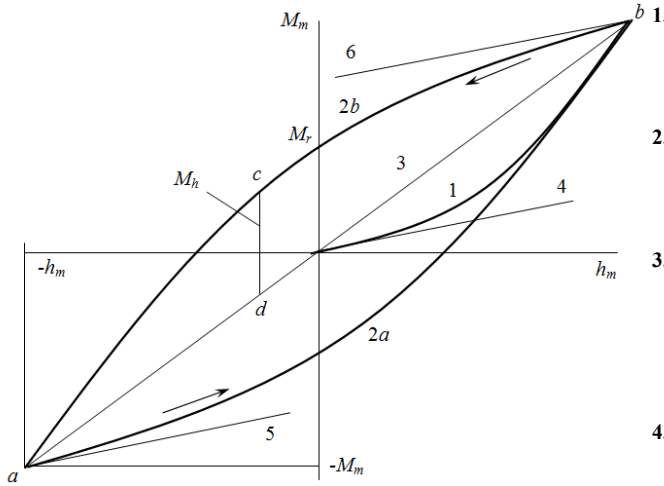


Рис. 5 – Петля магнітного гістерезису Релея: 1 – комутаційна крива намагнічування (місце розташування вершин сімейства часткових петель гістерезису); 2a і 2b – відповідно, зростаюча і спадаюча гілки петлі гістерезису; 3 – пряма ab з’єднує вершини петлі гістерезису (лінійна складова петлі); тангенси кута нахилу прямих 4–5 рівні, відповідно, початковим сприйнятливостям по комутаційній кривій намагнічування 1 і по зростаючій 2a і спадаючій 2b гілках петлі гістерезису; M_r – залишкова намагніченість; M_h (відрізок cd) – функція гістерезису (гістерезисна складова петлі)

Постійні Релея χ_0 – початкова магнітна сприйнятливість і ν – друга постійна Релея можна визначити по мінімуму середньоквадратичного відхилення від експериментально певної комутаційної кривої намагнічування або, як було запропоновано пізніше, графічно з лінійної залежності сприйнятливості χ_m від поля h_m :

$$\chi_m = M_m / h_m = \chi_0 + \nu h_m.$$

Область полів, у якій виконується лінійна залежність χ_m від h_m , називають областю Релея.

Комутаційна крива намагнічування і чисельні значення її параметрів χ_0 і ν є експериментальною основою для виразів, що описують петлі гістерезису в області Релея:

$$M(h) = \chi_0 h + \nu h^2 \left[\mp 1 \pm \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{h}{h_m} \right)^2 \right].$$

Зазначений спосіб моделювання гістерезису з високою точністю описує явище намагнічування в початковій зоні, в той час, як переважна більшість методів орієнтується на зону насичення.

Висновок. Отже, аналіз існуючих моделей представлення явища гістерезису вказує на те, що кожен метод проявляє свої переваги лише за виконання конкретних умов. Для отримання необхідної точності при розв’язанні прикладних задач рекомендується поєднувати методи.

Список літератури:

1. Беспалов, В. М. Гістерезис при згині розтягнутих канатів [Текст] / В. М. Беспалов, Г. М. Маренко, Р. О. Кайдалов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. № 6/9 (48). – С. 46–48. Режим доступу: <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/5814/5246>
2. Шамровський, А. Д. Явление гистерезиса при решении нелинейных задач для упругих стержневых конструкций [Текст] / А. Д. Шамровський, Т. А. Миняйло // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/7 (54). – С. 21–24. <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/2309/2113>
3. Раранський, М. Д. Гистерезис скорости ультразвуковых волн и упругие свойства твердых растворов cd 1-xzn xsb [Текст] / М. Д. Раранський, В. Н. Балазюк, М. І. Мельник, О. Н. Книгишничкая, В. Б. Гевик, М. Н. Гунько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/10 (59). – С. 33–37. Режим доступу: <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/4639/4294>
4. Madelung, E. Über Magnetisierung durch schnellverlaufende Ströme und die Wirkungsweise des Rutherford-Marconischen Magnetdetektors [Text] / E. Madelung // Annalen Der Physik. – 1905. – № 322 (10). – P. 861–890. doi: [10.1002/andp.19053221003](https://doi.org/10.1002/andp.19053221003)
5. Зурка, С. Е. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга. Часть 1 [Текст] / С. Е. Зурка, Ю. И. Мороз // Техническая электродинамика. – 1999. – № 1. – С. 22–27.
6. Зурка, С. Е. Моделирование магнитного гистерезиса на основе обобщенных правил Маделунга. Часть 2. [Текст] / С. Е. Зурка, Ю. И. Мороз // Технична електродинаміка. – 1999. – № 2. – С. 7–13.
7. Chan, J. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation [Text] / J. Chan, A. Vladimirescu, Xiao-Chun Gao, P. Liebmann, J. Valainis // IEEE Transactions on computer-aided design. – 1991. – Vol. 10, No. 4. – P. 476–482.
8. Chan, J. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation [Text] / J. Chan // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. – 1991. – Vol. 10, No. 7. – P. 470–482.
9. Liu, Sh. T. Current transformer module basing the Jiles-Atherton hysteresis model in EMTP/ATP simulation [Text] / Sh. T. Liu, S. R. Huang, H. W. Chen, T. Y. Hsein // In Power Engineering Conference, 2005. – P. 653–656.
10. Pop, N. C. Jiles-Atherton magnetic hysteresis parameters identification [Text] / N. C. Pop, O. F. Caltun // Acta Physica Polonica A. – 2011. – Vol. 120, No. 3. – P. 491–496.
11. Williams, M. C. Simulation and modeling of nonlinear magnetic [Text] / M. C. Williams, R. S. Vogelsong, K. S. Kundert // The Designer’s Guide Community. – 1995. – № 1. – P. 736–739.
12. Zidaric, B. JA hysteresis model parameters estimation using GA [Text] / B. Zidaric, D. Miljavec // Advances in Electrical and Electronic Engineering. – 2005. – № 4 (3). – P. 174–177.
13. Mordjaoui, M. Qualitative modeling for ferromagnetic hysteresis cycle [Text] / M. Mordjaoui, B. Boudjema, M. Chabane, R. Daira // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2007. – № 36. – 2007. – P. 88–94.
14. Mayergoyz, I. Mathematical models of hysteresis and their applications [Text] / I. Mayergoyz. – Academic Press, 2003. – 498 p. doi: [10.1016/b978-0-12-480873-7.x5000-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-480873-7.x5000-2)
15. Amor, Y. O. A new convergence procedure for the finite element computing associated to Preisach hysteresis model [Text] / Y.O. Amor, M. Feliachi, H. Mohellebi // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – Vol. 36, No. 4. – P. 1242–1245. doi: [10.1109/20.877665](https://doi.org/10.1109/20.877665)
16. Van de Wiele, B. Energy considerations in a micromagnetic hysteresis model and the Preisach model [Text] / B. Van de Wiele, L. Vandenbossche, L. Dupre, Daniel De Zutter // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 108, No. 10. – P. 103902. doi: [10.1063/1.3505779](https://doi.org/10.1063/1.3505779)

17. *Vandenbossche, L.* Magnetic hysteretic characterization of the irradiation-induced embrittlement of Fe, Fe–Cu model alloys, and reactor pressure vessel steel [Text] / *L. Vandenbossche, M. J. Konstantinovic, L. Dupre* // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2008. – № 320 (20). – P. e562–e566. doi: [10.1016/j.jmmm.2008.04.019](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.019)
18. *Everett, D.* A general approach to hysteresis – part 4, an alternative formulation of the domain model [Text] / *D. Everett* // Transactions Faraday Society. – 1955. – № 51. – P. 1551–1557. doi: [10.1039/tf9555101551](https://doi.org/10.1039/tf9555101551)
19. *Nicolaide, A.* A New Approach of Mathematical Modelling of Hysteresis Curves of Magnetic Materials [Text] / *A. Nicolaide* // Revue Roumaine des Sciences Techniques. – 2003. – Vol. 48, No. 2-3. – P. 221–233.
20. *Nicolaide, A.* An Approach to the Mathematical Modelling of the Hysteresis Curves of Magnetic Materials: The Mirror Curves [Text] / *A. Nicolaide* // Revue Roumaine des Sciences Techniques. – 2007. – Vol. 52, No. 3. – P. 301–310.
21. *Ponomarev, Yu. F.* K zakonu namahnychyvaniya Releia. Novaia matematycheskaia model petel hysterezyza [Text] / *Yu. F. Ponomarev* // Fyzyka metallor y metallovedenye. – 2007. – Vol. 104, No. 5. – P. 487–496.
1. *Bespalov, V. M., Marenko, H. M., Kaidalov, R. O.* (2010). Hysterezyz pry zghyni roztiahnutykh kanativ. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (9 (48)), 46–48. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/5814/5246>
2. *Shamrovskiy, A. D., Myniailo, T. A.* (2011). Yavyshe hysterezyz pry rishenni neliniinykh zadach dlia pruzhnykh sterzhnovykh konstrukttsii. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (7 (54)), 21–24. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/2309/2113>
3. *Raranskyi, M. D., Balaziuk, V. N., Melnyk, M. I.* (2012). Hysterezyz shvydkosti ultrazvukovykh khvyl i pruzhni vlastyvyty verdykh rozchyniv Cd1–xZnxSb. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 10 (59), 33–37. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/4639/4294>
4. *Madelung, E.* (1905). Über Magnetisierung durch schnellverlaufende Ströme und die Wirkungsweise des Rutherford-Marconischen Magnetdetektors. Annalen Der Physik, 322 (10), 861–890. doi: [10.1002/andp.19053221003](https://doi.org/10.1002/andp.19053221003)
5. *Zyrka, C. E., Moroz, Yu. Y.* (1999). Modelyrovanye mahnytnoho hysterezyza na osnove obobshchennykh pravyl Madelunha. Chast 1. Tekhnichna elektrodynamika, 1, 22–27.
6. *Zyrka, C. E., Moroz, Yu. Y.* (1999). Modelyrovanye mahnytnoho hysterezyza na osnove obobshchennykh pravyl Madelunha. Chast 2. Tekhnichna elektrodynamika, 2, 7–13.
7. *Chan, J., Vladimirescu, A., Xiao-Chun, G., Liebmann, P., Valainis, J.* (1991). Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation. IEEE Transactions on computer-aided design, 10 (4), 476–482.
8. *Chan, J.* (1991). Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation. IEEE Transactions on Computer-Aided Design, 10 (7), 470–482.
9. *Liu, Sh. T., Huang, S. R., Chen, H. W.* (2005). Current transformer module basing the Jiles-Atherton hysteresis model in EMTP/ATP simulation. In Power Engineering Conference, 653–656.
10. *Pop, N. C., Caltun, O. F.* (2011). Jiles-Atherton magnetic hysteresis parameters identification. Acta Physica Polonica, 120 (3), 491–496.
11. *Williams, M. C., Vogelsson, R. S., Kundert, K. S.* (2009). Simulation and modeling of nonlinear magnetic. The Designer's Guide Community, 1, 736–739.
12. *Zidaric, B., Miljavec, D.* (2005). J–A hysteresis model parameters estimation using GA. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 4 (3), 174–177.
13. *Mordjaoui, M., Boudjema, B., Chabane, M., Daira, R.* (2007). Qualitative modeling for ferromagnetic hysteresis cycle. World Academy of Science, Engineering and Technology, 36, 88–94.
14. *Mayergoyz, I.* (2003). Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications. Academic Press, 498. doi: [10.1016/b978-0-12-480873-7.x5000-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-480873-7.x5000-2)
15. *Amor, Y. O., Feliachi, M., Mohellebi, H.* (2000). A new convergence procedure for the finite element computing associated to Preisach hysteresis model. IEEE Transactions on Magnetics, 36 (4), 1242–1245. doi: [10.1109/20.877665](https://doi.org/10.1109/20.877665)
16. *Van de Wiele, B., Vandenbossche, L., Dupré, L., De Zutter, D.* (2010). Energy considerations in a micromagnetic hysteresis model and the Preisach model. Journal of Applied Physics, 108 (10), 103902. doi: [10.1063/1.3505779](https://doi.org/10.1063/1.3505779)
17. *Vandenbossche, L., Konstantinović, M. J., Dupré, L.* (2008). Magnetic hysteretic characterization of the irradiation-induced embrittlement of Fe, Fe–Cu model alloys, and reactor pressure vessel steel. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320 (20), e562–e566. doi: [10.1016/j.jmmm.2008.04.019](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.019)
18. *Everett, D. H.* (1955). A general approach to hysteresis. Part 4. An alternative formulation of the domain model. Transactions of the Faraday Society, 51, 1551–1557. doi: [10.1039/tf9555101551](https://doi.org/10.1039/tf9555101551)
19. *Nicolaide, A.* (2003). A New Approach of Mathematical Modelling of Hysteresis Curves of Magnetic Materials. Revue Roumaine des Sciences Techniques, 48 (2-3), 221–233.
20. *Nicolaide, A.* (2007). An Approach to the Mathematical Modelling of the Hysteresis Curves of Magnetic Materials: The Mirror Curves. Revue Roumaine des Sciences Techniques, 52 (3), 301–310.
21. *Ponomarev, Yu. F.* (2007). K zakonu namahnychyvaniya Releia. Novaia matematycheskaia model petel hysterezyza. Fyzyka metallor y metallovedenye, 104 (5), 487–496.

Поступила (received) 08. 11. 2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математичні моделі гістерезису/ М. М. Лутчин// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.8–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Математические модели гистерезиса/ Н. Н. Лутчин// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.8–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Mathematical models histeresys/ M. Lutchyn// Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.8–13. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Микола Миколайович Лутчин – аспірант кафедри електричних мереж та систем Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: Lutchyn.m@gmail.com

Николай Николаевич Лутчин – аспірант кафедри електрических сетей и систем Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: Lutchyn.m@gmail.com

Mykola Lutchyn – graduate student of electrical networks and systems of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", e-mail: Lutchyn.m@gmail.com

УДК 666.3:539.53

П. П. БАРВИЦКИЙ, Т. А. ПРИХНА, В. Б. СВЕРДУН, В. Е. МОЩИЛЬ, С. Н. ДУБ, М. В. КАРПЕЦ, В. Б. МУРАТОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ $AlB_{12}C_2$

В статье представлены результаты исследований процессов синтеза керамики на основе $AlB_{12}C_2$ из порошков $\alpha-AlB_{12}$ с добавками углерода (С) и карбида титана (TiC), а также спекания порошка $AlB_{12}C_2$ методом горячего прессования при 30 МПа и под квазистатическим давлением 2 ГПа. Изучены структура и механические характеристики полученных материалов (плотность, твердость, трещиностойкость, напряжения при сжатии и изгибе). Также, для сравнения, приведены характеристики материалов, спеченных в условиях горячего прессования и высокого давления из порошка $\alpha-AlB_{12}$.

Ключевые слова: додекаборид алюминия, $AlB_{12}C_2$, $\alpha-AlB_{12}$, горячее прессование, высокое квазистатическое давление, структура, механические свойства

В статті наведені результати дослідження процесів синтезу кераміки на базі $AlB_{12}C_2$ з порошків $\alpha-AlB_{12}$ з добавками карбону (С) та карбиду титану (TiC), а також спікання порошку $AlB_{12}C_2$ методом гарячого пресування при 30 МПа та під дією квазістатичного тиску 2 ГПа. Досліджені структура та механічні характеристики одержаних матеріалів (густина, твердість, тріщиностійкість, напруга під час згинання та стискання). Також, для порівняння, наведені характеристики матеріалів, спечених в умовах гарячого пресування і високого тиску з порошку $\alpha-AlB_{12}$.

Ключові слова: додекаборид алюмінію, $AlB_{12}C_2$, $\alpha-AlB_{12}$, гаряче пресування, високий квазістатичний тиск, структура, механічні властивості

The paper presents the results of the study on sintering of the $AlB_{12}C_2$ submicron powder and synthesis of $AlB_{12}C_2$ -based ceramics from the submicron $\alpha-AlB_{12}$ powder with C and TiC additions by hot pressing at 30 MPa. The material sintered at 1950 °C from $AlB_{12}C_2$ which contained about 100 % of $AlB_{12}C_2$ according to the X-ray analysis, demonstrated the density $\rho = 2.57 \text{ g/cm}^3$, fracture toughness $K_{Ic} (49 \text{ N}) = 3.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, hardness $H_V (49 \text{ N}) = 27.9 \text{ GPa}$, bending strength $R_{bs} = 311 \text{ MPa}$ and compression strength $R_{cs} = 1461 \text{ MPa}$; while the SEM study showed that the material consisted of two phases with approximate stoichiometries: $Al_{0.15}B_{11}C_2$ (matrix phase) and $Al_2O_{3.5}B_{1.1}$ (inclusions). The material synthesized at 1950 °C from $\alpha-AlB_{12}$ with 20 % TiC contained 74 % $AlB_{12}C_2$, 22 % TiB₂, 4 % Al_2O_3 according to the X-ray analysis and showed $H_V (49 \text{ N}) = 28.9 \text{ GPa}$, $K_{Ic} (49 \text{ N}) = 5.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, $R_{bs} = 633 \text{ MPa}$ and $R_{cs} = 640 \text{ MPa}$, but its density was higher, $\rho = 3.2 \text{ g/cm}^3$. Additions of 17 % C to the $\alpha-AlB_{12}$ powder lead to 86 % $AlB_{12}C_2$ and 14 % AlN composition with $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $K_{Ic} (49 \text{ N}) = 5.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, $R_{cs} = 423 \text{ MPa}$, $R_{bs} = 310 \text{ MPa}$. Materials sintered for comparison from $\alpha-AlB_{12}$ at 30 MPa, 2080-1950 °C turned out to be 94-98 % $\alpha-AlB_{12}$ ($\rho = 2.58 \text{ g/cm}^3$) and demonstrated $H_V (49 \text{ N}) = 24.1 \text{ GPa}$, $K_{Ic} (49 \text{ N}) = 4.9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, $R_{bs} = 336 \text{ MPa}$ and $R_{cs} = 378 \text{ MPa}$.

Keywords: aluminum dodecaboride, $AlB_{12}C_2$, $\alpha-AlB_{12}$, sintering, hot pressing, high quasihydrostatic pressure, structure, mechanical properties.

Введение. Исследование направлено на создание легкой ударопрочной керамики на основе додекаборида алюминия для защитной брони и других применений, например, в качестве конструкционной керамики на атомных электростанциях.

Интерес к высшим боридам алюминия и к додекабориду алюминия, в частности, существует давно [1–10], но до сих пор данные материалы не нашли широкого применения, поскольку промышленные и полупромышленные технологии производства порошков этих соединений еще не разработаны.

В настоящее время порошки додекаборидов алюминия производятся в небольших количествах и только в лабораторных условиях [11]. В связи с этим, процессы спекания боридов алюминия и свойства консолидированных материалов на их основе, исследованы мало и в литературе практически не описаны. Высшие бориды изучались с точки зрения их использования в качестве твердого топлива [2], абразивов, взрывчатых веществ и в качестве добавок к материалам на основе карбида бора [1, 8]. Довольно хорошо были изучены свойства монокристаллов высших боридов алюминия, полученные раствор-расплавным методом в алюминии [1, 3–10].

Структуры боридов алюминия похожи на структуру карбида бора. Их структуры включают в себя почти правильные икосаэдры атомов бора. Однако не все структуры известных боридов алюминия расшифрованы и даже в структуре карбида бора все еще существует некоторые неясности [12]. Отсутствие ин-

формации, касающейся структуры некоторых высших боридов алюминия, наличие многочисленных рефлексов на рентгенограммах (из-за большого количества атомов в элементарной ячейке и, как следствие, большого количества отражений) усложняют рентгенофазовый анализ.

Целью наших исследований было изучение структуры и механических характеристик горячепрессованных, а также полученных в условиях высоких квазистатических давлений $AlB_{12}C_2$ и $\alpha-AlB_{12}$ с добавками углерода (С) и карбида титана (TiC). Результаты сравниваются с характеристиками защитных пластин из карбида бора, которые используются для средств индивидуальной защиты, и данными, имеющимися в литературе [13], а также с характеристиками пластин спеченных из порошка $\alpha-AlB_{12}$ в условиях горячего прессования (30 МПа) и в условиях высоких квазистатических давлений (2 ГПа) при высокой температуре.

Получение материалов и методика проведения экспериментов. Образцы на основе $AlB_{12}C_2$ и $\alpha-AlB_{12}$ были получены из субмикронных порошков $AlB_{12}C_2$ и $\alpha-AlB_{12}$, синтезированных из гексагонального нитрида бора В. Б. Муратовым, одним из со-авторов данной статьи. Блоки диаметром 40 мм и толщиной 15 мм были изготовлены методом горячего прессования (давление 30 МПа, температура до 2200 °C) с помощью индукционного нагрева в пресс-формах, покрытых изнутри гексагональным

© П. П. Барвицкий, Т. А. Прихна, В. Б. Свердун, В. Е. Мощиль, С. Н. Дуб, М. В. Карпец, В. Б. Муратов, А. А. Васильев. 2016

нитридом бора (для ізоляції від графітового награвателя). Образці діаметром 9–30 мм і товщиною 5–10 мм виготовлялись при високому (2 ГПа) тисненні і температурах – 1200–1400 °С. При спеканні матеріали ізолювали від графітового награвателя з допомогою спеціально спресованого в холодному стані контейнера з гексагонального нитрида бора (полый циліндр з двома заглушками).

Таблиця 1 – Фазовий склад вихідних порошків α -AlB₁₂ and AlB₁₂C₂ згідно розшифровки рентгенограм з використанням методу Ритвельда, і параметри елементарних ячеек фаз, виявлених в порошках

Исходный порошок	Фазовый состав, мас. %	a, c, нм	№ образцов
α -AlB ₁₂ (I)	α -AlB ₁₂ = 88 BN _g = 3,5 Al ₂ O ₃ = 8,5	a = 1,017; c = 1,429 a = 0,2501; c = 0,6689 a = 0,7955	1, 2 и 4
α -AlB ₁₂ (II)	α -AlB ₁₂ = 95,5 AlN _H = 4,5 B ₂ O _{3(cub)}	a = 1,0164; c = 1,4227 a = 0,3110; c = 0,4977 –	3 и 5
α -AlB ₁₂ (III)	α -AlB ₁₂ = 95 AlN _H = 5	a = 1,0174; c = 1,4286 a = 0,3111; c = 0,4981	6–8
AlB ₁₂ C ₂ (I)	AlB ₁₂ C ₂ = 62 h-BN = 5 Al ₂ O ₃ (corundum) = 33	a = 0,5658; c = 1,2357 a = 0,2504; c = 0,6645 a = 0,4768; c = 1,2999	9–11

Структуру образцов исследовали методом рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра ДРОН-УМ1. Рентгенограммы получали с использованием монохроматического Cu^oK α излучения ($\lambda=1,541841 \text{ \AA}$) в диапазоне углов 2θ 8–88°, с шагом сканирования 0,05° и временем экспозиции в точке – 2 сек. Анализ экспериментальных данных проводили с помощью пакета программ PowderCell 2.4 с использованием полнопрофильного метода Ритвельда [14]. Микроструктуру образцов анализировали с помощью растрового Оже-спектрометра (SEM) JAMP–9500F, совмещенного с растровым электронным микроскопом, имеющим высокую степень разрешения. Перед анализом поверхности образцов полировались и покрывались тонким слоем золота (для предотвращения зарядки материала под действием электронного пучка при исследовании).

Макротвердость по Виккерсу и трещиностойкость по Палмквисту определяли с помощью твердомера “ТП-2” и индентора Виккерса при нагрузке 49 Н. Изучение микротвердости проводили индентором Виккерса на микротвердометре “ПМТ-3” при нагрузке 4,91 Н. Размеры отпечатков измеряли с помощью универсального исследовательского микроскопа NU-2 (CarlZeissJena, Германия) при увеличении в 750 раз в режиме фазового контраста.

Исследование предела прочности при изгибе и сжатии полированных образцов размером 5 × 5 × 25 мм проводили при статическом нагружении по трехточечной схеме.

Границу прочности при трехточечном изгибе $R_{изг}$ определяли с помощью прибора ФП-10 со шкалой 400 кГ; расстояние между нижними опорами, на которые устанавливали исследуемый образец, составляло $l = 15 \text{ мм}$.

В табл. 1 представлены результаты исследования фазового состава (с помощью рентгенофазового анализа и расшифровки методом Ритвельда) исходных порошков AlB₁₂C₂ и α -AlB₁₂ (со средним размером зерен 50–150 нм и удельной поверхностью 21–15 м²/г, рис. 1). Смеси с углеродом и карбидом титана готовили с использованием смесителя типа “пьяная бочка” в течение 12 часов.

Прочность при изгибе определяли по уточненной формуле, выведенной для соотношений $h/l > 0,15-0,20$, где h – высота образца [14]:

$$R_{изг} = 3 P l / 2 b h^2 (1 - 4 h / 3 \pi l), \quad (1)$$

где b и h – ширина и высота образца, соответственно; P – разрушающая нагрузка.

Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ определяли с помощью машины Р-5 согласно ДСТУ Б В.2.7-61-97. Образец помещали между твердосплавными вставками в алюминиевых прокладках.

Пористость образцов определяли по формуле:

$$P = (1 - \rho_{теор} / \rho) 100, \%, \quad (2)$$

где $\rho_{теор}$ – теоретический удельный вес образца (материала) и ρ – измеренный удельный вес образца (материала). Теоретический удельный вес образцов $\rho_{теор}$ рассчитывали на основе результатов количественного рентгенофазового анализа и теоретических значений удельного веса фаз – составляющих по формуле:

$$\rho_n = \frac{100 \times \rho_1 \times \rho_2 \times \dots \times \rho_n}{\alpha_1 \times \rho_1 \times \rho_2 \times \dots \times \rho_n + \alpha_2 \times \rho_1 \times \rho_3 \times \dots \times \rho_n + \alpha_n \times \rho_1 \times \rho_2 \times \dots \times \rho_{n-1}}, \quad (3)$$

где $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ – теоретические значения удельного веса фаз, которые входят в состав образца, а $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – количество (мас. %) каждой фазы, которая входит в состав образца, согласно результатам количественного рентгенофазового анализа, т.е. $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 100 \%$.

Реальный удельный вес образцов определяли методом гидростатического взвешивания и рассчитывали по формуле:

$$\rho = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_2 - m_3}, \quad (4)$$

где m_1 – вес образца на воздухе, m_2 – вес образца после погружения в смазку (парафин) на воздухе; m_3 – вес образца в воде, опущенного перед этим в

смазку; ρ_w – удельный вес воды при температуре исследования.

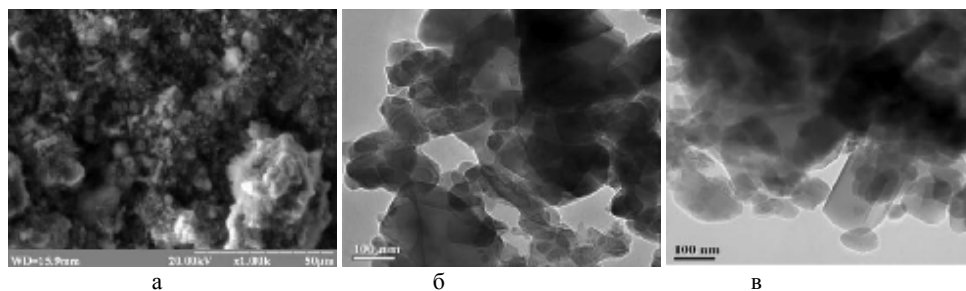


Рис. 1 – Вид порошка α -AlB₁₂, изображения, полученные с помощью: а – SEM; б, в – TEM

Обсуждения процессов синтеза, спекания материалов на основе AlB₁₂C₂, а также результатов исследования их структуры и свойств. В табл. 2 приведены составы исходных смесей, давление (P), температура (T), и скорость спекания (V), фазовый состав и параметры элементарных ячеек фаз, присутствующих в материалах. Нам удалось спечь субмикронные порошки α -AlB₁₂ (I) при 2 ГПа за 1 час при температуре 1200 °С до беспористого состояния (образец 2, табл. 2). Спекание порошка α -AlB₁₂ в условиях горячего прессования при 30 МПа происходило только при температуре 1950–2080 °С (образцы № 3, 4, табл. 2). Механические характеристики этих материалов приведены в табл. 6 (нумерация образцов в табл. 2 и 6 одна и та же).

Добавка 17 мас. % углерода к α -AlB₁₂ приводит к образованию фазы AlB₁₂C₂ (образец 5, табл. 2) и увеличению трещиностойкости образца (образец 5, табл. 6), при этом удельный вес материала увеличивается лишь незначительно. Добавка TiC к α -AlB₁₂ и спекание под давлением 30 МПа при температуре 1950 °С также приводит к образованию фазы AlB₁₂C₂, но, параллельно с ней, формируется и фаза TiB₂ (образец 6, табл. 2). Механические характеристики (твердость, трещиностойкость, предел прочности при сжатии и при изгибе) образца 6 были достаточно высокими (табл. 6), но его удельный вес увеличился до 3,2 г/см³. После спекания смеси того же α -AlB₁₂ и TiC под высоким давлением (2 ГПа) при сравнительно низкой (1200 °С) температуре (образец 7, табл. 2), фаза AlB₁₂C₂ не образовывалась и образец состоял из α -AlB₁₂, TiC, и небольшого количества AlN. Подъем температуры спекания до 1400 °С при высоком (2 ГПа) давлении также не привел к образованию AlB₁₂C₂, но наблюдалось формирование TiB₂ и исчезновение TiC (образец 8, табл. 2). Следует отметить, что механические характеристики обоих образцов (образцы 7 и 8, табл. 6), были невысокими. К сожалению, при 2 ГПа на используемом нами оборудовании нельзя было поднять температуру выше 1400 °С.

В образцах, спеченных при 30 МПа (образцы 9, 10) и 2 ГПа (образец 11) наблюдались высокие твердости по Виккерсу (табл. 6), и, похоже, что их

трещиностойкость увеличивалась с увеличением количества Al₂O₃ в структуре материалов (как показал рентгенофазовый анализ).

Неожиданным было различие механических свойств и составов образцов, спеченных из того же исходного порошка, используя те же параметры спекания, но разные скорости (V) повышения температуры во время нагрева (образцы 9, 10, табл. 2, 6). Изучение их структуры с помощью SEM (сканирующего электронного микроскопа) и микрозондового анализа (рис. 2) позволило нам выявить следующие отличия. Примерный состав матрицы материала, который нагревался быстрее ($V = 325$ град/мин) был Al_{0,15}B₁₁C₂ (образец 9), в то время, как примерный состав матричной фазы материала, который нагревали медленнее ($V = 100$ град/мин) был Al_{0,09}B_{8,6}C₂ (образец 10). Обе матричные фазы демонстрировали дефицит Al и B, по сравнению со стехиометрией AlB₁₂C₂, но в матрице второго материала этот дефицит был намного выше. При исследовании с помощью SEM фаза Al₂O₃ в обоих материалах обнаружена не была (следует отметить, что исследуемые области были достаточно велики, чтобы быть уверенным в том, что электроны отражались и рассеивались именно от изучаемых включений, т.е. быть уверенным в том, что микрозонд не захватывал матричную фазу), однако, были обнаружены фазы-включения с приблизительными составами Al₂O_{3,5}B_{1,1} (образец 9) и Al₂O_{3,5}B_{1,9}N_{0,3} (образец 10). Таким образом, эти фазы (которые выглядят светлее на рис. 2, а–с) содержат кроме алюминия и кислорода высокое количество бора, причем, концентрация бора в светлой фазе образца 10 была выше (примерно в два раза), чем в образце 9. Вероятно, медленное нагревание приводит к образованию несколько большего количества фазы Al-B-O со структурой Al₂O₃ с более высоким содержанием бора в ней (возможно, из-за увеличения времени диффузии), а также к низкому содержанию Al в структуре фазы AlB₁₂C₂ из-за его испарения. Это с большой степенью вероятности может быть причиной существенного различия механических свойств этих материалов.

На рис. 3 приведены структуры и результаты исследования фазового состава, а также стехиометрии фаз-составляющих, полученные с

помощью SEM и микроанализа, в случае материала, синтезированного из порошка α -AlB₁₂ с добавлением 20 мас. % TiC (образец № 6, табл. 2, 6). Были обнаружены три основные фазы, приблизительный состав которых Al_{0,17}B_{4,55}C₂O_{0,04}N_{0,21}, TiB_{2,58}C_{0,8}Al_{0,02} и Al₂O_{3,79}B_{2,04}C_{0,8}, в то время как рентгенофазовый анализ с расшифровкой методом Ритвельда показал наличие в материале фаз: AlB₁₂C₂ = 74 мас. %, TiB₂ = 22 мас. %, и Al₂O₃ = 4 мас. %. Таким образом, вполне вероятно, что во время спекания могли образоваться твердые растворы TiB₂ с углеродом и алюминием, а также твердые растворы Al₂O₃ с бором и углеродом.

Для сравнения, свойства двух типов карбида бора (образец 12 из работы [13] и образец 13 – исследованный авторами этой статьи) приведены в табл. 6. Результаты, представленные в табл. 6, свидетельствуют о том, что механические характеристики спеченного материала на основе AlB₁₂C₂ сопоставимы с характеристиками карбида бора и даже по некоторым показателям их превосходят.

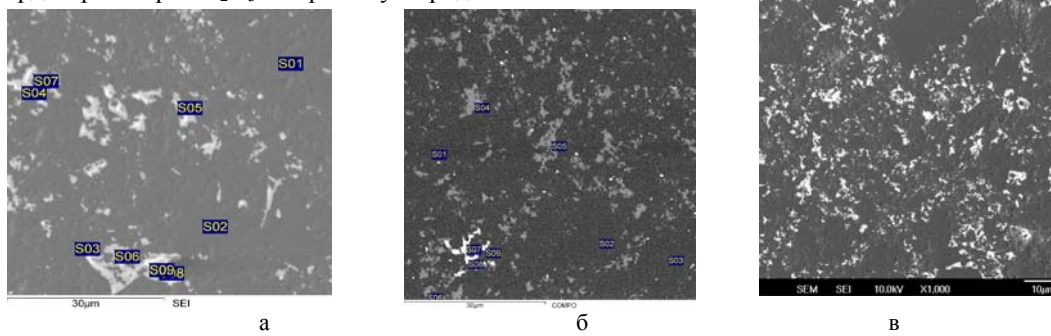


Рис. 2 – Изображения структуры AlB₁₂C₂: а – SEM (SEI) (№ 9); б, в – SEM (COMPO, SEI) (№ 10). Результаты микрондовых анализов точек, отмеченных на рис. 2, а, отображены в табл. 3, а на рис. 2, б – в табл. 4. Составы образцов согласно рентгенофазового анализа: № 9 AlB₁₂C₂ = 99,7 мас. %, BN_г = 0,3 мас. %, № 10 AlB₁₂C₂ = 93 мас. %, BN_г = 2 мас. %, Al₂O₃ (gamma) = 5 мас. %

Таблица 2 – Состав исходной порошковой смеси и условия спекания (Т–температура, Р–давление, τ–время выдержки, V–скорость нагрева) материала на основе α -AlB₁₂, фазовый состав консолидированного материала, их плотность (ρ), пористость (Π) и параметры элементарной ячейки (a, c) присутствующих фаз в спеченных образцах

№ образца	Исходный порошок	Р, Т, V, τ	Фазовый состав, мас. %, ρ , Π	Параметры элементарной ячейки a, c, нм
1	2	3	4	5
1	α -AlB ₁₂ (I)	P = 2 ГПа T = 1200 °C τ = 0,17 ч	α -AlB ₁₂ = 79 Al ₂ O ₃ = 21 $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$, $\Pi = 4,3 \%$	a = 1,0157; c = 1,4273 a = 0,4760; c = 1,2990
2	α -AlB ₁₂ (I)	P = 2 ГПа T = 1200 °C τ = 1 ч	α -AlB ₁₂ = 95 Al ₂ O ₃ = 5 $\rho = 2,64 \text{ г/см}^3$, $\Pi \sim 0 \%$	a = 1,0140; c = 1,4233 a = 0,4749; c = 1,3012
3	α -AlB ₁₂ (II)	P = 30 МПа T = 1950 °C τ = 0,3 ч	α -AlB ₁₂ = 94 BN _г = 6 $\rho = 2,53 \text{ г/см}^3$, $\Pi = 0,8 \%$	a = 1,0157; c = 1,4244 a = 0,2504; c = 0,6660
4	α -AlB ₁₂ (I)	P = 30 МПа T = 2080 °C τ = 0,17 ч	α -AlB ₁₂ = 98 BN = 2 $\rho = 2,58 \text{ г/см}^3$, $\Pi \sim 0 \%$	a = 1,0160; c = 1,4252 a = 0,2509; c = 0,6661
5	α -AlB ₁₂ (II) + 17 мас. % C	P = 30 МПа T = 1950 °C τ = 0,3 ч	AlB ₁₂ C ₂ = 86 AlN = 14 $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, $\Pi = 0,1 \%$	a = 0,5610; c = 1,2118 a = 0,3147; c = 0,5015
6	α -AlB ₁₂ (III) + 20 мас. % TiC	P = 30 МПа T = 1950 °C τ = 0,3 ч	AlB ₁₂ C ₂ = 74 TiB ₂ = 22 Al ₂ O ₃ = 4 $\rho = 3,2 \text{ г/см}^3$, $\Pi \sim 0 \%$	a = 0,5608; c = 1,2436 a = 0,3033; c = 0,3235 a = 0,4769; c = 1,3022
7	α -AlB ₁₂ (III) + 20 мас. % TiC	P = 2 ГПа T = 1200 °C τ = 1 ч	α -AlB ₁₂ = 79 TiC = 14,5 AlN = 6,5 $\rho = 3,13 \text{ г/см}^3$, $\Pi \sim 0 \%$	a = 1,0176; c = 1,4241 a = 0,4321; a = 0,3105; c = 0,4955

Продолжение таблицы .2

1	2	3	4	5
8	α -AlB ₁₂ (III) + 20 мас. % TiC	P = 2 ГПа T = 1400 °C τ = 1 ч	α -AlB ₁₂ = 62 Al ₂ O ₃ = 20,5 AlN = 2 TiB ₂ = 14 TiC = 0,5 ρ = 2,99 г/см ³ , П = 0,5 %	a = 1,0152; c = 1,4252 a = 0,4761; c = 1,2994 a = 0,3109; c = 0,4965 a = 0,3027; c = 0,3232 a = 0,4315
9	AlB ₁₂ C ₂	P = 30 МПа T = 1950 °C, τ = 0,3 ч V = 325 град/мин	AlB ₁₂ C ₂ = 99,7 BN _г = 0,3 ρ = 2,57 г/см ³ , П ~ 2 %	a = 0,5628; c = 1,2267 a = 0,2504; c = 1,0028
10	AlB ₁₂ C ₂	P = 30 МПа T = 1950 °C τ = 0,3 ч V = 100 град/мин	AlB ₁₂ C ₂ = 93 BN _г = 2 Al ₂ O ₃ (gamma) = 5 ρ = 2,59 г/см ³ , П ~ 3 %	a = 0,5644; c = 1,2267 a = 0,2504; c = 0,6726 a = 0,5689; c = 0,7902
11	AlB ₁₂ C ₂	P = 2 ГПа T = 1400 °C τ = 1 ч	AlB ₁₂ C ₂ = 89 Al ₂ O ₃ (corund.) = 11 ρ = 2,73 г/см ³ , П ~ 0 %	a = 0,5646; c = 1,2322 a = 0,4769; c = 1,3019
12	B ₄ C [13]	P = 30 МПа T = 2240 °C	B ₄ C+C ρ = 2,52 г/см ³ , П ~ 2 %	-
13	B ₄ C	P = 30 МПа T = 2240 °C, τ = 0,17 ч	B ₄ C ~ 100 ρ = 2,52 г/см ³ , П ~ 0 %	a = 0,5608; c = 1,2117

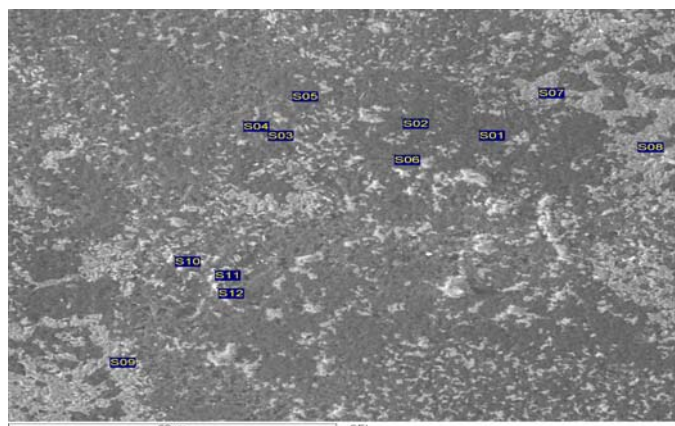


Рис. 3 – SEM (SEI) (образец № 6) структура после спекания AlB₁₂C₂ с 10 мас. % TiC при P = 30 МПа, T = 1950 °C, τ = 0,3 ч. Результаты микрозондового анализа в точках, отмеченных на снимке структуры, показаны в табл. 5. Фазовый состав образца 6 согласно рентгенофазового анализа: AlB₁₂C₂ = 74 мас. %, TiB₂ = 22 мас. %, Al₂O₃ = 4 мас. %

Таблица 3 – Результаты микрозондового анализа в точках, показанных на рис. 2, а.

Образец № 9 (а)	B	C	O	Al	Всего, ат. %	Приблизительная стехиометрия
S01	82,3	16,6		1,1	100,0	Al _{0,13} B _{9,9} C ₂
S02	84,0	14,9		1,1	100,0	Al _{0,15} B _{11,3} C ₂
S03	84,1	14,7		1,2	100,0	Al _{0,16} B _{11,4} C ₂
Среднее						Al_{0,15}B₁₁C₂
S04	10,5		56,1	33,4	100,0	Al ₂ O _{3,35} B _{0,63}
S05	22,3		49,7	28,0	100,0	Al ₂ O _{3,55} B _{1,6}
S06	26,8		47,8	25,4	100,0	Al ₂ O _{3,76} B _{2,1}
S07	13,6		54,7	31,7	100,0	Al ₂ O _{3,45} B _{0,86}
S08	12,8		55,4	31,8	100,0	Al ₂ O _{3,48} B _{0,81}
S09	12,5		55,3	32,1	99,9	Al ₂ O _{3,45} B _{0,79}
Среднее						Al₂O_{3,5}B_{1,1}

Таблица 4 – Результаты микронзондового анализа в точках, показанных на рис. 2, б.

Образец № 10 (б)	B	C	N	O	Al	Ti	Zr	W	Всего, ат. %	Приближительная стехиометрия
S01	74,0	25,2	–	–	0,8	–	–	–	100,0	Al _{0,06} B _{5,9} C ₂
S02	84,2	15,0	–	–	0,8	–	–	–	100,0	Al _{0,11} B _{11,2} C ₂
S03	80,7	18,6	–	–	0,8	–	–	–	100,1	Al _{0,09} B _{8,7} C ₂
Среднее										Al_{0,09}B_{8,6}C₂
S04	11,4	–	4,1	52,9	31,6	–	–	–	100,0	Al ₂ O _{3,36} B _{0,71} N _{0,26}
S05	25,3	–	3,6	44,8	26,3	–	–	–	100,0	Al ₂ O _{3,41} B _{1,9} N _{0,27}
S06	34,0	–	4,3	39,9	21,8	–	–	–	100,0	Al ₂ O _{3,66} B _{3,1} N _{0,4}
Среднее										Al₂O_{3,5}B_{1,9}N_{0,3}
S07	74,9	–	–	–	0,5	17,6	4,6	2,4	100,0	случайная примесь
S08	65,5	–	–	–	0,6	21,6	8,7	3,6	100,0	случайная примесь
S09	79,1	–	–	–	0,7	12,6	5,5	2,2	100,1	случайная примесь

Таблица 5 – Результаты микронзондового анализа в точках, показанных на рис. 3.

Образец № 6	B	C	N	O	Al	Ti	Всего, ат. %	Приближительная стехиометрия
S01	68,6	28,5	–	–	2,9	–	100	Al _{0,2} B _{4,8} C ₂ (Al _{0,5} B ₁₂ C ₅)
S02	60,9	31,8	3,7	1,4	2,2	–	100	Al _{0,14} B _{3,83} C ₂ N _{0,19} O _{0,1}
S03	51,5	40,6	2,9	2,7	2,3	–	100	Al _{0,16} B _{2,54} C ₂ N _{0,14} O _{0,11}
S04	68,8	25	4,4	–	1,8	–	100	Al _{0,14} B _{5,5} C ₂ N _{0,35}
S05	69	24,3	4,7	–	2	–	100	Al _{0,16} B _{5,68} C ₂ N _{0,39}
S06	67,2	27,3	2,4	0,4	2,8	–	100,1	Al _{0,21} B _{4,92} C ₂ N _{0,18} O _{0,03}
Среднее								Al_{0,17}B_{4,55}C₂O_{0,04}N_{0,21}
S07	58,4	19	–	–	0,5	22,1	100	TiB _{2,64} C _{0,9} Al _{0,02}
S08	56,7	20,7	–	–	0,7	22	100,1	TiB _{2,57} C _{0,94} Al _{0,03}
S09	61,5	13,7	–	–	0,5	24,3	100	TiB _{2,53} C _{0,56} Al _{0,02}
Среднее							TiB_{2,58}C_{0,8}Al_{0,02}	
S10	16,6	7	1,8	48,4	26,3	–	100,1	Al ₂ O _{3,68} B _{1,26} C _{0,53} N _{0,14}
S11	30,1	11,5	–	39,1	19,3	–	100	Al ₂ O _{4,05} B _{3,12} C _{1,2}
S12	21,7	7,9	–	45,4	24,9	–	99,9	Al ₂ O _{3,65} B _{1,74} C _{0,64}
Среднее								Al₂O_{3,79}B_{2,04}C_{0,8}

Таблица 6 – Механические свойства материалов на основе α-AlB₁₂: твердость по Виккерсу, H_V, при разных нагрузках, трещиностойкость K_{1c}, определенная индентированием и методом трехточечного изгиба балки с надрезом, предел прочности при изгибе, R_{изг}, и сжатии, R_{сж}. (Нумерация образцов такая же, как и в табл. 2).

№ образца	H _V , ГПа, под нагрузкой		K _{1c} , Мпа м ^{0,5}		R _{изг} , МПа	R _{сж} , МПа
	P = 4,9 Н	P = 49 Н	P = 49 Н	3–х точечный изгиб		
1	30,6±4,5	22,3±1,3	2,7±0,6	–	–	–
3	–	22,6±0,8	4,9±0,3	3,67±1,2	336	378
4	21,4±4,9	24,1±0,5	4,2±0,5	–	285	–
5	–	23,6±2,8	5,9±1,4	–	310	423
6	–	28,9±1,9	5,2±1,5	4,27±0,8	633	639
7	–	13,6±0,5	3,6±1,6	–	–	–
8	–	16,0±1,2	–	–	–	–
9	–	27,9±0,5	3,4±0,9	3,36±0,9	311	1461
10	–	25,3±0,7	4,2±1,3	6,95*	289	–
11	–	26,6±0,7	5,9±0,5	–	–	–
12	–	24,6±0,5	–	3,4	408	–
13	–	–	–	4,72	392	1551

* был испытан один образец.

Выводы. В статье представлены результаты исследований спекания субмикронного порошка AlB₁₂C₂ и синтеза керамики на основе AlB₁₂C₂ из субмикронного порошка α-AlB₁₂ с добавками C и TiC методом горячего прессования при 30 МПа, а также, для сравнения, в условиях квазиизостатического прессования при 2 ГПа.

Материал, спеченный при температуре 1950 °C из порошка AlB₁₂C₂, который согласно рентгенофазового анализа содержал около 100 % фазы AlB₁₂C₂, имел плотность ρ = 2,57 г/см³, трещиностойкость K_{1c}

(49 Н) = 3,4 МПа м^{0,5}, твердость H_V (49 Н) = 27,9 ГПа, прочность при изгибе R_{изг} = 311 МПа и сжатии R_{сж} = 1461 МПа. Но исследования с помощью SEM показали, что данный материал состоял из двух фаз, приближительная стехиометрия которых была Al_{0,15}B₁₁C₂ (матричная фаза) и Al₂O_{3,5}B_{1,1} (включения). Материал, синтезированный при 1950 °C из α-AlB₁₂ с добавлением 20 мас. % TiC в соответствии с рентгенофазовым анализом содержал 74 мас. % AlB₁₂C₂, 22 мас. % TiB₂, 4 мас. % Al₂O₃, имел твердость H_V (49 Н) = 28,9 ГПа, характеризовался трещиностой-

костью K_{1c} (49 Н) = 5,2 МПа \cdot м^{0,5}, напряжением при изгибе $R_{изг}$ = 633 МПа и сжатии $R_{сж}$ = 640 МПа, при этом его удельный вес был несколько выше ρ = 3,2 г/см³. Добавка 17 мас. % С к порошку α -AlB₁₂ способствовала образованию композиционного материала, состоящего из 86 мас. % AlB₁₂C₂ и 14 мас. % AlN, с плотностью ρ = 2,7 г/см³, имевшего трещиностойкость K_{1c} (49 Н) = 5,9 МПа \cdot м^{0,5}, прочность при изгибе $R_{изг}$ = 423 МПа и сжатии $R_{сж}$ = 310 МПа. Материал, спеченный из порошка α -AlB₁₂ при 30 МПа, 2080-1950 °С, который мы привели для сравнения, содержащий 94–98 мас. % фазы α -AlB₁₂ (ρ = 2,58 г/см³), демонстрировал твердость HV (49 Н) = 24,1 ГПа, трещиностойкость K_{1c} (49 Н) = 4,9 МПа \cdot м^{0,5}, и прочность $R_{изг}$ = 336 МПа и $R_{сж}$ = 378 МПа.

Результаты рентгенофазового анализа и исследований структуры с помощью SEM-микроскопии показали, что основная матричная фаза материалов на основе AlB₁₂C₂ (с высокими механическими характеристиками, спеченных при 1950 °С, 30 МПа) имеет существенный дефицит Al и небольшой дефицит B, а в фазе со структурой Al₂O₃ присутствует довольно большое количество бора. Увеличение количества фазы со структурой Al₂O₃, содержащей бор, способствовало повышению трещиностойкости материала.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта программы безопасности НАТО: NATO Science for Peace SPS 985070 "New Shock-Resisting Ceramics: Computer Modelling, Fabrication, Testing".

Список литературы:

1. Кислый, П. С. Бориды алюминия [Текст] / П. С. Кислый, В. А. Неронов, Т. А. Прихна, Ю. В. Бевза. – Киев: Наукова Думка, 1990. – 190 с.
2. Synthesis, characterization and energetic performance of metal boride compounds for insensitive energetic materials [Electronic resource]. – Available at: <http://cdmbuntu.lib.utah.edu/utis/getfile/collection/etd3/id/2012/filename/1951.pdf>
3. Kisly, P. S. Properties of high-temperature solution-grown aluminum borides [Text] / P. S. Kisly, T. A. Prikhna, L. S. Golubyak, J. Less // Common Met. – 1986. – № 117 (1-2). – P. 349–353. doi: [10.1016/0022-5088\(86\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0022-5088(86)90059-7)
4. Дуб, С. Н. Механические свойства кристаллов соединений системы Al-B-C [Текст] / С. Н. Дуб, Т. А. Прихна, О. Н. Ильницкая // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 6. – С. 12–18.
5. Krochuk, V. M. Peculiarities of morphology of AlC₄B₂₄ and Al₃C₂B₄₈ crystals [Text] / V. M. Krochuk, T. A. Prikhna, V. S. Melnikov, P. S. Kisly // Doklady Akademii Nayk UkrSSR. Series "B", Geological, Chemical and Biological Sciences. – 1987. – P. 10–11.
6. Kisly, P. S. Structure and properties of monocrystals of the Al-B-C system [Text] / P. S. Kisly, T. A. Prikhna, A. Gr. Gontar, O. V. Podarevskaya // Proceedings of the 9th International Symposium on Boron, Borides and Related Compounds. – 1987. – P. 273–274.
7. Prikhna, T. A. IR-spectroscopy and EPR of single crystals of the Al-B-C system [Text] / T. A. Prikhna, T. A. Nachalnaya, V. G. Malogolovets // Superhard Materials. – 1988. – № 5. – P. 24–27.
8. Prikhna, T. A. Interactions of Al₃C₂B₄₈ (β -AlB₁₂) with copper and copper-based compounds [Text] / T. A. Prikhna, V. V. Kovylyayev, S. N. Dub // Adhesion of Melts and Soldering of Materials. – 1988. – № 21.
9. Крочук, В. М. Морфология и двойники в α - и γ -AlB₁₂ [Текст] / В. М. Крочук, В. С. Мельников, Т. А. Прихна, П. С. Кислый // Сверхтвердые материалы. – 1989. – № 1. – С. 21–24.
10. Prikhna, T. A. Aluminium borides and carboborides [Text] / T. A. Prikhna, P. S. Kisly // AIP Conference Proceedings. – 1991. – № 231 (1). – P. 590–593. doi: [10.1063/1.40887](https://doi.org/10.1063/1.40887)
11. Koroglu, A. (2012). In vacuo production of α -AlB₁₂, C₄AlB₂₄, AlB₁₂C₂ and Al₃B₄₈C₂ powders [Text] / A. Koroglu, D. P. Thompson // Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – № 32 (12). – P. 3501–3507. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.032](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.032)
12. Choi, S. (2013). Synthesis of AlB₁₂ and YB₆₆ Nanoparticles by RF Thermal Plasmas [Text] / S. Choi, J. Matsuo, Watanabe T. // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – № 441. – P. 012030. doi: [10.1088/1742-6596/441/1/012030](https://doi.org/10.1088/1742-6596/441/1/012030)
13. Torabi, O. Sintering behavior of Al/B₄C–AlB₁₂–Al₂O₃ nanostructure composite synthesized by in situ processing method [Text] / O. Torabi, R. Ebrahimi-Kahrizangi // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – № 22 (5). – P. 1405–1411. doi: [10.1007/s11665-012-0404-z](https://doi.org/10.1007/s11665-012-0404-z)
14. Domnich, V. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress [Text] / V. Domnich, S. Reynaud, R. A. Haber, M. Chhowalla // Journal of the American Ceramic Society. – 2011. – № 94 (11). – P. 3605–3628. doi: [10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x)

Bibliography (transliterated):

1. Kislyj, P. S., Neronov, V. A., Prikhna, T. A., Bevza, Ju. V. (1990). Boridy aljuminija. Kiev: Naukova Dumka, 190.
2. Synthesis, characterization and energetic performance of metal boride compounds for insensitive energetic materials. Available at: <http://cdmbuntu.lib.utah.edu/utis/getfile/collection/etd3/id/2012/filename/1951.pdf>
3. Kisly, P. S., Prikhna, T. A., Golubyak, L. S. (1986). Properties of high-temperature solution-grown aluminium borides. Journal of the Less Common Metals, 117 (1-2), 349–353. doi: [10.1016/0022-5088\(86\)90059-7](https://doi.org/10.1016/0022-5088(86)90059-7)
4. Dub, S. N., Prikhna, T. A., Il'nickaja, O. N. (1986). Mehanicheskie svojstva kristallov soedinenij sistema Al-B-C. Sverhtverdye materialy, 6, 12–18.
5. Krochuk, V. M., Prikhna, T. A., Melnikov, V. S., Kisly, P. S. (1987). Peculiarities of morphology of AlC₄B₂₄ and Al₃C₂B₄₈ crystals. Doklady Akademii Nayk UkrSSR. Series "B", Geological, Chemical and Biological Sciences, 10–11.
6. Kisly, P. S., Prikhna, T. A., Gontar, A. Gr., Podarevskaya, O. V. (1987). Structure and properties of monocrystals of the Al-B-C system. Proceedings of the 9th International Symposium on Boron, Borides and Related Compounds, 273–274.
7. Prikhna, T. A., Nachalnaya, T. A., Malogolovets, V. G. (1988). IR-spectroscopy and EPR of single crystals of the Al-B-C system. Superhard Materials, 5, 24–27.
8. Prikhna, T. A., Kovylyayev, V. V., Dub, S. N. (1988). Interactions of Al₃C₂B₄₈ (β -AlB₁₂) with copper and copper-based compounds. Adhesion of Melts and Soldering of Materials, 21.
9. Krochuk, V. M., Mel'nikov, V. S., Prikhna, T. A., Kislyj, P. S. (1989). Morfologija i dvojniki v α - i γ -AlB₁₂. Sverhtverdye materialy, 1, 21–24.
10. Prikhna, T. A., Kisly, P. S. (1991). Aluminium borides and carboborides. AIP Conference Proceedings, 231 (1), 590–593. doi: [10.1063/1.40887](https://doi.org/10.1063/1.40887)
11. Koroglu, A., Thompson, D. P. (2012). In vacuo production of α -AlB₁₂, C₄AlB₂₄, AlB₁₂C₂ and Al₃B₄₈C₂ powders. Journal of the European Ceramic Society, 32 (12), 3501–3507. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.032](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.04.032)
12. Choi, S., Matsuo, J., Watanabe, T. (2013). Synthesis of AlB₁₂ and YB₆₆ Nanoparticles by RF Thermal Plasmas. Journal of Physics: Conference Series, 441, 012030. doi: [10.1088/1742-6596/441/1/012030](https://doi.org/10.1088/1742-6596/441/1/012030)
13. Torabi, O., Ebrahimi-Kahrizangi, R. (2012). Sintering Behavior of Al/B₄C–AlB₁₂–Al₂O₃ Nanostructure Composite Synthesized by In Situ Processing Method. Journal of Materials Engineering and Performance, 22 (5), 1405–1411. doi: [10.1007/s11665-012-0404-z](https://doi.org/10.1007/s11665-012-0404-z)
14. Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A., Chhowalla, M. (2011). Boron Carbide: Structure, Properties, and Stability under Stress. Journal of the American Ceramic Society, 94 (11), 3605–3628. doi: [10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04865.x)

Поступила (received) 02. 11. 2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Структура і властивості матеріалів на основі $\text{AlB}_{12}\text{C}_2$ П. П. Барвіцький, Т. О. Пріхна, В. Б. Сverdun, В. Є. Моциль, С. М. Дуб, М. В. Карпець, В. Б. Муратов, О. О. Васильєв// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.14–22. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Синтез, спекание, структура и свойства материалов на основе $\text{AlB}_{12}\text{C}_2$ П. П. Барвицкий, Т. А. Прихна, В. Б. Сverdun, В. Е. Моциль, С. Н. Дуб, М. В. Карпец, В. Б. Муратов, А. А. Васильев// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.14–22. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Structure and properties of $\text{AlB}_{12}\text{C}_2$ -based materials/ P. Barvitskiy, T. Prikhna, V. Sverdun, V. Moshchil, S. Dub, M. Karpets, V. Muratov, O. Vasiliev//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P. 14–22. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барвіцький Павло Петрович – аспірант, Відділ технологій високих тисків, функціональних керамічних композитів і дисперсних надтвердих матеріалів, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ, вул. Автозаводська, 2, г. Київ, Україна, 04074; e-mail: barvitskp@gmail.com.

Пріхна Тетяна Олексіївна – доктор технічних наук, чл.-кор НАНУ, професор, зав. Відділу технологій високих тисків, функціональних керамічних композитів і дисперсних надтвердих матеріалів, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ, вул. Автозаводська, 2, г. Київ, Україна, 04074; e-mail: prikhna@mail.ru.

Сverdun Володимир Богданович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Відділ технологій високих тисків, функціональних керамічних композитів і дисперсних надтвердих матеріалів, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ, вул. Автозаводська, 2, г. Київ, Україна, 04074; e-mail: sverdun@mail.ru.

Моциль Віктор Євгенович – науковий співробітник, Відділ технологій високих тисків, функціональних керамічних композитів і дисперсних надтвердих матеріалів, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ, вул. Автозаводська, 2, г. Київ, Україна, 04074, e-mail: sverdun@mail.ru.

Дуб Сергій Миколайович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Відділ фізико-механічних досліджень і нанотестування матеріалів, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ, вул. Автозаводська, 2, г. Київ, Україна, 04074; e-mail: lz@ism.kiev.ua.

Карпець Мирослав Васильович – доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник, Відділ структурної хімії твердого тіла, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, вул. Кржижановського, 3, г. Київ, Україна, 03680; e-mail: mkarpets@ukr.net.

Муратов Валерій Борисович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Відділ тонкого неорганічного синтезу, термодинаміки і кінетики гетерофазних процесів, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, вул. Кржижановського, 3, г. Київ, Україна, 03680; e-mail: v.b.muratov@gmail.com.

Васильєв Олександр Олексійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Відділ тонкого неорганічного синтезу, термодинаміки і кінетики гетерофазних процесів, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, вул. Кржижановського, 3, г. Київ, Україна, 03680; e-mail: vasalexandr@gmail.com.

Барвицкий Павел Петрович – аспірант, Отдел технологий высоких давлений, функциональных керамических композитов и дисперсных сверхтвердых материалов, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ, ул. Автозаводская, 2, г. Киев, Украина, 04074; e-mail: barvitskp@gmail.com.

Прихна Татьяна Алексеевна – доктор технических наук, чл.-кор НАНУ, профессор, зав. Отдела технологий высоких давлений, функциональных керамических композитов и дисперсных сверхтвердых материалов, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ, ул. Автозаводская, 2, г. Киев, Украина, 04074; e-mail: prikhna@mail.ru.

Сverdun Владимир Богданович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Отдел технологий высоких давлений, функциональных керамических композитов и дисперсных сверхтвердых материалов, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ, ул. Автозаводская, 2, г. Киев, Украина, 04074; e-mail: sverdun@mail.ru.

Моциль Виктор Евгеньевич – научный сотрудник, Отдел технологий высоких давлений, функциональных керамических композитов и дисперсных сверхтвердых материалов, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ, ул. Автозаводская, 2, г. Киев, Украина, 04074; e-mail: vik_ism@ukr.net.

Дуб Сергей Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Отдел физико-механических исследований и нанотестирования материалов, Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ, ул. Автозаводская, 2, г. Киев, Украина, 04074; e-mail: lz@ism.kiev.ua.

Карпец Мирослав Васильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Отдел структурной химии твердого тела, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, ул. Кржижановского, 3, г. Киев, Украина, 03680; e-mail: mkarpets@ukr.net.

Муратов Валерий Борисович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Отдел тонкого неорганического синтеза, термодинамики и кинетики гетерофазных процессов, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, ул. Кржижановского, 3, г. Киев, Украина, 03680

Васильев Александр Алексеевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Отдел тонкого неорганического синтеза, термодинамики и кинетики гетерофазных процессов, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, ул. Кржижановского, 3, г. Киев, Украина, 03680; e-mail: vasalexandr@gmail.com.

Barvitskiy Pavlo – PhD-student, Department of Promising technologies of superhigh pressures, dispersed materials and sintering of ceramics, V. Bakul Institute for Superhard Materials of NASU; Avtozavodskaya str., 2, Kyiv, Ukraine, 04074; e-mail: barvitskp@gmail.com.

Prikhna Tatiana – Doctor of technical sciences, Corresponding member of the NASU, Professor, Head of the Department of Technologies of High Pressures, Functional Ceramic Composites and Dispersed Superhard Materials, V. Bakul Institute for Superhard Materials of NASU; Avtozavodskaya str., 2, Kyiv, Ukraine, 04074; e-mail: prikhna@mail.ru.

Sverdun Vladimir – PhD, senior researcher, Department of Technologies of High Pressures, Functional Ceramic Composites and Dispersed Superhard Materials, V. Bakul Institute for Superhard Materials of NASU; Avtozavodskaya str., 2, Kyiv, Ukraine, 04074, e-mail: sverdun@mail.ru.

Moshchil Victor – researcher, Department of Technologies of High Pressures, Functional Ceramic Composites and Dispersed Superhard Materials, V. Bakul Institute for Superhard Materials of NASU; Avtozavodskaya str., 2, Kyiv, Ukraine, 04074; e-mail: vik_ism@ukr.net.

Dub Sergiy – doctor of technical sciences, leading researcher, Department of physical-mechanical research and materials nano-testing, V. Bakul Institute for Superhard Materials of NASU; Avtozavodskaya str., 2, Kyiv, Ukraine, 04074; iz@ism.kiev.ua.

Karpets Miroslav – doctor of physical and mathematical sciences, leading researcher, Department of structural chemistry of solid state, Institute for Problems in Material Science of NASU; Ukraine, Krzhizhanovsky str., 3, Kyiv, Ukraine, 03680; e-mail: mkarpets@ukr.net.

Muratov Valeriy – PhD, senior researcher, Department of fine inorganic synthesis, thermodynamics and kinetics of heterophase processes, Institute for Problems in Material Science of NASU; Krzhizhanovsky str., 3, Kyiv, Ukraine, 03680; v.b.muratov@gmail.com.

Vasiliev Olexandr – PhD, senior researcher, Department of fine inorganic synthesis, thermodynamics and kinetics of heterophase processes, Institute for Problems in Material Science of NASU; Krzhizhanovsky str., 3, Kyiv, Ukraine,

УДК 006.91:004.942

І. В. ПРОКОПОВИЧ, М. О. ДУХАНИНА, І. І. СТАНОВСЬКА, Х. ВАЛІД ШЕР, В. В. ДОБРОВОЛЬСЬКА, О. В. ТОРОПЕНКО

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЩІЛЬНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ МАТЕРІАЛІВ

Важливим етапом виготовлення гетерогенних матеріалів із суттєвою різницею властивостей окремих компонентів, на якому закладається якість майбутніх виробів, є заповнення рідкою частиною суміші формообразуючої оснастки. Пряме вимірювання щільності виробів кінце необхідне як в системах управління процесом заповнення, так і при технічному контролі. Запропоновано та практично реалізований ємнісний метод вимірювання щільності матеріалів подібного типу.

Ключові слова: гетерогенні матеріали, заповнення оснастки, контроль якості, вимірювання щільності, ємнісний метод.

Важным этапом изготовления гетерогенных материалов с существенной разницей свойств отдельных компонентов, на котором закладывается качество будущих изделий, является заполнение жидкой частью смеси формообразующей оснастки. Прямое измерение плотности изделий крайне необходимо как в системах управления процессом заполнения, так и при техническом контроле. Предложен и практически реализован емкостный метод измерения плотности материалов подобного типа.

Ключевые слова: гетерогенные материалы, заполнение оснастки, контроль качества, измерение плотности, емкостный метод.

An important step in the manufacture of heterogeneous materials with a significant difference of properties of the individual components, which includes the quality of future products, is to fill the liquid part of the mix snap which forms form. Direct density measurement products are extremely necessary as in the management systems process for filling and inspection. Proposed and practically implemented by a capacitive method of measuring the density of materials of this type.

The aim of this work is to improve the quality of production and reduce the percentage of defective products in the manufacture of centrifuged reinforced concrete cylindrical pillars for the supports of high-voltage power lines through the development and implementation of metrological provision for density control of concrete parts such stands electro-capacitive method.

To achieve this goal in the work were put forward and decisions related to the following tasks: the theoretical basis for the capacitive measurement of the density of concrete tubular concrete structures created by measuring the density of the concrete has developed a system of quality control, performed practical testing of research results with positive technical and economic effect.

Keywords: heterogeneous materials, equipment filling, quality control, density measurement, capacitive method.

© І. В. Прокопович, М. О. Духаніна, І. І. Становська, Х. Валід шер, В. В. Добровольська, О. В. Торопенко. 2016

Вступ. Значна кількість продукції сучасних підприємств отримується затвердінням із рідкого (пластмаси) або псевдо рідкого (ливарні форми, бетонні виробы, синтегран) стану. Основним етапом таких технологій є заповнення формуютьорючої оснастки відповідною сумішшю. На цьому етапі створюється не тільки конфігурація та властивості майбутнього виробу, але й закладаються передумови майбутньої якості останнього: щільність, рівномірність розподілу компонентів, наявність або відсутність раковин або макропорожнин і т.п., що потребує від технолога постійного моніторингу за плином заповнення.

Особливо актуальним виглядає такий моніторинг, коли в тілі виробу наявна будь-яка арматура: пруты, пластини, решітки, тощо. Адже вони встановлюються в оснастку до заливання і суттєво йому перешкоджають.

Контролювати процес заливання в цьому випадку особливо важко, особливо тоді, коли в якості, наприклад, залізобетонного виробу виступає великогабаритна опора ЛЕП, гребля ГЕС та інші, габарити яких сягають десятків та сотень метрів. В таких випадках руйнівний контроль готових виробів неприпустимий, а відповідальність за стан залізобетонної продукції дуже висока.

Аналітичний огляд. Після виготовлення арматури та її контролю подальший результат технологічного процесу залежить виключно від якості заповнення оснастки бетоном сумішшю та твердіння останньої. Найголовніший контролюємі параметр, від якого залежать, насамперед, механічні властивості опори, – це щільність бетону в виробі [1, 2].

Проаналізуємо проблему на прикладі технологічного процесу виготовлення залізобетонних опор ЛЕП. Для початку такого аналізу достатньо подивитися, як виглядає готова арматура перед її укладанням в формуютьорючу оснастку (рис. 1).



Рис. 1 – Металева арматура перед заповненням бетоном сумішшю

Зовнішній діаметр такої «клітки» дорівнює приблизно 0,7 м, а густина її решітки може стати на заваді заповнення оснастки бетоном, навіть з урахуванням додаткових до гравітації відцентрових сил.

Безпосереднє вимірювання щільності під час обертання важко здійснювати навіть сучасними методами [3, 4]. Це пов'язано також із тим, що в початковій бетонній суміші присутня вода – електричний провідник, яка може суттєво і непередбачувано впли-

вати на показання приладу, який вимірює електричні характеристики [5].

Найбільш перспективним на перший погляд виглядає ємнісний метод вимірювання, заснований на однозначній відповідності між щільністю матеріалу та його ємністю [6].

Для геометрично ідеальних випадків ємність плоского конденсатора може бути розрахована за формулою [7]:

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{l}, \quad (1)$$

ємність циліндричного конденсатора:

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{L}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (2)$$

ємність сферичного конденсатора:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}, \quad (3)$$

де C – ємність конденсатора, $\Phi; \epsilon$ – відносна діелектрична проникність; ϵ_0 – електрична постійна, $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$; S – площа однієї обкладки, м^2 ; l – відстань між обкладками, м ; L – довжина циліндра, м ; R_1, R_2 – радіуси, відповідно внутрішній та зовнішній, м .

Для конкретного плоского конденсатора значення величини S і l суть постійні, і має місце однозначна залежність між ємністю і діелектричною проникністю простору між його обкладками. Якщо матеріал, що заповнює простір, неоднорідний і являє собою багатозфазну систему, то значення ϵ буде залежати від діелектричної проникності всіх фаз і процентного (масового) їх співвідношення [8].

Якщо в якості заповнювача проміжку між пластинами конденсатора розглядати бетон, сумарна діелектрична проникність останнього буде визначатися проникністю повітря пор і порожнин, зв'язуючого цементу, наповнювальних піску та гравію (тобто величинами постійними в межах даного експерименту) і співвідношенням мас перерахованих компонентів, тобто, в кінцевому підсумку, щільністю даної ділянки виробу.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення якості виробництва та зменшення відсотку бракованих виробів при виготовленні циліндричних залізобетонних центрифугованих стійок для опор високовольтних ліній електропередач шляхом розробки та впровадження метрологічного забезпечення для контролю щільності бетонної частини таких стійок електроємнісним методом.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі: розроблені теоретичні основи ємнісного вимірювання щільності бетону в залізобетонних трубчастих конструкціях, створено стенд для вимірювання щільності бетону, розроблено систему контролю якості продукції, виконані практичні випробування результатів дослідження з позитивним техніко-економічним ефектом.

Розробка теоретичних основ ємнісного вимірювання щільності залізобетону трубчастих конструкцій. Систематичний виробничий контроль щільності бетонної частини залізобетонних виробів ускладнений через відсутність ефективних методів такого контролю без руйнування виробу. Нагадаємо, що довжина опор ЛЕП сягає 20 метрів при діаметрі 0,8 м!

Метод, запропонований в даній роботі, полягає у безпосередньому вимірюванні електричної ємності конденсатора, одна з обкладок якого є поверхня арматури виробу (рис. 1), а друга – поверхню рухомої частини стенду для вимірювання ємності. Такий підхід дозволяє забезпечити відносно стабільні геометричні параметри конденсатора і високу точність вимірювань.

Для тарування вимірювального приладу безпосередньо в розмірності щільності (кг/м³) для конкретних сумішей і конкретних умов вимірювання була виготовлена калібрувальна установка, яка складалася з конденсатора з параметрами: $S = 0,01 \text{ м}^2$; $l = 0,08 \text{ м}$; та вимірювача прецизійного LCR-821; діапазон вимірювання ємності: 0,00001 пФ – 99999 мкФ (рис. 2).

Місткість такої установки складається з вхідної ємності вимірювального приладу $C_{вх}$, ємності сполучних проводів $C_{пр}$ і власне ємності плоского каліброваного конденсатора $C_{к}$:

$$C_y = C_{вх} + C_{пр} + C_{к}. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Залежність ємності конденсатора від щільності зразка

№№ зразка	Параметри зразка		Значення параметрів	
	m , кг	d_s , кг/м ³	$C_k \times 10^{12}$, Ф	ϵ
Повітря	–	–	2,21	1,00059
1	1,6224	2028	5,54	2,50831
2	1,6448	2056	5,57	2,52274
3	1,6584	2073	5,77	2,61410
4	1,6736	2092	5,83	2,64134
5	1,6808	2101	5,84	2,64535
6	1,7384	2173	5,9	2,67099
7	1,7552	2194	5,97	2,70465
8	1,7768	2221	6,00	2,71747
9	1,7968	2246	6,05	2,74071
10	1,8200	2275	6,06	2,74710
11	1,8344	2293	6,07	2,74873
12	1,8424	2303	6,11	2,76556
13	1,8664	2333	6,17	2,79360
14	1,9000	2375	6,21	2,81204
15	1,9184	2398	6,27	2,83768
16	1,9496	2437	6,33	2,86493
17	1,9712	2464	6,38	2,88656
18	1,9888	2486	6,43	2,90980
19	2,0136	2517	6,53	2,95548
20	2,0288	2536	6,68	3,02360

Обробка отриманих даних з урахуванням конкретних розмірів калібрувального конденсатора дозволила отримати вираз для обчислювати середню щільність досліджуваного фрагмента бетону, якщо відома ємність конденсатора C , а також площа його обкладок S та відстань між ними l .

$$d = 93 \cdot 10^{12} C l S^{-1} - 774. \quad (5)$$

Достовірність формули підтверджується практичним збігом значень C для випадків розрахунку за формулою (5) при підстановці $d = 0$, $S = 0,01$; $l = 0,02$;



Рис. 2 – Вимірювач RLC прецизійний LCR-821 GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD

Значення $C_{вх}$ і $C_{пр}$ є постійними для конкретного дослідження і визначаються безпосереднім вимірюванням при відключеному конденсаторі. Перед проведенням обчислень величину $C_{вх} + C_{пр}$ віднімали від виміряного значення C_y .

В табл. 1 представлені значення щільності отриманих зразків і обчислені за формулою (4) ємності каліброваного конденсатора, в якому при вимірюванні зразки виконували роль діелектрика.

розрахунком за формулою (4) при підстановці діелектричної проникності повітря $\epsilon_n=1,00059$ і безпосереднім вимірюванням на калібрувальній установці при відсутності між обкладками зразка (табл. 2).

Оцінку похибки вимірювання за рахунок порушення конфігурації конденсатора здійснювали окремо за двома параметрами взаємного розташування обкладок.

Відсоток помилки при неточності в установці відстані між обкладками l на величину Δl визначали за формулою:

$$\frac{\Delta C}{C}(\%) = \frac{100\Delta l}{l + \Delta l}, \quad (6)$$

а відсоток помилки вимірювання від взаємної непаралельності обкладок за формулою:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C}(\%) &= 100 \left(1 - \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{l + x \operatorname{tg} \alpha} \right) = \\ &= 100 \left(1 - \frac{l \operatorname{ctg} \alpha}{r} \ln \frac{2l + r \operatorname{tg} \alpha}{2l - r \operatorname{tg} \alpha} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

де: r – розмір обкладки в площині перекосу; α – кут між обкладками.

Таблиця 2 – Помилки вимірювання ємності різними методами

Умова визначення	За формулою (4)	За формулою (5)	Безпосереднє вимірювання
Значення C, Φ	$2.217 \cdot 10^{-12}$	$2.199 \cdot 10^{-12}$	$2.21 \cdot 10^{-12}$
% помилки	–	0.81	0.03

Розраховані за формулами (6) та (7) похибки при стандартних допусках на розмір H і кут α навіть по шостого класу точності не перевищують 2–3%.

На жаль, конфігурація реальних обкладок в конденсаторі, створеному на тлі поверхонь внутрішньої арматури, дуже далека від площини, циліндру або сфери (рис. 1). Тому розглянемо обидві його обкладки як деякі криволінійні поверхні, описані функціями вигляду $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$ та $y_2(x_1^{k3}, x_2^{k4})$, причому, жодна степінь при аргументах не дорівнює одиниці. Прикладом таких поверхонь можуть служити криволінійні фігури, наведені на рис. 3.

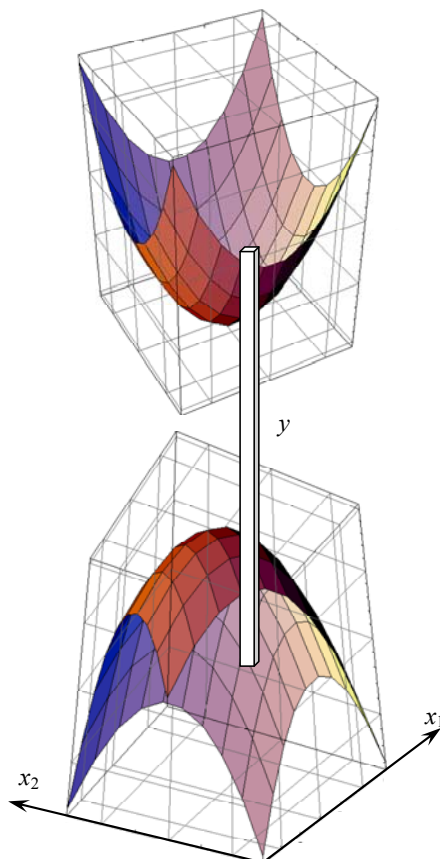


Рис. 3 – Схема до розрахунку електричної ємності між двома криволінійними поверхнями

Хай поверхні $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$ та $y_2(x_1^{k3}, x_2^{k4})$, ємність між якими обчислюється, описуються виразами:

$$\begin{cases} y_1 = x_1^2 + x_2^2; \\ y_2 = -x_1^2 - x_2^2 \end{cases} \quad (8)$$

при обмеженнях:

$$x_{1\min} \leq x_1 \leq x_{1\max}; \quad (9)$$

$$x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max}. \quad (10)$$

Тоді ємність між цими поверхнями в межах (9) та (10) можна приблизно обчислити як суму ємностей окремих конденсаторів (паралелепіпед на рис. 3). Спрямовуючи розміри x_1 та x_2 цього паралелепіпеда до нуля, отримуємо за допомогою подвійного інтегрування:

$$\begin{aligned} C &= \varepsilon \varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{dx_1 dx_2}{|f_1(x_1 x_2) - f_2(x_1 x_2)|} = \\ &= \varepsilon \varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2) - (-x_1^2 - x_2^2)} dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 \int_{x_{1\min}}^{x_{1\max}} \int_{x_{2\min}}^{x_{2\max}} \frac{1}{(x_1^2 + x_2^2)} dx_1 dx_2, \end{aligned} \quad (11)$$

виходячи з того, що останній подвійний інтеграл в (11) може бути обчислений за допомогою табличного [9, 10]:

$$\int \frac{du}{a^2 + u^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{u}{a} + c. \quad (12)$$

Розробка стенда для вимірювання щільності залізобетону. На жаль, вираз (11), та ще й з врахуванням складностей, які випливають з його розв'язання за допомогою (12) та згаданої вище відмінності поверхні арматури від будь якої функції виду $y_1(x_1^{k1}, x_2^{k2})$, не може бути застосований для розрахунків залежності «ємність – щільність» на кшталт виразу (5). Тому в роботі було зроблено акцент на експериментальному виявленні меж ємності, які відповідає поняттю «якість». Для цього було розроблено та створено спеціальний стенд для вимірювання щільності бетону у великому залізобетонному виробі циліндричної форми (рис. 4).

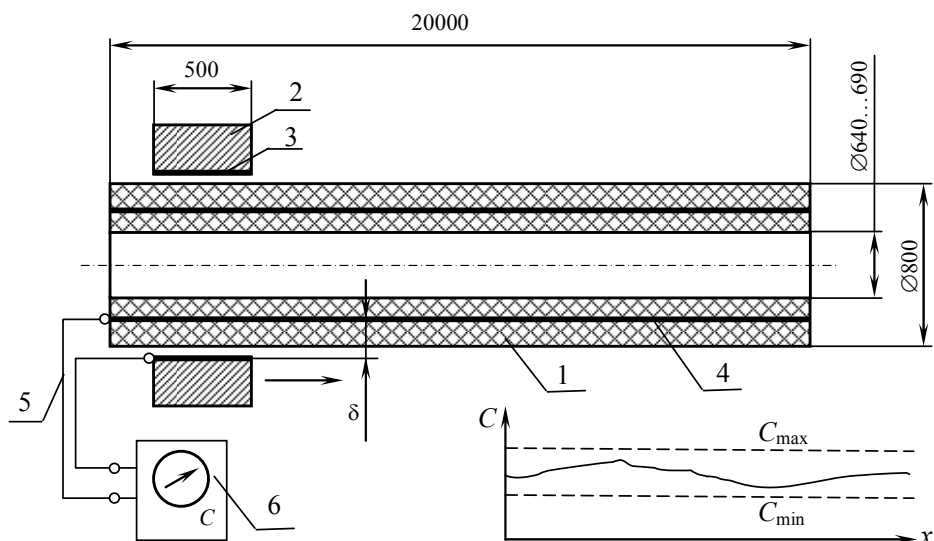


Рис. 4 – Схема стенда для вимірювання щільності бетону у великому залізобетонному виробі циліндричної форми

Залізобетонна опора 1 розташовується на столі стенду. Вздовж опори співосно рухається пластмасове кільце 2, внутрішня поверхня якого вкрита шаром металу 3. Армура опори 4 і шар 3 утворюють між собою електричний конденсатор, ємність якого вимірюється за допомогою приладу 6.

В міру руху кільця 2 вздовж опори 1 прилад 6 запам'ятовує і виводить користувачеві залежність $C(x)$ (див. рис. 4). Якщо крива $C(x)$ знаходиться в межах між C_{min} та C_{max} , опора вважається такою, що позитивно пройшла випробування на щільність.

Система контролю якості продукції. Технологічний процес виготовлення залізобетонних циліндричних опор для ЛЕП досить складний (рис. 5). Якщо розглядати систему управління якістю однієї окремої опори, то вимірювання проміжних параметрів процесу за допомогою запропонованого методу можна здійснювати на етапі «Заповнення форми бетонною сумішшю», використовуючи описане вище лабораторне устаткування.



Рис. 5 – Схема технологічного процесу виготовлення опор для ЛЕП із елементами вимірювання щільності бетону

Для управління виробництвом серії опор запропонований метод краще використовувати на етапі «Контроль якості», коли опора вже виготовлена повністю, бетон затвердів та висох, і опору можна класти

на вимірювальний стенд.

Практичні випробування результатів дослідження. Пропоноване метрологічне забезпечення було використано при створенні системи управління технологічним процесом виготовлення виробу «Стойка циліндрична залізобетонна центрифугована для опор високовольтних ліній електропередач напругою 750 кВ» (рис. 6).

Довжина стійок – 20 м, зовнішній діаметр – 0,8 м, внутрішній – 0,63 м. Маса виробу – до 10 т, діаметр армуючої сталі – 0,14 м.



Рис. 6 – Зовнішній вигляд з торця на опору лінії електропередачі із 24 армуючими стержнями

Стойки призначені для будівництва високовольтних ліній в будь-яких кліматичних умовах при неагресивному, слабо і середньо агресивному і неагресивному ступеню впливу встановленої проектною документацією згідно зі СНІП 2.03.11-85, а також сейсмічності району будівництва до 9 балів включно. Стойки призначені для будівництва при розрахунковій температурі до мінус 55 °С, згідно СНІП 2.01.07-82 в районах по силі вітру і в районах по товщині стінки

ожеледиці, згідно СНІП 2.01.07-85. Марка бетону по морозостійкості і водонепроникності: нижче мінус 40 °С – F 200 і W 8, мінус 40 °С і вище – F 150 і W 6. Практичні випробування цієї системи на ПАТ «Галенергобудпром» дозволили отримати наступні результати: середня вартість одного придатного виробу знизилася на 13 %, а кількість бракованих виробів знизилася на 23 %.

Обговорення результатів. Результати роботи підтверджують практичну можливість використання ємнісного методу вимірювання щільності окремих складових великих залізобетонних виробів.

Метод може бути застосований при управлінні технологічним процесом виготовлення таких виробів з оберненим зв'язком «по малому колу», коли вимірюються проміжні параметри процесу, а також «по великому колу», коли необхідні для управління дані отримуються на кінцевому етапі останнього.

Висновки. В результаті аналізу залежності «ємність електричного конденсатора – щільність гетерогенного матеріалу між його обкладками» розроблені теоретичні основи ємнісного вимірювання щільності бетону в великих трубчастих залізобетонних конструкціях.

Створено стенд для вимірювання щільності бетону в трубчастих залізобетонних конструкціях великого розміру (до 20 м) із рухомим вздовж такої конструкції електродом, між поверхнею якого та арматурою залізобетону утворюється вимірюваний конденсатор.

Розроблено метод підвищення якості стійок циліндричних залізобетонних центрифугованих опор для високовольтних ліній електропередач у вигляді системи управління параметрами процесу їхнього виготовлення з використанням запропонованих засобів вимірювання.

Пропоноване метрологічне забезпечення було використано при створенні системи управління технологічним процесом виготовлення виробу «Стійка циліндрична залізобетонна центрифугована для опор високовольтних ліній електропередач напругою 750 кВ». Практичні випробування цієї системи на ПАТ «Галенергобудпром» дозволили отримати наступні результати: середня вартість одного придатного виробу знизилася на 13 %, а кількість бракованих виробів знизилася на 23 %.

Список літератури:

1. Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетонных конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза [Текст] / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Возницук // Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 33–39.
2. Улыбин, А. В. Методы контроля параметров армирования железобетонных конструкций [Текст] // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1(27). – С. 4–13.

3. Калюжный, А. В. Исследование методов контроля скрытых пустот различными способами [Текст] / А. В. Калюжный, // АСАУ. – 2007. – № 10 (30). – С. 54–62.
4. Бербеков Ж. В. Неразрушающие методы контроля прочности бетона [Текст] / Бербеков Ж. В. // Молодой ученый. – 2012. – № 11. – С. 20–23.
5. Гольдштейн, А. Е. Отстройка от влияния изменения электропроводности воды на результаты технологического контроля погонной емкости электрического кабеля [Текст] / А. Е. Гольдштейн, Г. В. Вавилов // Ползуновский вестник. Приборы и методы контроля. – 2013. – № 2. – С. 150–154.
6. Становский, А. Л. Неразрушающий метод измерения плотности фрагментов песчаных литейных форм [Текст] / А. Л. Становский, И. В. Прокопович, М. А. Духанина // Информационный журнал передовых технологий. – Херсон, 2013 – № 4 (5). – С. 104–110.
7. Измерение параметров конденсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.%20html
8. Оборский, Г. А. Выбор метрологического обеспечения управления сложными объектами литейного производства с трудноизмеримыми параметрами [Текст] / Г. А. Оборский, А. Л. Становский, И. В. Прокопович, М. А. Духанина // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Харьков, 2014. – № 6/3 (72). – С. 41 – 47. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/32420/30972>
9. Бубняк, Т. І. Вища математика [Текст] / Т. І. Бубняк. – Львів: Новий світ, 2009. – 436 с.
10. Усов, А. В. Диференціальне та інтегральне числення функцій багатьох змінних [Текст] / А. В. Усов, В. М. Кузьміна, Т. М. Олех. – Одеса: Астропринт, 2007. – 245 с.

Bibliography (transliterated):

1. Snezhkov, D. Yu., Leonovich, S. N., Voznischik, A. V. (2013). Analiz metodik nerazrushayuschih ispytaniy betonnykh konstruktsey po deystvuyushchim gosudarstvennyim standartam i normam Evrosoyuza. Stroitelstvo i arhitektura, 2, 33 – 39.
2. Ulybin, A. V. (2012). Metody kontrolya parametrov armirovaniya zhelezobetonnnykh konstruktsey. Inzhenerno-stroitelnyiy zhurnal, 1(27), 4–13.
3. Kalyuzhnyiy, A. V. (2007). Issledovanie metodov kontrolya skrytykh pustot razlichnyimi sposobami. ASAU, 10(30), 54–62.
4. Berbekov, Zh. V. (2012). Nerazrushayushchie metody kontrolya prochnosti betona. Molodoy uchenyy, 11, 20–23.
5. Goldshteyn, A. E., Vavilov, G. V. (2013). Otsroyka ot vliyaniya izmeneniya elektroprovodnosti vody na rezultaty tehnologicheskogo kontrolya pogonnoy emkosti elektricheskogo kabelya. Polzunovskiy vestnik. Rezel 4. Pribory i metody kontrolya, 2, 150–154.
6. Stanovskiy, A. L., Prokopovich, I. V., Duhanina, M. A. (2013). Nerazrushayushchiy metod izmereniya plotnosti fragmentov peschanykh liteynykh form. Zbirnyk naukovykh prats. «Informatsiyni tehnologiyi v osviti, nautsi ta virobniitvi», 4(5), 104 – 110.
7. Izmerenie parametrov kondensatorov (2017). Avialable at: http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.%20html
8. Oborskiy, G. A., Stanovskiy, A. L., Prokopovich, I. V., Duhanina M. A. (2014). Vyibor metrologicheskogo obespecheniya upravleniya slozhnyimi ob'ektami liteynogo proizvodstva s trudnoizmerimymi parametrami. Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy. Informatsionnyie tehnologii, 6(3(72)), 41–47. Avialable at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/32420/30972>
9. Bubnyak, T. I. (2009). Vischa matematika. Lviv: Noviy svit, 436.
10. Usov, A. V., Kuzmina, V. M., Olex, T. M. (2007). Diferentsialne ta shntegralne chisleniya funktsiy bagatoh zminnykh. Odesa: Astroprint, 245.

Надійшла (received) 14.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Метрологічне забезпечення контролю щільності гетерогенних матеріалів / І. В. Прокопович, М. О. Духаніна, І. І. Становська, Х. Валід Шер, В. В. Добровольська, О. В. Торопенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.22–28. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Метрологическое обеспечение контроля плотности гетерогенных материалов/ И. В. Прокопович, М. А. Духанина, И. И. Становская, Х. Валид Шер, В. В. Добровольская, А. В. Торopenko// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.22–28. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Metrological assurance of control density heterogeneous materials/ I. Prokopovich, M. Duhanina, I. Stanovska, H. Walid Sher, V. Dobrovolska, O. Toropenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.22–28 . – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Прокопович Ігор Валентинович – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри технології та управління ливарними процесами, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: igor.prokopovich@gmail.com.

Духаніна Маріанна Олександрівна – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри технології та управління ливарними процесами; пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: marianna.dukhanina@gmail.com.

Становська Іраїда Іванівна – Одеський національний політехнічний університет, кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та моделювання систем, 65044, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: iraidasweet07@rambler.ru.

Хусайн Валид Шер – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com

Добровольська Вікторія Віталіївна – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: dlv5@ukr.net.

Торopenko Олексій Вікторович – Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: alexey.toropenko@geomoras.net.

Прокопович Ігор Валентинович – доктор технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры технологии и управления литейными процессами, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: igor.prokopovich@gmail.com.

Духанина Марианна Александровна – Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры технологии и управления литейными процессами; пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: marianna.dukhanina@gmail.com.

Становская Ираида Ивановна – Одесский национальный политехнический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и моделирования систем, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: iraidasweet07@rambler.ru.

Хусайн Валид Шер – Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com

Добровольская Виктория Виталиевна – Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: dlv5@ukr.net.

Торopenko Алексей Викторович – Одесский национальный политехнический университет, аспирант кафедры нефтегазового и химического машиностроения, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, Украина, 65044; e-mail: alexey.toropenko@geomoras.net.

Prokopovich Igor – Doctor of technical sciences, associate professor, Odessa National Polytechnic University, associate professor of the department of technology and foundry process control, Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: igor.prokopovich@gmail.com.

Marianna Duhanina – Postgraduate, Odessa National Polytechnic University, department of technology and management foundry process; Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: marianna.dukhanina@gmail.com.

Stanovskaya Iraida – Candidate of technical science, Odessa National Polytechnic University, associate professor of the department of mathematics High society and modeling systems, Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: iraidasweet07@rambler.ru.

Hussain Valid Sher – Postgraduate, Odessa National Polytechnic University, Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: walidsher@hotmail.com

Dobrovolska Victoria – Postgraduate, Odessa National Polytechnic University, Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: dlv5@ukr.net.

Toropenko Olexiy – Postgraduate, Odessa National Polytechnic University, Department of oil and gas and chemical engineering, Shevchenko ave., 1, Odesa, Ukraine, 65044; e-mail: alexey.toropenko@geomoras.net.

УДК 539.2, 539.8

С. В. ВАСИЛЮК, Ю. А. МЯГЧЕНКО

ВИВЧЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПЕРЕНОСУ КРІЗЬ ОДИНОЧНУ ОРГАНІЧНУ МОЛЕКУЛУ

Ціль дослідження полягає в тому, щоб вивчити квантовані стабільні стани на графіку залежності опору органічних молекул від часу, поміщених між механічно контрольованими наноконтактами при заданому значенні сили струму. Передбачається знайти найбільш придатні діапазони значень опору для наступного одержання вольт-амперних характеристик досліджуваних нових органічних речовин для молекулярної електроніки.

Ключові слова: молекулярна електроніка, нанотехнологія, квантова хімія, одномолекулярний транзистор, механічно контрольовані розривні контакти.

Цель исследования заключается в том, чтобы изучить квантованные стабильные состояния на графике зависимости сопротивления органических молекул от времени, помещенных между механически контролируемые наноконтактами при заданном значении силы тока. Предполагается найти наиболее подходящие диапазоны значений сопротивления для последующего получения вольт-амперных характеристик исследуемых новых органических веществ для молекулярной электроники.

Ключевые слова: молекулярная электроника, нанотехнология, квантовая химия, одномолекулярный транзистор, механически контролируемые разрывные контакты.

The purpose of research will be to study the quantum stable states on the dependence schedule of organic molecules resistance versus time, placed between mechanically controllable break junctions at a present value of current. It is supposed to find the most suitable ranges of resistance values for the subsequent reception current versus voltage characteristics of the researched new organic substances necessary for molecular electronics requests. Organic semiconductors can be defined as solid, containing a significant amount of carbon-carbon bonds that are capable of supporting electronic conductivity. At this time, it became possible to synthesize semiconductors with desired electrical properties using organic chemistry, contributing to the rapid development of this area. It was possible to obtain substances with a wide range of mechanical properties by preparing specific molecular structures. If this possibility can be spread on electrical parameters, it will lead to increasing use of semiconductors beyond the use of industrially important inorganic semiconductors like silicon and germanium.

Development of nanotechnologies foretells revolutionary changes in microelectronics. The wide fronts of scientific researches, interest of large firms in manufacturing of molecular devices provide fast development of "moletronics".

The development of the modern electronic technology which conditionally began 50 years ago with the invention of the transistor and ten years later – the solid-state integrated circuit. It is still entered in the law opened in 1965 by the employee of Intel Corporation Gordon Moore: each new chip made in 18-24 months after the previous one, has approximately twice as big as the capacity of memory. The given process should end naturally in 10-15 years in view of evolution necessity to use elements interaction on the quantum mechanics basis. Really, in this case the sizes of elements should be commensurable with nanometer, equal 10^{-9} meters. As a result, huge opportunities on reduction of the sizes of microcircuits are open. If you replace all gates of modern semi-conductor devices with atoms, it is possible to reduce the size of microcircuits in ten thousand times and correspondingly to increase the speed of their work.

Keywords: molecular electronics, mechanically controllable break junctions, nanotechnology, quantum chemistry, single-molecule transistor

Вступ. Потенційні можливості традиційної мікроелектроніки будуть вичерпані в найближче десятиліття і далі стане можливим розвивати електроніку тільки на базі нових фізичних ідей. Десятки років для підвищення функціональної складності і швидкодії приладів експлуатували ідею збільшення щільності розміщення і зменшення розмірів мікроелементів, принцип дії яких не залежав від їхнього масштабу. При переході до розмірів елементів порядку нанометрів виникає якісно інша ситуація, зміст якої в тім, що квантові ефекти дуже впливають на фізичні процеси в наноструктурах і роботу приладів на їхній основі.

Створення таких наноструктур вимагає нових технологій, які стали активно розвиватися останні п'ятнадцять років по декількох напрямках: виготовлення електронних схем з активними елементами, розміри яких порівнянні з молекулярними, розробка і виготовлення мікро- і наномашин, розміри яких порядку декількох молекул, модифікація поверхні твердотільних молекул за допомогою маніпуляцій окремими атомами і зборка з них наноструктур [1].

Розвиток нанотехнологій передвіщає революційні зміни в мікроелектроніці. Широкий фронт наукових досліджень, зацікавленість великих фірм у виробництві молекулярних пристроїв забезпечують швидкий розвиток "молетроніки" [2]. Розвиток сучасної електронної технології, що умовно почалося 50 років тому з винаходу транзистора і десятьма роками пізніше – інтегральної схеми, як і раніше вписується у від-

критий у 1965 році співробітником корпорації Intel Гордоном Муром [3] закон: кожен новий чіп, зроблений через 18–24 місяців після попереднього, має приблизно удвічі більшу ємність пам'яті. Це повинно природним чином закінчитися через 10–15 років через необхідність переходу до використання взаємодії елементів на основі квантової механіки. Однак в останні роки позначився реальний вихід з цього положення, заснований на досягненнях хімічних наук [4]. Відповідні технології побудови пристроїв обчислювальної техніки одержали назву нанотехнологій [5].

Багатообіцяючим є створення наноструктур, у яких роль функціональних елементів виконують окремі молекули, які можливо ув'язати собі підключеними в електричне коло в якості діоду чи перемикача, як, наприклад на рис. 1.

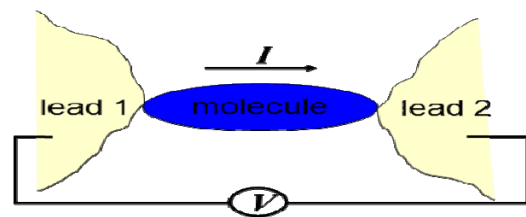


Рис. 1 – Схематичне зображення підключення одномолекулярного пристрою до металевих контактів на електричному колі та спроби вивчення властивостей нанорозмірних об'єктів

© С. В. Василюк, Ю. А. Мягченко 2016

У перспективі це дозволить використовувати принципи прийому і переробки інформації, реалізовані в біологічних об'єктах (як пропонує молекулярна електроніка – в якості молекулярних діодів, потрібно тільки зробити наноконтакти – рис. 2.

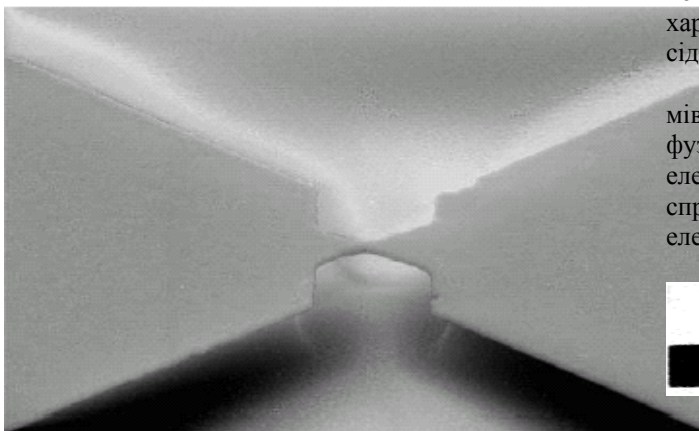


Рис. 2 – Механічно керований розривний контакт - нанолітографія, велике збільшення [4]

Вона входить у більш велику галузь – нанобіотехнологію [6], що займається біологічними об'єктами і біопроцесами на молекулярному і клітинному рівнях, що вирішує багато проблем екології, медицини, сільськогосподарства й національної оборони.

Електроміграція, причини та наслідки. У процесі експлуатації мікросхем і інших напівпровідникових приладів відбувається деградація фізико-хімічних властивостей металевих провідників, що може привести до параметричних чи катастрофічних відмов. Відмови, зв'язані з процесами, що протікають у провідниках, є основними для інтегральних мікросхем у випадку їхнього використання при підвищених навантаженнях (близько 25 % усіх відмов). Причина відмов може складатися в розриві провідників на сходах оксиду, у корозії металу, у взаємодії оксиду з металом при локальних збільшеннях температури, розриві провідників і порушенні контакту з кремнієм внаслідок електроміграції іонів металу провідника [7].



Рис. 3 – Фотографії реальних наслідків електроміграційно стимульованої деградації напівпровідникової електроніки при зростанні температури, збільшена інтегральна мікросхема

При щільності струму більше 100 A/mm^2 (при температурах вище $150 \text{ }^\circ\text{C}$) можлива міграція атомів металу в бік одного з електродів – зміна розмірів металевої шини на ізолюваній підкладці за рахунок пере-

носу атомів металу. Перенос називається електроміграцією [8].

У процесі теплового руху іони металу можуть займати нерегулярні положення в кристалічних ґратах. У процесі теплового руху відбувається рух іонів по міжвузлях, генерація і заповнення вакансій, тобто характер цього руху – послідовність перескоків у сусідні вакантні вузли.

Цей процес аналогічний механізму дифузії атомів у твердій фазі, тому часто називається – самодифузія (електродифузія) іонів. При наявності дрейфу електронів вони підштовхують іони. Відбувається спрямований рух іонів. Захоплення іонів дрейфом електронів називають "електронним вітром" [9].



Рис. 4 – Фотографії реальних наслідків електроміграційно стимульованої деградації напівпровідникової електроніки, ще точніше збільшена інтегральна мікросхема при зростанні температури, видно метал та оксиди металу в товщі напівпровіднику

Іони накопичуються в кінці провідника з високим потенціалом, утворюючи уздовж провідника кристаліти у виді "горбків", "вусів" і т.д., здатні закоротити близько розташовані провідники. Вакансії рухаються в напрямку кінця провідника з низьким потенціалом, у результаті чого в окремих ділянках утворюються порожнечі, і, як наслідок, розриви металізації [9].

У металевому провіднику на термічно збуджений міжвузельний іон діють дві протилежно спрямованих сили: сила F_z з боку електричного поля в провіднику і сила F_e , обумовлена захопленням іона електронним вітром. Результируюча сила F_z буде дорівнювати:

$$F_i = (q_i - enl\sigma)E,$$

де q_i – заряд іона; e – заряд електрона; n – концентрація електронів; l – довжина вільного пробігу електронів; σ – переріз розсіювання електронів на міжвузельних іонах; E – напруженість поля в провіднику [10].

У результаті екрануючого впливу електронів провідності дія електричного поля на іони металу незначна. Тому при підвищених температурах і великих густинах струму переважає сила F_e , під впливом якої міжвузельні іони захоплюються "електронним вітром" і переміщуються в сусідню вакансію переважно в напрямку руху електронів.

Іони накоплюються в кінці провідника з високим потенціалом, утворюють уздовж провідника кристаліти у виді "горбків", "вусів" і т.д., здатні закоротити близько розташовані провідники, як видно на рис. 4-6. Вакансії рухаються в напрямку кінця провідника з низьким потенціалом, у результаті чого в окремих ділянках утворюються порожнечі, і, як наслідок, розриви металізації [6–10].

Швидкість електроміграції іонів v_i у провіднику визначається виразом:

$$v_i = \frac{D}{kT} (q_i - enl\sigma) \rho j = \frac{D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)}{kT} (q_i - enl\sigma) \rho j,$$

де ρ – питомий опір провідника; j – щільність струму; D – коефіцієнт дифузії; E_a – енергія активації дифузії.

Електроміграція іонів у провіднику здійснюється по границях зерен, оскільки в цих місцях енергія активації дифузії нижче, ніж у самому зерні [11] тому що металеві іони в цих областях є більш слабо зв'язаними, чим у правильних кристалічних ґратах, що коли електронний вітер досягає деякої сили, атоми відокремлюються від границі зерна і транспортуються в напрямку потоку. Цей напрямок також впливає на границю зерна безпосередньо, тому що атоми мають тенденцію проходити границі зерен.

Порожнини найчастіше виникають у місцях перетинання границь зерен, у так званих "потрійних точках". Тому в дрібнозернистих структурах електроміграція виявляється сильніше, і дрібнозернисті плівки (за інших рівних умов) деградують швидше, ніж грубозернисті. Процеси розповсюдження, викликані електроміграцією, можуть бути розділені на розповсюдження границі зерна, групове і поверхнєве розповсюдження [12]. Узагалі, розповсюдження границі зерна – головний процес при русі електроміграції в алюмінієвих проводах, тоді як поверхнєве є домінуючим у мідних сполучених проводах [13]. На відмови, викликані електроміграцією, також впливають градієнти температур і структурна неоднорідність металевої плівки.

Процеси міграції істотно підсилюються у випадку нерівномірної товщини шини [14]. Під дією "електронного вітру" тонка частина шини стає тонше і тонше аж до руйнування [15].

Існують емпіричні формули, що дають оцінку середнього часу життя шини під струмом до обриву – τ :

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot \left(\frac{j}{j_0}\right)^n \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

де E_a – енергія активації утворення вакансії в кристалічних ґратах металу [16].

Відомо, що чиста мідь є більш стійкою до електроміграції, ніж алюміній. Мідні проводи можуть протистояти приблизно в п'ять разів більшої щільності електричного струму, чим алюмінієві проводи при прийнятті подібних вимог надійності. Це відбувається головним чином через більш високі рівні енергії активації міді, викликаною її переважаючою електричною і тепловою провідністю так само, як і її більш високою точкою плавлення [17].

Опис експерименту шляхом методики механічно-розривного наноконтакту. Контроль експерименту здійснюється за допомогою пакета комп'ютерних програм і приладів – мультиметрів фірми Keithley 2400, 2010 (на схемі використовуються як вольтметри), та Keithley 617 (працює джерелом напруги для п'єзоелемента). Використовуючи пакет програм Labview 7.0, одержуємо графіки залежностей опору і

провідності нашого зразка від часу.

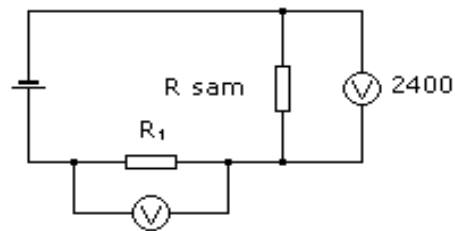


Рис. 5 – Схема електричного кола експерименту

Установка складалася з металевого корпуса – коробки зі зйомною кришкою для захисту від пилу, у середині якого знаходилися електрична плата, сполучні проводи і перемикач на 12 різних положень для вибору різних контактів на електронному чіпі, в електронний чіп поміщений варіант напилювання, що виглядає як сукупність мікроскопічних напівконусів, з'єднаних верхівками по два, нанесених на підкладку за допомогою електронно-променевої літографії [18].

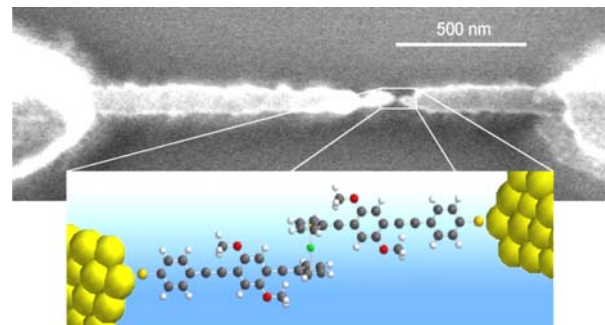


Рис. 6 – Фотографія наноконтакту та схематичне зображення поміщеної в нього молекули, що сідає на золоту дротину

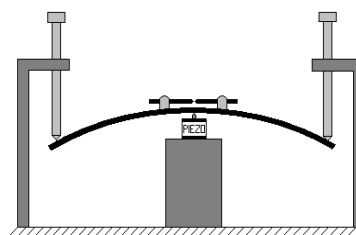


Рис. 7 – Схема зразку механічно-контрольованих розривних контактів в установці з гвинтами для розведення та розриву золотої дротинки

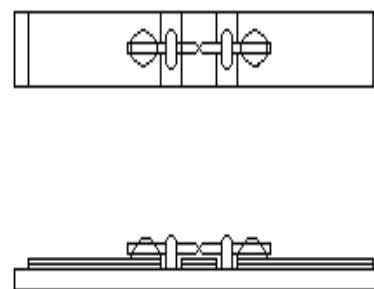


Рис. 8 – Схема зразку механічно-контрольованих розривних контактів з золотою дротиною зафіксованою в установці

Цей місток на рис.6-8 між двома клинами золота необхідно зруйнувати за допомогою електроміграції [19], щоб в отриманий у такий спосіб нанометровий проміжок змогла зануритися з водяного розчину одична органічна молекула. Коли вона замкне розірваний золотий наноконтакт, то стане можливим вимірити її провідність[20].

Оцінка максимально припустимої густини струму в умовах даного експерименту [21]. Розглянемо схему установки, де досліджуваний зразок - система, що складається з двох провідників, виконана з металу. Провідники з'єднуються таким чином, що весь струм з одного провідника тече через місце їхнього з'єднання в іншій [22] на мал. 9.

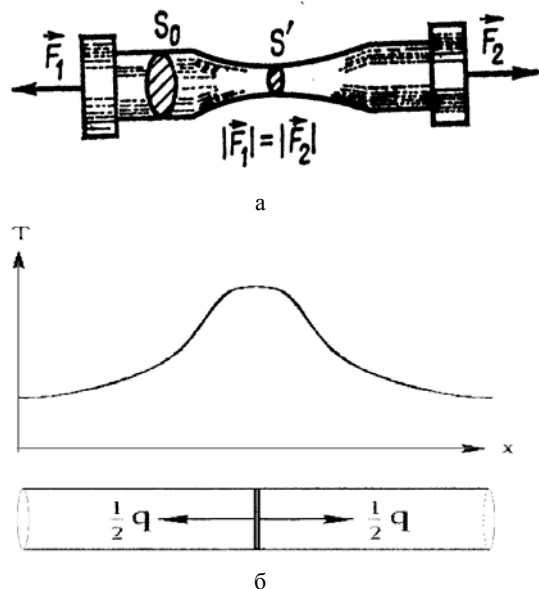


Рис. 9 – Розподіл теплової енергії в провіднику: а – схематичне зображення золотої дрітінки, що розтягується та руйнується; б – та графік розподілу тепла від довжини зразка

При протіканні постійного струму через перехід з опором у ньому виділяється тепла енергія потужністю

$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R, \tag{1}$$

де I – значення струму $i(t)$. Тому що теплопровідність навколишнього повітря набагато нижче теплопровідності металу, то в нашій моделі енергія, що виділяється в переході, буде йти в провідники, рівною мірою розділяючи між ними (рис. 9):

$$q = \frac{1}{2} \frac{dQ}{dt} = \frac{I^2 R}{2}, \tag{2}$$

Якщо коефіцієнт теплопровідності матеріалу провідника дорівнює k , то потік тепла через перетин площею S буде:

$$q = kS \frac{dT}{dx}, \tag{3}$$

Оскільки праві частини (2) і (3) рівні, то:

$$I = \sqrt{\frac{2kS}{R} \frac{dT}{dx}}, \tag{4}$$

Якщо обмежити градієнт температури в провіднику значенням 1 К/мкм і взяти параметри технології $0,18 \text{ мкм}$ ($R < 20, S = 0.14 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2, k = 237 \frac{\text{А}\delta}{i \cdot E}$), то одержимо, що діючий струм у провіднику не може перевищувати значення $I_{\text{max}} = 1.8 \text{ мА}$, що відповідає щільності струму $1.28 \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$. Для Au параметри технології: $20 \text{ нм} * 50 \text{ нм}$, $S = 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$. Максимальне значення діючого струму $I_{\text{max}} \cong 0.9 \text{ А}$ та відповідна густина струму $j_{\text{max}} \sim 10^{13} \text{ А/м}^2$ [23].

Використовуємо струм 1 мікроампер . Задаємо фіксоване значення сили струму. Міряємо напругу на зразку. Межа напруги – 21 Вольт , це значення реєструється приладом, коли контакт між двома обривками золотого дроту відсутній чи коли досліджувана молекула між ними розірвана. За допомогою пакета програм можемо спостерігати залежність опору і провідності зразка від часу. В результаті дії електричної іскри при пережиганні провідного містка дуже пошкоджувався матеріал підкладки й утворювалася велика кількість різних хімічних сполук матеріалу підкладки, металу електродів і газів навколишнього повітря.

Результати вимірів опору органічних молекул. З раніше отриманих матеріалів (рис. 10) [24, 25], видно, що опір розривного контакту без молекул збільшується дискретно, яскраво вираженими сходинками, де останні сходинки рівні приблизно величині опору приблизно рівної $R_0 = 12,9 \text{ КОм}$.

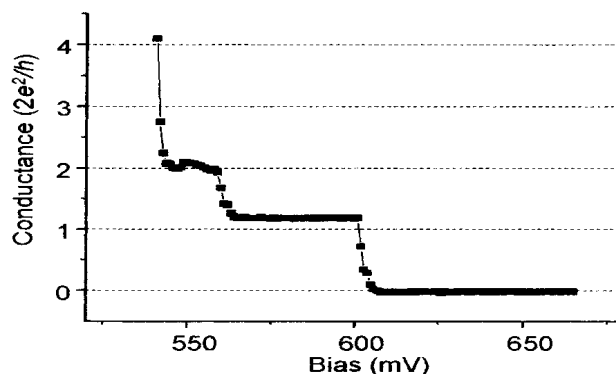


Рис. 10 – Графік зміни провідності наноконтакту в залежності від напруги в процесі розриву золотого дроту [19].

Це молекули: – (TEAH) $9 \text{ Na}_2 (\text{H}_{12}\text{KW}_{36}\text{O}_{120} (\text{H}_2\text{O}) 21$;
 – $\text{C}_{54}\text{H}_{198}\text{KN}_9\text{Na}_2\text{O}_{168}\text{W}_{36}$ - умовний код D98;
 – $(\text{NH}_4) 52 \text{ Mo}_{132}\text{O}_{272} (\text{H}_2\text{O}) 72 (\text{C}_2\text{H}_3\text{COO}) 40 (\text{H}_2\text{O}) 200$;
 – $\text{C}_{120}\text{H}_{872}\text{Mo}_{132}\text{N}_{52}\text{O}_{624}$ – умовний код D83.

Усього було проведено більше 150 експериментів з молекулами D83, D98 і H_2O . Результати були оброблені за допомогою редактора Excel і представлені ни-

жче. При аналізі отриманих результатів було помічено, що опір того самого типу молекули в різних експериментах відрізняється один від одного приблизно як 1; 1/2; 1/3, і так далі, що свідчить про те, що між електродами знаходяться 1; 2; 3 і більш молекул. Тому обрані графіки з максимальним опором, що відповідають одній молекулі між електродами. Це явище представлено на рис. 11.

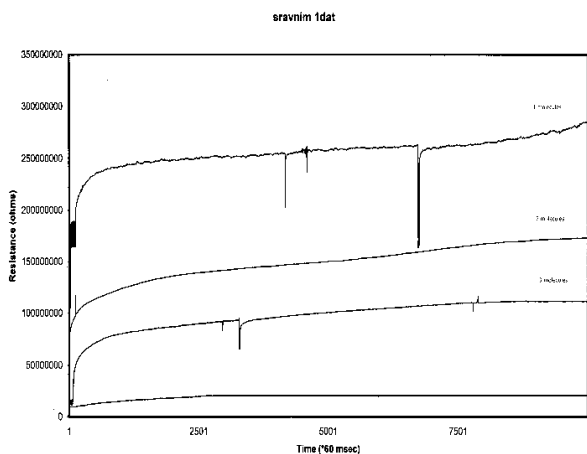


Рис. 11 – Опір різних квантових станів, що відповідають одній, двом і трьом молекулам відповідно

Крім того, при проведенні експериментів було виявлено, що графіки опору досліджуваних молекул мають безліч провалів опору майже до осі абсцис. Можливо, частина з них є перешкодами, але з великим ступенем імовірності можна затверджувати, що це явище підтверджує наявність електроміграції й обумовлено утворенням і руйнуванням провідних містків з атомів золота між електродами. А оскільки при великих густинах струму під впливом "електронного вітру" атоми золота переміщуються крізь молекулу, то стає можливим замінити атом металу в молекулі на атом золота й одержати нову хімічну сполуку за допомогою електроміграції. Природно, заміна атома можлива тільки при наявності в складі органічної формули металу, що стоїть в таблиці Менделєєва в одному стовпці з металом електродів, інакше порушиться просторова структура молекули і вона зруйнується, чи заміни не відбудеться. Інакше кажучи, для електродів із золота необхідно підібрати органічні молекули що мають у своєму складі атоми міді чи срібла. Різка зміна електричного опору молекули після провалу і встановлення його на новому рівні буде свідчити про те, що заміна атома відбулася.

Легко бачити, що в даній системі не виключене явище електролізу, тому що експерименти проводилися на відкритому повітрі при відносній вологості 50–80%, і крім процесу електроміграції існує і процес електролізу. Інакше кажучи, на результати проведених експериментів впливає сукупність процесів, що проходять у розчині, коли через нього пропускається електричний струм. Тоді в речовині відбуваються: переміщення іонів (де позитивні частки залучаються до катода і негативні до анода), електроміграція через розчин органічних молекул у воді, поширення іонів,

що втрачають заряд на електродах, електрохімічні реакції іонів, вторинні хімічні реакції продуктів електролізу один з одним і з речовиною електроліту й електрода. Але висока температура в районі контактів випаровує наявну вологу і процес може вважатися (з відомим ступенем наближення) чистою електроміграцією. Експериментально процес розриву був вивчений у роботах Парка [26, 27] і був виконаний при температурі нижче 4 К в кріостаті на рідкому гелії. Формування стабільного одноатомного ланцюжка – наноконтактів не вивчалось при кімнатній температурі, в основному, тому що атомної конфігурації речовини контактів при більш високих температурах, ніж 4 К, нестабільні, не говорячи вже про більш складні процеси у випадку органічних молекул, що замикають нанометровий проміжок.

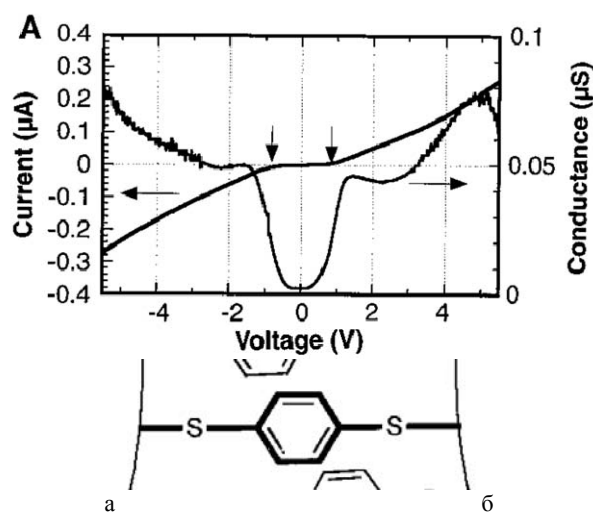


Рис. 12 – Графік зміни провідності в процесі розриву золотого дроту [19]: а – отримані вольтамперні характеристики осадженої органічної молекули; б – формула органічної молекули, що сідає на золоті наноконтакти

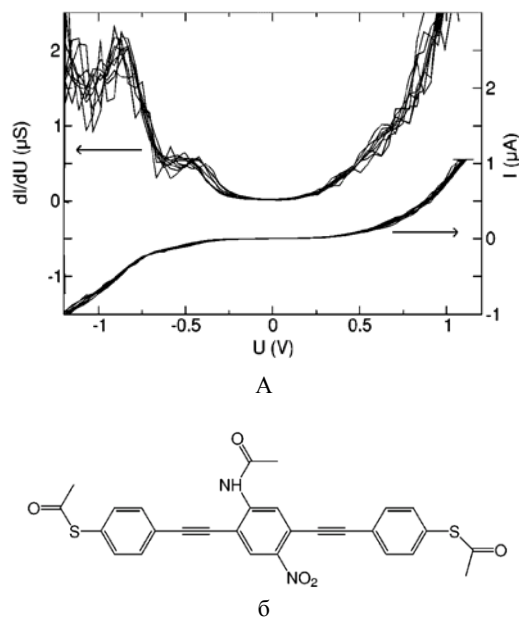


Рис. 13 – Графік зміни провідності та вольт-амперні характеристики органічної молекули: а – в процесі пропускання електричного струму через складну молекулу; б – поміщену в місце розриву золотого дроту [19]

Подібні думки виникають також із приводу відкритості системи: висока вологість повітря (50–85 %) сприяє формуванню на золоті тонкої плівки конденсату, що у плинні експерименту адсорбує з навколишнього повітря пил і частинки бруду. Взаємодіючи з газами, що входять до складу повітря, і з досліджуваною молекулою, вони утворюють нові з'єднання, що вносять помилки в результати експерименту.

Коливання температури повітря впродовж часу проведення експерименту також впливають на результати, тому що міняються лінійні розміри установки і величина зазору між електродами. Виключити ці явища можна, якщо проводити експерименти в вакуумі чи в середовищі інертного газу при постійній температурі. Необхідно, щоб речовини розтікались по металу тонким шаром в одну молекулу. Існує також інший варіант експерименту, де ці САМ поміщаються між перехрещенням проводів [28, 29].

Становить великий інтерес поведінка органічної молекули, вкладеної між наноелектродами в електромагнітному полі при протіканні через неї струму, у змісті створення малоінерційних: електричного запобіжника, електричного ключа, генератора змінного струму, нанодротини[30].

Висновки. У роботі були вивчені процеси розриву і з'єднання золотих контактів шляхом виміру залежності їхньої провідності від часу. Було встановлено, що при розриві зразка його провідність квантується і змінюється у формі сходинок. Були побудовані графіки залежності опору від часу запропонованих для дослідження органічних молекул та самих контактів. Потім, користуючись статистичними методами розрахунку, було оброблено графіки та на їхній основі були побудовані залежності провідності запропонованих молекул. З'ясовано, що вони істотно відрізняються друг від друга і при акумуляції відповідної бази даних можлива ідентифікація різних органічних молекул, що може знайти застосування в промисловості і криміналістиці.

Список літератури:

1. Kornilovitch, P. (2003). Single-Molecule Designs for Electric Switches and Rectifiers [Text] / P. Kornilovitch, A. Bratkovsky, S. Williams // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – № 1006 (1). – P. 198–211. doi: [10.1196/annals.1292.013](https://doi.org/10.1196/annals.1292.013)
2. Kwok, K. S. Moletronics: future electronics [Text] / K. S. Kwok, J. C. Ellenbogen // *Materials Today*. – 2002. – № 5 (2). – P. 28–37. doi: [10.1016/s1369-7021\(02\)05227-6](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(02)05227-6)
3. Mohr, P. J. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. [Text] / P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor. – 2015. – doi: [10.6028/nist.sp.961r2015](https://doi.org/10.6028/nist.sp.961r2015)
4. Ball, P. High-density memory: a switch in time [Text] / P. Ball // *Nature*. – 2007. – № 445. – P. 362–363.
5. Green, J. E. A 160-kilobit molecular electronic memory patterned at 1011 bits per square centimetre [Text] / J. E. Green, J. Wook Choi, A. Boukai, Y. Bunimovich, E. Johnston-Halperin, E. Delonno, J. R. Heath // *Nature*. – 2007. – № 445 (7126). – P. 414–417. doi: [10.1038/nature05462](https://doi.org/10.1038/nature05462)
6. Rinaldi, R. A Protein-Based Three Terminal Electronic Device [Text] / R. Rinaldi, G. Maruccio, A. Biasco, P. Visconti, V. Arima, R. Cingolani // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 2003. – № 1006 (1). – P. 187–197. doi: [10.1196/annals.1292.012](https://doi.org/10.1196/annals.1292.012)
7. Chandrakasan, A. Design of High-Performance Microprocessor Circuits [Text] / A. Chandrakasan, W. J. Bowhill, F. Fox. – Wiley-IEEE Press, 2000. – 578 p. doi: [10.1109/9780470544365](https://doi.org/10.1109/9780470544365)
8. Landauer, R. Spatial conductivity modulation at metallic point defects [Text] / R. Landauer // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1975. – № 8 (6). – P. 761–766. doi: [10.1088/0022-3719/8/6/006](https://doi.org/10.1088/0022-3719/8/6/006)
9. Black, J. R. Electromigration: A brief survey and some recent results [Text] / J. R. Black // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1969. – № 16 (4). – P. 338–347. doi: [10.1109/t-ed.1969.16754](https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16754)
10. Murayama, H. Electromigration and electrochemical reaction mixed failure mechanism in gold interconnection system [Text] / H. Murayama, M. Yamazaki, S. Nakajima // *Microelectronics Reliability*. – 2001. – № 41 (8). – P. 1265–1272. doi: [10.1016/s0026-2714\(01\)00112-3](https://doi.org/10.1016/s0026-2714(01)00112-3)
11. Krumbein, S. Metallic Electromigration Phenomena [Text] / S. Krumbein // *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*. – 1988. – № 11 (1). – P. 5–15. doi: [10.1109/tchmt.1988.113488](https://doi.org/10.1109/tchmt.1988.113488)
12. Black, J. R. RF power transistor metallization failure [Text] / J. R. Black // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1970. – № 17 (9). – P. 800–803. doi: [10.1109/t-ed.1970.17077](https://doi.org/10.1109/t-ed.1970.17077)
13. Ames, I. Reduction of Electromigration in Aluminum Films by Copper Doping [Text] / I. Ames, F. M. Heurle, R. E. Horstmann // *IBM Journal of Research and Development*. – 1970. – № 14 (4). – P. 461–463. doi: [10.1147/rd.144.0461](https://doi.org/10.1147/rd.144.0461)
14. Hu, C. K. Rodbell, K. P. Sullivan, T. D. Lee, K. Y. Bouldin, D. P. Electromigration and stress-induced voiding in fine Al and Al-alloy thin-film lines [Text] / C. K. Hu, K. P. Rodbell, T. D. Sullivan, K. Y. Lee, D. P. Bouldin // *IBM Journal of Research and Development*. – 1995. – № 39 (4). – P. 465–497. doi: [10.1147/rd.394.0465](https://doi.org/10.1147/rd.394.0465)
15. Thompson, C. V., Kahn, H. Effects of microstructure on interconnect and via reliability: Multimodal failure statistics [Text] / C. V. Thompson, H. Kahn // *Journal of Electronic Materials*. – 1993. – № 22 (6). – P. 581–587. doi: [10.1007/bf02666402](https://doi.org/10.1007/bf02666402)
16. D'Heurle, F. M. Electromigration and failure in electronics: An introduction [Text] / F. M. D'Heurle // *Proceedings of the IEEE*. – 1971. – № 59 (10). – P. 1409–1418. doi: [10.1109/proc.1971.8447](https://doi.org/10.1109/proc.1971.8447)
17. International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest [Text]. – International Electron Devices Meeting IEDM Technical Digest IEDM-97. – 1997. doi: [10.1109/iedm.1997.649430](https://doi.org/10.1109/iedm.1997.649430)
18. Selzer, Y. Temperature effects on conduction through a molecular junction [Text] / Y. Selzer, M. A. Cabassi, T. S. Mayer, D. L. Allara // *Nanotechnology*. – 2004. – № 15 (7). – P. S483–S488. doi: [10.1088/0957-4484/15/7/057](https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/7/057)
19. Landauer, R. Spatial carrier density modulation effects in metallic conductivity [Text] / R. Landauer // *Physical Review*. – 1976. – № 14 (4). – P. 1474–1479. doi: [10.1103/physrevb.14.1474](https://doi.org/10.1103/physrevb.14.1474)
20. Mahapatro, A. K. Pairs of Gold Electrodes with Nanometer Separation Performed over SiO₂ Substrates with a Molecular Adhesion Monolayer [Electronic resource] / A. K. Mahapatro, S. Ghosh, D. B. Janes. – 2005. – Available at: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0503656.pdf>
21. Liang, W. Kondo resonance in a single-molecule transistor [Text] / W. Liang, M. P. Shores, M. Bockrath, J. R. Long, H. Park // *Nature*. – 2002. – № 417 (6890). – P. 725–729. doi: [10.1038/nature00790](https://doi.org/10.1038/nature00790)
22. Jiang, T. An electromigration failure model for interconnects under pulsed and bidirectional current stressing [Text] / T. Jiang, N. W. Cheung, Hu. Chenming // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1994. – № 41 (4). – P. 539–545. doi: [10.1109/16.278507](https://doi.org/10.1109/16.278507)
23. Ramachandran, G. K. Nanometre gaps in gold wires are formed by thermal migration [Text] / G. K. Ramachandran, M. D. Edelstein, D. L. Blackburn, J. S. Suehle, E. M. Vogel, C. A. Richter // *Nanotechnology*. – 2005. – № 16 (8). – P. 1294–1299. doi: [10.1088/0957-4484/16/8/052](https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/8/052)
24. Tour, J. M. Self-Assembled Monolayers and Multilayers of Conjugated Thiols, α,ω -Dithiols, and Thioacetyl-Containing Adsorbates. Understanding Attachments between Potential Molecular Wires and Gold Surfaces [Text] / J. M. Tour, L. Jones, D. L. Pearson, J. J. S. Lamba, T. P. Burgin, G. M. Whitesides, S. Atre // *Journal of the American Chemical Society*. – 1995. – № 117 (37). – P. 9529–9534. doi: [10.1021/ja00142a021](https://doi.org/10.1021/ja00142a021)
25. Van Wees, B. J. Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas [Text] / B. J. Van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel, C. T. Foxon // *Physical Review*

- Letters. – 1988. – № 60 (9). – P. 848–850. doi: [10.1103/physrevlett.60.848](https://doi.org/10.1103/physrevlett.60.848)
26. Park, J. Coulomb blockade and the Kondo effect in single-atom transistors [Text] / J. Park, A. N. Pasupathy, J. I. Goldsmith, C. Chang, Y. Yaish, J. R. Petta, D. C. Ralph // Nature. – 2002. – № 417 (6890). – P. 722–725. doi: [10.1038/nature00791](https://doi.org/10.1038/nature00791)
 27. Ochs, R. Fast temporal fluctuations in single-molecule junctions [Text] / R. Ochs, D. Secker, M. Elbing, M. Mayor, H. B. Weber, // Faraday Discuss. – 2006. – № 131. – P. 281–289. doi: [10.1039/b506390f](https://doi.org/10.1039/b506390f)
 28. Kushmerick, J. G. Conductance Scaling of Molecular Wires in Parallel [Text] / J. G. Kushmerick, J. Naciri, J. C. Yang, R. Shashidhar // Nano Letters. – 2003. – № 3 (7). – P. 897–900. doi: [10.1021/nl034201n](https://doi.org/10.1021/nl034201n)
 29. Blum, A. S. Molecularly inherent voltage-controlled conductance switching [Text] / A. S. Blum, J. G. Kushmerick, D. P. Long, C. H. Patterson, J. C. Yang, J. C. Henderson, B. R. Ratna // Nature Materials. – 2005. – № 4 (2). – P. 167–172. doi: [10.1038/nmat1309](https://doi.org/10.1038/nmat1309)
 30. Vasylyuk, S. V. The Investigation of Relaxation Paths in Dioxaborine Anionic Polymethine Dyes Detected by Low-Temperature Time-Resolved Fluorescence [Text] / S. V. Vasylyuk, V. M. Yashchuk, O. O. Viniyuchuk, Y. P. Piryatinski, M. M. Sevryukova, A. O. Gerasov, O. D. Kachkovsky // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2011. – № 535 (1). – P. 123–131. doi: [10.1080/15421406.2011.537959](https://doi.org/10.1080/15421406.2011.537959)
- Bibliography (transliterated):**
1. Kornilovitch, P., Bratkovsky, A., Williams, S. (2003). Single-Molecule Designs for Electric Switches and Rectifiers. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1006 (1), 198–211. doi: [10.1196/annals.1292.013](https://doi.org/10.1196/annals.1292.013)
 2. Kwok, K. S., Ellenbogen, J. C. (2002). Moletronics: future electronics. *Materials Today*, 5(2), 28–37. doi: [10.1016/s1369-7021\(02\)05227-6](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(02)05227-6)
 3. Mohr, P. J., Newell, D. B., Taylor, B. N. (2015). CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. doi: [10.6028/nist.sp.961r2015](https://doi.org/10.6028/nist.sp.961r2015)
 4. Ball, P. (2007). High-density memory: a switch in time. *Nature*, 445, 362–363.
 5. Green, J. E., Wook Choi, J., Boukai, A., Bunimovich, Y., Johnston-Halperin, E., DeIonno, E., Heath, J. R. (2007). A 160-kilobit molecular electronic memory patterned at 1011 bits per square centimetre. *Nature*, 445 (7126), 414–417. doi: [10.1038/nature05462](https://doi.org/10.1038/nature05462)
 6. Rinaldi, R., Maruccio, G., Biasco, A., Visconti, P., Arima, V., Cingolani, R. (2003). A Protein-Based Three Terminal Electronic Device. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1006 (1), 187–197. doi: [10.1196/annals.1292.012](https://doi.org/10.1196/annals.1292.012)
 7. Chandrakasan, A., Bowhill, W. J., Fox, F. (2000). Design of High-Performance Microprocessor Circuits. Wiley-IEEE Press, 578. doi: [10.1109/9780470544365](https://doi.org/10.1109/9780470544365)
 8. Landauer, R. (1975). Spatial conductivity modulation at metallic point defects. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 8 (6), 761–766. doi: [10.1088/0022-3719/8/6/006](https://doi.org/10.1088/0022-3719/8/6/006)
 9. Black, J. R. (1969). Electromigration: A brief survey and some recent results. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 16 (4), 338–347. doi: [10.1109/t-ed.1969.16754](https://doi.org/10.1109/t-ed.1969.16754)
 10. Murayama, H., Yamazaki, M., Nakajima, S. (2001). Electromigration and electrochemical reaction mixed failure mechanism in gold interconnection system. *Microelectronics Reliability*, 41 (8), 1265–1272. doi: [10.1016/s0026-2714\(01\)00112-3](https://doi.org/10.1016/s0026-2714(01)00112-3)
 11. Krumbein, S. (1988). Metallic Electromigration Phenomena. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 11 (1), 5–15. doi: [10.1109/tchmt.1988.113488](https://doi.org/10.1109/tchmt.1988.113488)
 12. Black, J. R. (1970). RF power transistor metallization failure. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 17 (9), 800–803. doi: [10.1109/t-ed.1970.17077](https://doi.org/10.1109/t-ed.1970.17077)
 13. Ames, I., Heurle, F. M., Horstmann, R. E. (1970). Reduction of Electromigration in Aluminum Films by Copper Doping. *IBM Journal of Research and Development*, 14 (4), 461–463. doi: [10.1147/rd.144.0461](https://doi.org/10.1147/rd.144.0461)
 14. Hu, C.-K., Rodbell, K. P., Sullivan, T. D., Lee, K. Y., Bouldin, D. P. (1995). Electromigration and stress-induced voiding in fine Al and Al-alloy thin-film lines. *IBM Journal of Research and Development*, 39 (4), 465–497. doi: [10.1147/rd.394.0465](https://doi.org/10.1147/rd.394.0465)
 15. Thompson, C. V., Kahn, H. (1993). Effects of microstructure on interconnect and via reliability: Multimodal failure statistics. *Journal of Electronic Materials*, 22 (6), 581–587. doi: [10.1007/bf02666402](https://doi.org/10.1007/bf02666402)
 16. D' Heurle, F. M. (1971). Electromigration and failure in electronics: An introduction. *Proceedings of the IEEE*, 59 (10), 1409–1418. doi: [10.1109/proc.1971.8447](https://doi.org/10.1109/proc.1971.8447)
 17. International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest. (1997). International Electron Devices Meeting IEDM Technical Digest IEDM-97. doi: [10.1109/iedm.1997.649430](https://doi.org/10.1109/iedm.1997.649430)
 18. Selzer, Y., Cabassi, M. A., Mayer, T. S., Allara, D. L. (2004). Temperature effects on conduction through a molecular junction. *Nanotechnology*, 15 (7), S483–S488. doi: [10.1088/0957-4484/15/7/057](https://doi.org/10.1088/0957-4484/15/7/057)
 19. Landauer, R. (1976). Spatial carrier density modulation effects in metallic conductivity. *Physical Review B*, 14 (4), 1474–1479. doi: [10.1103/physrevb.14.1474](https://doi.org/10.1103/physrevb.14.1474)
 20. Mahapatro, A. K., Ghosh, S., Janes, D. B. (2005). Pairs of Gold Electrodes with Nanometer Separation Performed over SiO₂ Substrates with a Molecular Adhesion Monolayer. Available at: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0503656.pdf>
 21. Liang, W., Shores, M. P., Bockrath, M., Long, J. R., Park, H. (2002). Kondo resonance in a single-molecule transistor. *Nature*, 417 (6890), 725–729. doi: [10.1038/nature00790](https://doi.org/10.1038/nature00790)
 22. Jiang, T., Cheung, N. W., Chenming Hu. (1994). An electromigration failure model for interconnects under pulsed and bidirectional current stressing. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 41 (4), 539–545. doi: [10.1109/16.278507](https://doi.org/10.1109/16.278507)
 23. Ramachandran, G. K., Edelstein, M. D., Blackburn, D. L., Suehle, J. S., Vogel, E. M., & Richter, C. A. (2005). Nanometer gaps in gold wires are formed by thermal migration. *Nanotechnology*, 16 (8), 1294–1299. doi: [10.1088/0957-4484/16/8/052](https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/8/052)
 24. Tour, J. M., Jones, L., Pearson, D. L., Lamba, J. J. S., Burgin, T. P., Whitesides, G. M., ... Atre, S. (1995). Self-Assembled Monolayers and Multilayers of Conjugated Thiols, α,ω -Dithiols, and Thioacetyl-Containing Adsorbates. Understanding Attachments between Potential Molecular Wires and Gold Surfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 117 (37), 9529–9534. doi: [10.1021/ja00142a021](https://doi.org/10.1021/ja00142a021)
 25. Van Wees, B. J., van Houten, H., Beenakker, C. W. J., Williamson, J. G., Kouwenhoven, L. P., van der Marel, D., Foxon, C. T. (1988). Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas. *Physical Review Letters*, 60 (9), 848–850. doi: [10.1103/physrevlett.60.848](https://doi.org/10.1103/physrevlett.60.848)
 26. Park, J., Pasupathy, A. N., Goldsmith, J. I., Chang, C., Yaish, Y., Petta, J. R., Ralph, D. C. (2002). Coulomb blockade and the Kondo effect in single-atom transistors. *Nature*, 417 (6890), 722–725. doi: [10.1038/nature00791](https://doi.org/10.1038/nature00791)
 27. Ochs, R., Secker, D., Elbing, M., Mayor, M., Weber, H. B. (2006). Fast temporal fluctuations in single-molecule junctions. *Faraday Discuss*, 131, 281–289. doi: [10.1039/b506390f](https://doi.org/10.1039/b506390f)
 28. Kushmerick, J. G., Naciri, J., Yang, J. C., Shashidhar, R. (2003). Conductance Scaling of Molecular Wires in Parallel. *Nano Letters*, 3 (7), 897–900. doi: [10.1021/nl034201n](https://doi.org/10.1021/nl034201n)
 29. Blum, A. S., Kushmerick, J. G., Long, D. P., Patterson, C. H., Yang, J. C., Henderson, J. C., Ratna, B. R. (2005). Molecularly inherent voltage-controlled conductance switching. *Nature Materials*, 4 (2), 167–172. doi: [10.1038/nmat1309](https://doi.org/10.1038/nmat1309)
 30. Vasylyuk, S. V., Yashchuk, V. M., Viniyuchuk, O. O., Piryatinski, Y. P., Sevryukova, M. M., Gerasov, A. O., Kachkovsky, O. D. (2011). The Investigation of Relaxation Paths in Dioxaborine Anionic Polymethine Dyes Detected by Low-Temperature Time-Resolved Fluorescence. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 535 (1), 123–131. doi: [10.1080/15421406.2011.537959](https://doi.org/10.1080/15421406.2011.537959)

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вивчення контрольованого електронного переносу крізь одиночну органічну молекулу/ С. В. Василюк, Ю. А. Мягченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 50(1222). – С.29–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Изучение контролируемого электронного переноса через одиночную органическую молекулу/ С. В. Василюк, Ю. А. Мягченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.29–36. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Controlled study of electron transport through single organic molecule/ S. Vasylyuk, Y. Myahchenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.29–36 . – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Василюк Світлана Вікторівна – аспірант, Кафедра експериментальної фізики фізичного факультету інженер, Кафедра молекулярної фізики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033.

Мягченко Юрій Олександрович – Кандидат фізико-математичних наук, доцент, Кафедра експериментальної фізики фізичного факультету, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033

Василюк Светлана Викторовна – аспірант, Кафедра експериментальної фізики фізического факультета, інженер, Кафедра молекулярної фізики, Киевський національний університет имени Тараса Шевченка; вул. Владимирская, 60, г. Київ, Украина, 01033.

Мягченко Юий Александрович – Кандидат физико-математических наук, доцент, Кафедра экспериментальной физики физического факультета, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033

Myahchenko Yurii – Associate Professor, Department of Experimental Physics, Department of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01033.

Vasylyuk Svitlana – graduate student, Engineer, Department of Molecular Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv; Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01033.

УДК 535.2

П. С. ЗАДОРОЖНИЙ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОХОДЖЕННЯ СВІТЛА ЧЕРЕЗ НАПІВПРОЗОРИ СЕРЕДОВИЩА

Оскільки моделювання розповсюдження світла в середині напівпрозорих середовищ за допомогою звичайних методів має доволі значну похибку, потрібно розробити та узагальнити математичну модель що врахує всі процеси які впливають на розповсюдження світла в неоднорідних або напівпрозорих середовищах. Але враховуючи всю варіативну різноманітність середовищ важливо зауважити що для кожного окремого випадку варто розробляти індивідуальну математичну модель, що повною мірою зможе описати процес проходження випромінювання у видимому, УФ і ІЧ спектрах. В даній роботі буде розглянуте середовище у вигляді прибережної зони водойми.

Ключові слова: світлове поле, напівпрозоре середовище, неоднорідне середовище, прозорість, колоїдна система, математична модель.

Поскольку моделирование распространения света внутри полупрозрачной среды с помощью обычных методов имеет довольно значительную погрешность, нужно разработать и обобщить математическую модель что позволит учесть все процессы, воздействующие на распространение света в неоднородной или полупрозрачной среде. Но учитывая все вариативное разнообразие сред важно отметить что для каждого отдельного случая следует разрабатывать индивидуальную математическую модель, что в полной мере сможет описать процесс прохождения излучения в видимом, УФ и ИК диапазонах. В данной работе рассмотрена среда в виде прибережной зоны водоема.

Ключевые слова: световое поле, полупрозрачная среда, неоднородная среда, прозрачность, коллоидная система, математическая модель.

Since the simulation of light propagation within a semitransparent medium using conventional methods has a rather significant error, it is necessary to develop and generalize a mathematical model that will allow to take into account all processes affecting the propagation of light in an inhomogeneous or semitransparent medium. But taking into account all the variability of media, it is important to note that for each individual case, an individual mathematical model should be developed that will fully describe the process of radiation transmission in the visible, UV and IR ranges. In this paper, we consider the medium in the form of a coastal zone of a reservoir. In this paper, we analyze the radiation field in a layer of a semitransparent medium at the boundary of which collimated and noncollimating (diffuse) light flux falls. This model was used to calculate the radiation field in a reservoir, which is formed under the influence of the incident solar flux and radiation from the celestial vault. To solve the problem, an approach based on a modified method of average flows (AF-method) is considered. This method by its wide possibilities for taking into account the optical properties of the medium and boundaries along with the relative simplicity of the numerical algorithm. For solving the problem was proposed the S-transformation method, as another algorithm.

Keywords: light field, semitransparent medium, inhomogeneous medium, transparency, colloidal system, mathematical model.

Вступ. Інтерес до завдань побудови світлового та оптичного поля в напівпрозорих середовищах, де світлове поле формується падаючим колімованим (вузконаправленим) випромінюванням, обумовлений їх широким практичним значенням. Наприклад, постановки таких завдань мають місце при дослідженні кристалізації тугоплавких оксидів, що нагріваються за допомогою лазерного випромінювання [2-3]. Лазери,

як джерело світла, використовуються для вивчення дисперсних біологічних об'єктів, таких як кров людини [4]. Тепловий стан водойм визначається падаючим сонячним потоком, також представляє собою колімованість випромінювання [5]. А також безліч інших прикладів середовищ, що представляють собою колоїдну систему.

© П. С. Задорожний. 2016

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботах [3–5] поле випромінювання розраховувалося за експоненціальним законом Бугера. Більш складна модель поля випромінювання, що складається з колімованої і дифузної частин, розглядалася в роботі [2], але при цьому не враховувалося його розсіювання середовищем. В роботі [1] докладно розглянуто всі механізми взаємодії світлового поля в середині напівпрозорого середовища. В статті описана задача моделювання світлового поля в колоїдних системах, саме засновуючись на даній роботі.

В роботі [6] було проведено розглянуто декілька методів визначення поля випромінювання для характерних умов у водоймах. Дослідження були продовжені в роботі [7], де авторами була поставлена мета розробити метод рішення, який би враховував фізичні особливості переносу випромінювання у водних суспензіях і в той же час мінімізував би обсяг обчислювальних робіт. Запропонований метод трьох потоків показав гарні згоду результати з більш точним методом дискретних ординат і з експериментальними даними. Однак у вищезазначених роботах [6, 7] не враховувався власне випромінювання середовища.

У даній роботі проводиться аналіз поля випромінювання в шарі напівпрозорої середовища, на межі якої падає колімований і неколімований (дифузний) світловий потік. Дана модель була використана для розрахунку поля випромінювання у водоймі, що формується під дією падаючого сонячного потоку і випромінювання небесного зводу. Для вирішення завдання розглянуто підхід на основі модифікованого методу середніх потоків (СП-метод). Даний метод своїми широкими можливостями для обліку оптичних властивостей середовища і меж поряд з відносно простою числового алгоритму. Використовуючи метод S-перетворення було запропоновано інший алгоритм вирішення завдання.

Розрахунок виконано за допомогою програмного середовища Wolfram Mathematica, оскільки дане середовище дозволяє в повній мірі працювати зі складними математичними моделями та використовує алгоритми, що дозволяють отримати результати швидко та якісно.

Оскільки питання моделювання світлового потоку в напівпрозорих середовищах ще досі досліджено не в повній мірі і методи для розрахунку необхідно уточнювати і вдосконалювати. В даній роботі, опираючись на найбільш вдалому модифікованому методі середніх світлових потоків було запропоновано ще один спосіб вирішення задачі моделювання світлового поля в напівпрозорому середовищі. Метод що розглянутий в даній роботі має ще ряд недоліків та потребує доопрацювання, але навіть на даному етапі дає доволі значні результати і має відносно не складний алгоритм розрахунку.

Ціль та задачі дослідження. Завданням даної роботи було обрати найбільш оптимальну математичну модель для моделювання світлового поля в напівпрозорих середовищах. Було проведено моделювання світлових потоків при проходженні світла через напівпрозоре середовище в системі Mathematica з використанням методу S-перетворення опираючись на метод середніх потоків. Провівши аналіз існуючих рішень

та проведено моделювання проходження світлового поля у вигляді колімованого та дифузного оптичного потоку. Такий вид випромінювання характерний для сонячного випромінювання, а також штучним джерелам світла. Виокремлюючи ту чи іншу складову моделі можна визначити параметри модельованого оптичного поля в різних середовищах та за різних джерел випромінювання. Також ще одним з завдань є шляхом розглянення властивостей різних прозорих середовищ визначити значення терміну «напівпрозоре середовище».

В ході роботи розглянуті прозорі середовища різного агрегатного стану, а також розглянуті колоїдні системи. Спираючись на попередні дослідження [1–7].

Для визначення математичної моделі використано вдосконалений метод середніх світлових потоків, запропонований в роботі [1].

Розглянемо крайову задачу переносу випромінювання в плоскому шарі поглинаючий, випромінюючий і розсіює середовища з заданим розподілом температури $T(x)$. Поле випромінювання складається з двох частин: колімованого (поширюються в межах вузького тілесного кута) і неколімованого (дифузного) випромінювання (рис. 1):

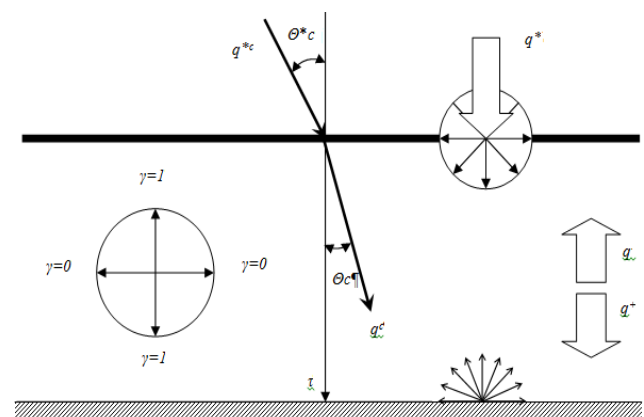


Рис. 1 Фізична схема і система координат

$$I_v^\Sigma = I_v^c + I_v \quad (1)$$

Інтенсивність колімованим випромінювання визначається законом Бугера:

$$I_v^c(\tau_v) = I_v^c(0) e^{-\tau_v/\gamma_c} \quad (2)$$

де

$$I_v^c(0) = (1 - \rho(\theta_c^*)) I_v^{*c} \quad (3)$$

I_v^{*c} інтенсивність падаючого на кордон колімованого випромінювання, $\gamma_c = \cos(\theta_c)$, кут падіння θ_c^* і заломлення θ_c колімованого випромінювання пов'язані між собою законом Снелліуса, $\rho(\theta_c^*)$ - коефіцієнт відбиття на границі розділу середовищ, визначається з закону Френеля.

Поле неколімованого випромінювання визначається рівнянням переносу

$$\begin{aligned} \gamma \frac{\partial I_v(\tau_v, \gamma)}{\partial \tau_v} + I_v(\tau_v, \gamma) = \\ = (1 - \omega_v) n_v^2 I_{bv}(T) + \frac{\omega_v}{2} \int_{-1}^1 p_v(\gamma, \gamma') I_v(\tau_v, \gamma') d\gamma' + \\ + \frac{\omega_v}{4\pi} p_v(\gamma, \gamma_c) I_v^c(0) e^{-\tau/\gamma_c} \end{aligned}$$

$$0 < \tau_v < \tau_{0v}, -1 \leq \gamma \leq 1 \quad (4)$$

з граничними умовами:

$$\begin{aligned} \tau_v = 0 : I_v^+(\gamma) = \rho_v(\gamma) I_v^-(\gamma) + \\ + \frac{n_v^2}{n_v^{*2}} (1 - \rho_v(\gamma^*)) I_v^*(\gamma^*), \gamma > 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tau_v = \tau_{0v} : I_v^-(\gamma) = \varepsilon_v n_v^2 I_{bv}(T) + \\ + 2r_v \int_0^1 (I_v^+(\gamma) \gamma + I_v^c \gamma_c) d\gamma, \gamma < 0, \end{aligned} \quad (6)$$

Тут I_v – спектральна інтенсивність випромінювання, I_v^+ і I_v^- – інтенсивності випромінювання в нижню ($\gamma > 0$) і верхню ($\gamma < 0$) півсферу:

$$\int_{-1}^1 I_v(\tau_v, \gamma) d\gamma = \int_0^1 I_v^+(\tau_v, \gamma) d\gamma + \int_{-1}^0 I_v^-(\tau_v, \gamma) d\gamma, \quad (7)$$

γ – косинус кута між напрямком поширення випромінювання і віссю координат x , $I_{bv}(T)$ – функція Планка випромінювання чорного тіла, $\tau_v = k_v x$ і $\tau_{0v} = k_v \delta$ – спектральна оптична глибина і товщина шару, δ – товщина шару (характерний розмір), $k_v = \alpha_v + \beta_v$ – спектральний коефіцієнт ослаблення, α_v і β_v – спектральні коефіцієнти поглинання і розсіювання, $\omega_v = \beta_v / k_v$ – спектральне альbedo однократно-го розсіювання (число Шустера), n_v – спектральний показник заломлення, ε_v і r_v – спектральна напівсферична дифузна випромінююча і відбивна здатність нижньої межі, пов'язані між собою співвідношенням $\varepsilon_v = 1 - r_v$, p_v – спектральна індикатриса розсіювання, яка постулюється у вигляді [8]:

$$p_v(\gamma_0) = \sum_{l=0}^L a_l P_l(\gamma_0), a_0 = 1 \quad (8)$$

де γ_0 – косинус кута між падаючим $\gamma'(\gamma_c)$ і розсіяним γ -променями, P_l поліном Лежандра порядку l . Еквівалентна система рівнянь СП-методу має вигляд [9]:

$$\frac{d}{d\tau_v} (\Phi_v^+ - \Phi_v^-) + (1 - \omega_v) (m_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \Phi_v^-) = \quad (9)$$

$$\begin{aligned} = (1 - \omega_v) \Phi_{0v} + \omega_v \Phi_v^c / \gamma_c \\ \frac{d}{d\tau_v} (m_v^+ \delta_v^+ \Phi_v^+ - m_v^- \delta_v^- \Phi_v^-) + \\ + (1 - \omega_v \bar{\varepsilon}_v) (\Phi_v^+ - \Phi_v^-) = \omega_v \bar{\varepsilon}_v \Phi_v^c \end{aligned} \quad (10)$$

Гранична умова для системи (9) - (10) на поверхні розділу повітря-вода враховує пропускання падаючого потоку і відображення у двох зонах – в області повного внутрішнього відбиття і всередині конуса заломлення [10]:

$$\tau_v = 0 : \Phi_v^+ (1 - \bar{\rho}_v) \Phi_v^* + \left(1 - \frac{n_v^{*2}}{n_v^2}\right) \Phi_v^- + \bar{\rho}_v \frac{n_v^{*2}}{n_v^2} \Phi_v^- \quad (11)$$

На нижній межі (дно водойми) враховується власне випромінювання поверхні і дифузне відбиття падаючих потоків колімованим і неколімованим випромінювання:

$$\tau_v = \tau_{0v} : \Phi_v^- = \varepsilon_v \Phi_{0v} / 4 + r_v (\Phi_v^+ + \Phi_v^-) \quad (12)$$

Для спрощення моделі, а також оскільки найбільш важливу роль в цій роботі грає проходження світла безпосередньо через напівпрозоре середовище, надалі не будемо враховувати краєві умови і зосередимося на дослідженні системи рівнянь (9-10). Але деякі складові з цих рівнянь ще не зазначені, тому:

$$\Phi_v^\pm(\tau_v) = \pm \frac{2\pi \int_{0(-1)}^{1(0)} I_v(\tau_v, \gamma) \gamma d\gamma}{4\sigma T^4} \quad (13)$$

це безрозмірні щільності напівсферичних потоків. На відміну від методу зазначеного в [1], коефіцієнти m_v^\pm та δ_v^\pm - визначені як константа для спрощення розрахунку:

$$\bar{\varepsilon}_v = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 p(\gamma) \gamma d\gamma \quad (14)$$

це середній косинус кута розсіювання.

$$\Phi_{0v} = \frac{n_v^2 I_{bv}}{4\sigma T^4} \quad (15)$$

дана складова характеризує власне випромінювання середовища за рахунок його температури, згідно закону Стефана-Больцмана. В нашій математичній моделі можна не враховувати цей показник, оскільки його значення порівняно з основним потоком буде надзвичайно мале.

Отже в результаті ми маємо систему диференціальних рівнянь (9-10), для того щоб отримати математичну модель проходження світла через напівпрозоре

середовище необхідно вирішити її відносно невідомих напівсферичних щільностей світлового потоку. Метод що представлений в роботі [1] розрахований на моделювання радіаційного теплообміну в середині середовища, але його можна виділити необхідні данні, оскільки основою для розрахунків все ж є світловий потік і модель світлового поля цілком задовольняє умовам поставленої задачі.

На відміну від розглянутої роботи розрахунок в цій роботі проведено іншим методом – вирішення системи диференціальних рівнянь за допомогою операційного методу S-перетворень. Для того щоб розпочати розрахунки необхідно визначити певні вихідні данні, що характеризують середовище поширення світлового поля.

Коефіцієнти $m_v^{\pm} = \pm 2$ та $\delta_v^{\pm} = 1/3$, вибрані такими для того щоб можна було порівняти з роботою [1], на початкових ітераціях. Для розрахунку також було обрані наступні коефіцієнти як вихідні умови: щільність колімованого світлового потоку, що падає на межу поділу середовищ дорівнює 500 Вт/м^2 , неколімованого – 200 Вт/м^2 , альbedo поверхні середовища, згідно зазначеного в роботі [1] $\omega_v = 0.75$, кут під яким падає на межу розділу середовищ випромінювання $\theta = 30^\circ$.

Для того щоб вирішити рівняння диференційної системи згідно S-операторного методу необхідно спочатку про інтегрувати рівняння (9) та (10), тоді ми отримаємо:

$$\begin{aligned} \Phi_v^+ - \Phi_v^- + (\Phi_0^+ - \Phi_0^-) + (1-\omega) m^+ \int_0^{\tau} \Phi_v^+ d\tau - \\ - (1-\omega) m^- \int_0^{\tau} \Phi_v^- d\tau = \frac{\omega}{\gamma} * \int_0^{\tau} \Phi_v^c d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} m^+ \delta^+ \Phi_v^+ - m^- \delta^- \Phi_v^- - m^+ \delta^+ \Phi_0^+ + m^- \delta^- \Phi_0^- + \\ + (1-\omega \bar{\zeta}) \int_0^{\tau} \Phi_v^+ d\tau - (1-\omega \bar{\zeta}) \int_0^{\tau} \Phi_v^- d\tau = \omega \bar{\zeta} * \int_0^{\tau} \Phi_v^c d\tau \end{aligned} \quad (17)$$

замінивши інтеграли на інтегруючі матриці P та перетворивши систему в векторну форму отримаємо:

$$(\bar{E} + a1 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^+ - (\bar{E} + a2 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^- = \bar{N} * \bar{F} * \bar{P} = \Psi_1 \quad (18)$$

$$(b1 + b2 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^+ - (b3 + b4 * \bar{P}) \bar{\Phi}_v^- = \bar{M} * \bar{F} * \bar{P} = \Psi_2 \quad (19)$$

Замінивши всі коефіцієнти на для встановлення загального вигляду отримаємо:

$$\bar{A} \bar{X}_1 - \bar{B} \bar{X}_2 = \bar{\Psi}_1 \quad (20)$$

$$\bar{C} \bar{X}_1 - \bar{D} \bar{X}_2 = \bar{\Psi}_2 \quad (21)$$

Вираз виходить схожим на звичайну алгебраїчну систему рівнянь, але головна відмінність в тому що

данні вирази це вектори. Шляхом вираження одного не відомого через інший отримаємо:

$$\bar{X}_2 = \bar{D}^{-1} * (\bar{\Psi}_2 - \bar{C} \bar{X}_1) \quad (22)$$

$$\bar{A} \bar{X}_1 - \bar{B} (\bar{D}^{-1} * (\bar{\Psi}_2 - \bar{C} \bar{X}_1)) = \bar{\Psi}_1 \quad (23)$$

Після групування у отримаємо фінальну версію:

$$\bar{X}_1 = (\bar{A} - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{C})^{-1} * (\bar{\Psi}_1 - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{\Psi}_2) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_2 = \bar{D}^{-1} * \\ * (\bar{\Psi}_2 - \bar{C} * (\bar{A} - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{C})^{-1} * (\bar{\Psi}_1 - \bar{B} * \bar{D}^{-1} * \bar{\Psi}_2)) \end{aligned} \quad (25)$$

Тоді згідно методу S-перетворення,

$$\bar{\Phi}_v^+ = \bar{X}_1^{-T} * \bar{S}(\tau) \quad (26)$$

$$\bar{\Phi}_v^- = \bar{X}_2^{-T} * \bar{S}(\tau) \quad (27)$$

В результаті ми отримаємо вектор, який і буде являти собою коренями системи.

Згідно наведених вище даних можна змоделювати вирішення методом S-перетворення в програмному середовищі Mathematica. Ось що отримали в результаті моделювання:

```
mp = 2; mn = -2; δ = 1/3; m = 2; ω = 0.75;
θ = 360/m; T = 1; γc = Cos[30]; ρ = 0.25;
εc0 = 500; εp0 = 200; εn0 = εc0 (1 - ρ);
```

Ввід початкових даних. В якості середовища було обрано мілина близько берега.

У ролі базисної функції виступає степенева функція:

```
s[τ, T, i] := (τ/T)^{i-1};
S = Table[s[τ, T, i], {i, m}];
```

Додаткові данні та визначення які необхідні для моделювання:

```
one[m_] := IdentityMatrix[m];
ξ := 0.30048;
```

Поліном інтегрування:

```
P = Table[∫_0^T S[[i]] * S[[j]] dτ, {i, m}, {j, m}];
P // MatrixForm
```

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Векторні функції згідно виведення(16–25):

```

A1 = one[m] + (1 - ω) * mp * P;
B1 = one[m] + (1 - ω) * mn * P;
C1 = one[m] * mp * δ + (1 - ω * ξ) * P;
D1 = one[m] * mn * δ - (1 - ω * ξ) * P;
ϕc1[τ_] := γc * ϕc0 * e-τ/γc;
F1 = ∫0T ϕc1[τ] dτ;
N1 =  $\frac{\omega}{\gamma}$  * F1 - one[m] * (ϕp0 - ϕn0);
M1 = ω * ξ * P * F1 - one[m] * (ϕp0 - ϕn0);

```

Система рівнянь(24), (25) записаних в програмному середовищі:

```

In[18]:= X1 = Inverse[A1 - B1.Inverse[D1].C1].
.(N1 - B1.Inverse[D1].M1);
X2 = Inverse[D1].Inverse[M1 - C1].
..(A1 * B1 * Inverse[D1].C1)].(N1 - B1.Inverse[D1].M1);

```

Рівності (26), (27) записаних в програмному середовищі:

```

In[18]:= ϕpa = Inverse[X1].Inverse[P].S;

```

```

In[19]:= ϕna = Inverse[X2].Inverse[P].S;

```

Власне відповіді:

```

In[21]:= ϕpa

```

```

Out[21]:= {0.022322 - 0.0284703 τ, -0.027927 + 0.0602877 τ}

```

```

In[22]:= ϕna

```

```

Out[22]:= {-1.8735 + 1.53976 τ, 1.47687 - 3.96069 τ}

```

Моделювання щільності світлового потоку, в залежності від товщини шару, пройденого світлом:

```

In[31]:= Plot[{ϕpa, ϕna, ϕc1[τ]},
{τ, 0, T}, PlotRange -> Full]

```

Як видно з рис. 1 додаткові складові півсферичних потоків не мають значного впливу на загальний світловий потік, за рахунок того що в нас присутній потужний колімований потік, що в рази перевищує щільність дифузно-розсіяного потоку.

І на кінець сумарний світловий потік рис. 3:

```

In[27]:= Plot[ϕpa + ϕna + ϕc1[τ], {τ, 0, T}]

```

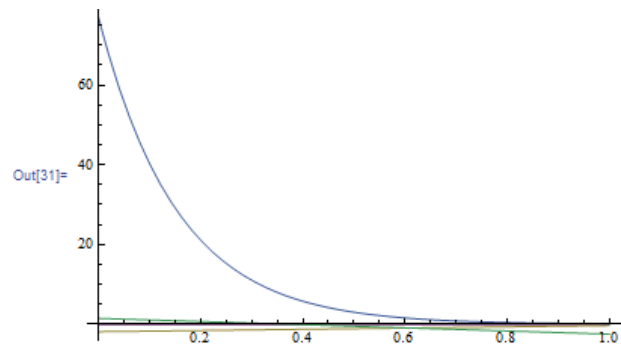


Рис. 2 – Крива щільності окремих складових світлового потоку, в залежності від товщини шару

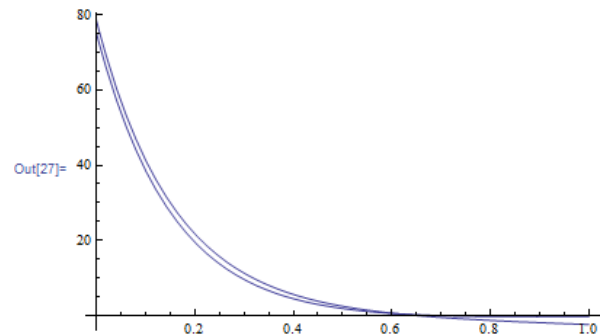


Рис. 3 – Крива загальної щільності світлового потоку, в залежності від товщини шару

Висновки. Як видно з результатів розрахунків, при великій різниці в значеннях колімованого і неколімованого світлових потоків, дифузна складова не має значного впливу на результат. Але за умов коли колімований світловий потік відсутній(сутінки) то дифузна складова є єдиним потоком що потрапляє в середовище.

Тобто математична модель та метод розрахунку дає можливість зрозуміти процеси що відбуваються всередині напівпрозорого середовища, без значних зусиль як в плані алгоритму так і в плані складності розрахунку. Даний метод дозволяє швидко оцінити ситуацію без великих затрат в часі, що робить його зручним в підготовчих роботах перед складним моделюванням або при підготовкою до експерименту.

Список літератури:

1. Тимофеев, А. М. Расчет поля излучения в полупрозрачной среде с учетом падающего коллимированного излучения [Текст] / А. М. Тимофеев // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19, № 1. – С. 67–74.
2. Воробьев, А. Ю. Быстрый нагрев и плавление оксида алюминия при воздействии концентрированного лазерного излучения [Текст] / А. Ю. Воробьев, В. А. Петров, В. Е. Тумов // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45, № 4. – С. 533–542.
3. Li J.F., Li L., Stott F.H. Comparison of volumetric and surface heating sources in the modeling of laser melting of ceramic materials [Text] / J. F. Li, L. Li, F.H. Stott // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47. – P. 1159–1174. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002)
4. Bukatyj, V. I. Vzaimodejstvie niz-kointensivnogo lazernogo izlucheniya s krov'ju cheloveka [Текст] / V. I. Bukatyj Ja. V. Pavlova S. I. Sakovich O. V. Gas'kova G. G. Ustinov // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2007. – Т. 310, № 2. – С. 121–125.
5. Snider, D. M. Radiation induced thermal stratification in surface layers of stagnant water [Text] / D. M. Snider, R. Viskanta //

- Journal of Heat Transfer. – 1975. – № 97 (1). – P. 35–40. doi: [10.1115/1.3450284](https://doi.org/10.1115/1.3450284)
6. Daniel, K. J. Prediction of radiation absorption and scattering in turbid water bodies [Text] / K. J. Daniel, N. M. Laurendeau, F. P. Incropera // Journal of Heat Transfer. – 1979. – № 101 (1). – P. 63–67. doi: [10.1115/1.3450937](https://doi.org/10.1115/1.3450937)
 7. Incropera, F. P. A Three-flux method for predicting radiative transfer in aqueous suspensions [Text] / F. P. Incropera, W. G. Houf // Journal of Heat Transfer. – 1979. – № 101 (3). – P. 496–501. doi: [10.1115/1.3451016](https://doi.org/10.1115/1.3451016)
 8. Evans, L. B. The Effect of anisotropic scattering on radiant transport [Text] / L. B. Evans, C. M. Chu, S. W. Churchill // Journal of Heat Transfer. – 1965. – Vol. 87, No. 3. – P. 381–387. doi: [10.1115/1.3689120](https://doi.org/10.1115/1.3689120)
 9. Рубцов, Н. А. Комбинированный теплообмен в полупрозрачных средах [Текст] / Н. А. Рубцов, А. М. Тимофеев, Н. А. Саввинова. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 198 с.
 10. Рубцов, Н. А. О представлении граничных условий в задачах радиационного теплообмена в многослойных системах [Текст] / Н. А. Рубцов, А. М. Тимофеев // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – Т. 5, №. 4. – С. 479–485.
 3. Li, J. F., Li, L., Stott, F. H. (2004). Comparison of volumetric and surface heating sources in the modeling of laser melting of ceramic materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47(6-7), 1159–1174. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.002)
 4. Bukatyj, V. I., Pavlova, Ja. V., Sakovich, S. I., Gas'kova, O. V., Ustinov, G. G. (2007). Vzaimodejstvie niz-kointensivnogo lazernogo izlucheniya s krov'ju cheloveka. Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 310 (2), 121–125.
 5. Snider, D. M., Viskanta, R. (1975). Radiation Induced Thermal Stratification in Surface Layers of Stagnant Water. Journal of Heat Transfer, 97 (1), 35–40. doi: [10.1115/1.3450284](https://doi.org/10.1115/1.3450284)
 6. Daniel, K. J., Laurendeau, N. M., Incropera, F. P. (1979). Prediction of Radiation Absorption and Scattering in Turbid Water Bodies. Journal of Heat Transfer, 101 (1), 63–67. doi: [10.1115/1.3450937](https://doi.org/10.1115/1.3450937)
 7. Incropera, F. P., Houf, W. G. (1979). A Three-Flux Method for Predicting Radiative Transfer in Aqueous Suspensions. Journal of Heat Transfer, 101 (3), 496–501. doi: [10.1115/1.3451016](https://doi.org/10.1115/1.3451016)
 8. Evans, L. B., Chu, C. M., Churchill, S. W. (1965). The Effect of Anisotropic Scattering on Radiant Transport. Journal of Heat Transfer, 87 (3), 381–387. doi: [10.1115/1.3689120](https://doi.org/10.1115/1.3689120)
 9. Rubcov, N. A., Timofeev, A. M., Cavvinova, N. A. (2003). Kombinirovannyj teploobmen v poluprozrachnyh sredah. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 198.
 10. Rubcov, N. A., Timofeev, A. M. (1998). O predstavlenii granichnyh uslovij v zadachah radiacionnogo teploobmena v mnogoslojnyh sistemah. Teplofizika i ajeromehanika, 5 (4), 479–485.

Bibliography (transliterated):

1. Timofeev, A. M. (2012). Raschet polja izlucheniya v poluprozrachnoj srede s uchetoм padajushhego kollimirovannogo izlucheniya. Teplofizika i ajeromehanika, 19 (1), 67–74.
2. Vorob'ev, A. Ju., Petrov, V. A., Titov, V. E. (2007). Bystryj nagrev i plavlenie oksida aljuminija pri vozdejstvii koncentrirovannogo lazernogo izlucheniya. Teplofizika vysokih temperatur, 45 (4), 533–542.

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование прохождения света через полупрозрачные среды/ П. С. Задорожний// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.36–41. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование прохождения света через полупрозрачные среды/ П. С. Задорожний// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.36–41. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Modeling the passage of light through semitransparent media/ P. Zadorozhnyi //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.36–41. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Задорожний Павло Сергійович – аспірант, Відділення гібридних моделюючих та керуючих систем в енергетиці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова; вул. Генерала Наумова, 15, м. Київ, Україна, 03164; e-mail: pavelzp@gmail.com.

Задорожний Павел Сергеевич – аспірант, Отделение гибридных моделирующих и управляющих систем в энергетике Института проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова; ул. Генерала Наумова, 15, г. Киев, Украина., 03164; e-mail: pavelzp@gmail.com.

Zadorozhnyi Pavel – graduate student, Department of Hybrid Modeling and Control Systems in Power Engineering, Institute of Modeling Problems in Power Engineering named after. G. Pukhov; General Naumov str., 15, Kiev, Ukraine., 03164; e-mail: pavelzp@gmail.com.

УДК667.64:678.026

О. В. ХОДАКОВСЬКИЙ, М. Ю. АМЕЛІН, С. О. СМЕТАНКІН, О. В. АКІМОВ, В. М. ЯЦЮК**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРААМІНОАЗОБЕНЗОЛУ НА АДГЕЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОЇ МАТРИЦІ ДЛЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

Показано, що одним з основних засобів регулювання структури та властивостей полімерних композитів є їх фізична модифікація. Доведено, що введення у зв'язувач пластифікаторів та наповнювачів дозволяє поліпшити властивості матеріалів. Акцентовано увагу, що важливе значення у покращенні властивостей композитів має введення модифікаторів за незначної кількості.

У роботі було досліджено вплив модифікатора парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці. У результаті аналізу отриманих даних встановлено оптимальну концентрацію модифікатора, за якої забезпечують максимальні показники адгезійної міцності матриці при відриві від сталеві основи марки Ст 3.

Обґрунтовано, що модифікатор, взаємодіючи з епоксидним олігомером у процесі полімеризації зв'язувача, активує процеси взаємодії на межі поділу фаз «адгезив – субстрат». Це забезпечує отримання матеріалу не лише з поліпшеними показниками адгезійної міцності, але й з незначними залишковими напруженнями.

Ключові слова: матриця, епоксидний композит, модифікатор, адгезійні властивості, міцність, основа, залишкові напруження.

Показано, что одним из основных средств регулирования структуры и свойств полимерных композитов является их физическая модификация. Доказано, что введение в связующее пластификаторов и наполнителей позволяет улучшить свойства материалов. Акцентировано внимание, что важное значение в улучшении свойств композитов имеет введение модификаторов при незначительном количестве.

В работе было исследовано влияние модификатора парааминоазобензола на адгезионные свойства эпоксидной матрицы. В результате анализа полученных данных установлено оптимальную концентрацию модификатора, при которой обеспечивают максимальные показатели адгезионной прочности матрицы при отрыве от стальной основы марки Ст 3.

Обосновано, что модификатор, взаимодействуя с эпоксидным олигомером в процессе полимеризации связующего, активует процессы взаимодействия на границе раздела фаз «адгезив – субстрат». Это обеспечивает получение материала не только с улучшенными показателями адгезионной прочности, но и с незначительными остаточными напряжениями.

Ключевые слова: матрица, эпоксидный композит, модификатор, адгезионные свойства, прочность, основа, остаточные напряжения.

It is shown that one of the main means of regulating the structure and properties of polymer composites is their physical modification. It is proved that the introduction of binder plasticizers and fillers allows improving the properties of materials. Attention has been paid to the fact that the introduction of modifiers with an insignificant amount is of great importance in improving the properties of composites.

The effect of the paraaminoazobenzene modifier on the adhesion properties of the epoxy matrix was investigated. As a result of the analysis of the obtained data, the optimal concentration of the modifier is established, at which the maximum adhesion strength of the matrix is provided when it is separated from the St 3 steel base.

It is substantiated that the modifier, interacting with the epoxy oligomer during the polymerization of the binder, activates the interaction processes at the interface of the «adhesive – substrate» phases. This provides a material not only with improved adhesion strength, but also with low residual stresses.

Keywords: matrix, epoxy composite, modifier, adhesion properties, strength, base, residual stresses.

Вступ. Сучасні судна флоту мають велику автономність плавання, високі ходові і морехідні якості. Енергоздатність і насиченість суден численним і складним за своїм складом промисловим та технологічним обладнанням дозволяють успішно вирішувати завдання з видобутку та переробки морепродуктів, а також перевезення вантажів.

Виробнича діяльність промислових суден найчастіше відбувається у складних метеорологічних умовах, при необхідності швартування суден у відкритому морі. Тому тільки добре організоване технічне обслуговування та ремонт суден промислового флоту можуть забезпечити планову тривалість їх перебування в експлуатації і виконання планових завдань.

Технічне обслуговування та ремонт необхідно виконувати для підтримки працездатності та технічного стану суден на необхідному рівні впродовж усього терміну експлуатації при зношенні його елементів. Технічне обслуговування входить в прямі обов'язки судового екіпажу і виконується під час експлуатації судна.

Ремonti різних видів можуть виконуватися як з виведенням судна з експлуатації, так і поєднуватися з міжрейсовими стоянками та іншими видами планових простой судна. При цьому ремонт відрізняється від технічного обслуговування не тільки великим обсягом відновлювальних робіт, але й джерелами їх

фінансування. Ремonti можуть виконуватися судноремонтними підприємствами, береговими ремонтними бригадами, судовими ремонтними бригадами, базами технічного обслуговування і судовим екіпажем. Під ремонтом судна розуміється комплекс операцій з відновлення справного або працездатного стану судна на певний період. Метою ремонту суден є усунення дефектів матеріальної частини судна, що виникли в результаті природного зносу, порушень правил технічної експлуатації або недостатньої надійності і проектних недоробок при побудові судна.

Збільшення обсягів судноремонтного виробництва обумовлене наявністю в експлуатації різних типів як вітчизняних, так закордонних суден. У цих умовах скорочення тривалості заводських ремонтів і зниження їх вартості мають першорядне значення як фактори, які безпосередньо і суттєво впливають на ефективність і рентабельність експлуатації суден.

Великі можливості в інтенсифікації судноремонтного виробництва має подальше підвищення його організаційного рівня, що визначається ступенем використання принципів потокового виробництва, організацією комплексних ремонтних бригад, впровадження нових технологічних процесів. Завданням ремонтів суден є не тільки відновлення основних фондів – суден, а й підтримку їх справного технічного стану на належному рівні, забезпечення працездат

© О. В. Ходаковський, М. Ю. Амелін, С. О. Сметанкін,
О. В. Акімов, В. М. Яцюк. 2016

ності і надійності обладнання і механізмів для підвищення показників ефективності технічної експлуатації суден. Останнє реалізується, наприклад, роботами з переобладнання, модернізації суден та їх пристроїв, впровадження в практику ремонту суден передових досягнень науки і техніки, які дозволяють збільшити довговічність і надійність механізмів при виробництві і ремонті.

Перспективним при капітальному чи поточному ремонті є застосування полімерних композитів. Це дозволяє суттєво поліпшити фізико-механічні, теплофізичні, антикорозійні та інші експлуатаційні характеристики комплексів та механізмів під впливом статичних і динамічних навантажень. Актуальним є використання полімерних композитних матеріалів (КМ) на основі епоксидних зв'язувачів, дисперсних і волокнистих наповнювачів. Такі матеріали відзначаються доброю технологічністю при нанесенні на деталі зі складним профілем поверхні та підвищеними експлуатаційними характеристиками при критичних умовах роботи. Розроблення нових матеріалів з поліпшеними властивостями не можливе без наукових досліджень їх експлуатаційних характеристик. На жаль, не достатньо уваги приділено дослідженню впливу міжфазових явищ при структуроутворенні композитів на їхні властивості, особливо при науково-обґрунтованому введенні добавок, у тому числі модифікаторів. Фізичні і хімічні процеси при формуванні матеріалів на межі поділу фаз охоплюють увесь комплекс реакцій взаємодії макромолекул олігомера з активними центрами добавки. Це зумовлює формування матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які регулюються технологічними режимами формування композитів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Відомо [1–4], що серед існуючих полімерів відзначаються поліпшеними властивостями у комплексі матеріали на основі епоксидного зв'язувача. Епоксидний олігомер характеризується реакційноздатними епоксидними і гідроксильними групами, які можуть вступати у хімічні реакції з твердником, у результаті чого формується сіткова структура КМ. Для поліпшення властивостей матеріалів на основі епоксидної смоли у зв'язувач вводять модифікатори і наповнювачі різної фізичної природи та дисперсності [5–12]. Наявність даних інгредієнтів за критичного вмісту покращує не лише властивості матеріалів, але й збільшує їх економічність за рахунок збільшення міжремонтного періоду експлуатації. Перспективним у цьому плані є використання модифікатора парааміноазобензолу, який містить компоненти, що активно взаємодіють із епоксидними зв'язувачами. Застосування даного модифікатора дає можливість не лише змінити надмолекулярну структуру епоксидної матриці, але й поліпшити її механічні властивості [6, 7].

Мета роботи – встановити вплив модифікатора парааміноазобензолу на адгезійну міцність епоксидної матриці до металевої основи.

Матеріали та методика дослідження. Виходячи з наведеного вище, як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Структурна формула і модель епоксидного діанового

олігомеру ЕД-20 наведена на рис. 1. Як модифікатор використано парааміноазобензол (ПААБ). Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 (тут і далі за текстом мас.ч. наводять на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20). Молекулярна маса парааміноазобензолу – 197. Температура плавлення – 400 К. Модифікатор розчинний у бензолі, етанолі, ацетоні, малорозчинний у воді. Використовується як азобарвник та синтон для одержання більш складних азобарвників. Структурну формулу модифікатора наведено на рис. 2.

Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78), що дозволяє затверджувати матеріали при кімнатних температурах. Відомо, що ПЕПА є низькомолекулярною речовиною, яка складається з таких взаємозв'язаних компонентів: $[-CH_2-CH_2-NH-]_n$. Структурну формулу і модель фрагменту твердника ПЕПА наведено на рис. 3. Різні стадії зшивання моделювали і досліджували при введенні твердника у композицію за вмісту 10 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 з метою визначення оптимального для відповідних характеристик співвідношення компонентів у системі «зв'язувач – модифікатор». Характеристики епоксидного діанового олігомеру, модифікатора і твердника наведено у табл. 1.

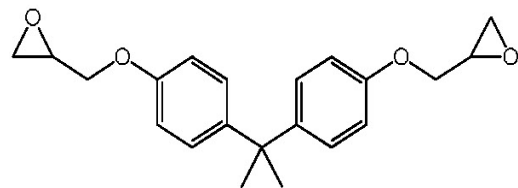


Рис. 1 – Структурна формула фрагменту епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 [10]

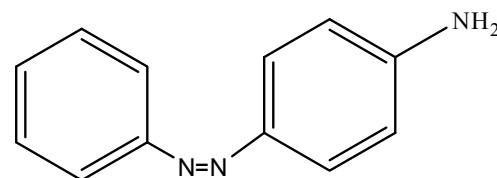


Рис. 2 – Загальний вигляд хімічних зв'язків модифікатора парааміноазобензолу

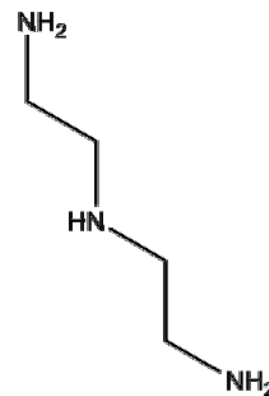


Рис. 3 – Структурна формула фрагменту твердника ПЕПА [10]

Таблиця 1 – Характеристики компонентів епоксидного зв'язувача

Характеристики	Епоксидний олігомер ЕД-20	Модифікатор ПААБ	Твердник ПЕПА
Молекулярна маса	390...430	197	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,5	–	–
Вміст гідроксильних груп, %	1,25	–	–
Середня функціональність за епоксидними групами, f_n	2,0	–	–
Вміст азоту, %	–	21,32	19,5...22,0
Вміст вуглецю, %	–	73,10	–
Вміст водню, %	–	5,58	–
В'язкість, η , Па·с	13...20	–	0,9
Густина, ρ , г/см ³	1,16	–	1,05

Епоксидні композити формували за такою технологією: підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; гідродинамічне суміщення олігомеру і модифікатора впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Затверджували КМ за режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

Адгезійну міцність матриці до металевої основи досліджували, вимірюючи руйнівні напруження («метод грибків») при рівномірному відриві пари склеєних зразків згідно ГОСТ 14760 - 69. Дослідження адгезійної міцності при зсуві проводили згідно ГОСТ 14759 - 69, аналогічно вимірюючи силу відривання клейових з'єднань зразків на автоматизованій розривній машині УМ-5 при швидкості навантаження $v = 10$ м/с. Діаметр робочої частини зразків при відриві становив $d = 25$ мм. Слід зазначити, що площа склеювання зразків, які досліджували при відриві та зсуві, була однаковою.

Залишкові напруження у матриці визначали консольним методом [8]. Покриття товщиною $\delta = 0,3...0,8$ мм формували на металевій основі. Параметри основи: загальна довжина $l = 100$ мм, робоча довжина $l_0 = 80$ мм, товщина $\delta = 0,3$ мм.

Відхилення значень при дослідженнях показників адгезійних властивостей і залишкових напружень у КМ становило 4...6 % від номінального.

Результати дослідження та їх обговорення. Дослідження адгезійної міцності модифікованих матеріалів. Експериментально встановлено, що адгезійна міцність при відриві епоксидної матриці від сталеві основи марки Ст 3 становить $\sigma_a = 24,8$ МПа, при зсуві $\tau = 8,5$ МПа, а залишкові напруження $\sigma_3 = 1,4$ МПа. Показано (рис. 4), що введення у епоксидний зв'язувач модифікатора ПААБ приводить до поліпшення адгезійних властивостей матеріалів. Зокрема, введення у епоксидний олігомер модифікатора

за незначного вмісту ($q = 0,10...0,25$ мас.ч.) приводить до підвищення показників адгезійної міцності при відриві КМ від сталеві основи від $\sigma_a = 24,8$ МПа до $\sigma_a = 28,4...32,0$ МПа. При подальшому збільшенні вмісту модифікатора ($q = 0,50...0,75$ мас.ч.) спостерігали монотонне підвищення показників адгезійної міцності при відриві КМ до $\sigma_a = 42,5...42,8$ МПа. Максимальне збільшення адгезійної міцності при відриві КМ ($\sigma_a = 43,7$ МПа) спостерігали за вмісту модифікатора в матриці у кількості $q = 1,00...1,50$ мас.ч. (рис. 4). Надалі збільшення вмісту модифікатора БД до $q = 2,00$ мас.ч. призводить до суттєвого погіршення адгезійних властивостей КМ до сталеві основи. У цьому випадку адгезійна міцність матриці становить $\sigma_a = 37,2$ МПа. Наведені вище результати дослідження дозволяють констатувати про позитивний вплив модифікатора, особливо за його незначних концентрацій, на перебіг процесів структуроутворення матриці, що, як наслідок, забезпечує поліпшення її адгезійних властивостей до сталеві основи.

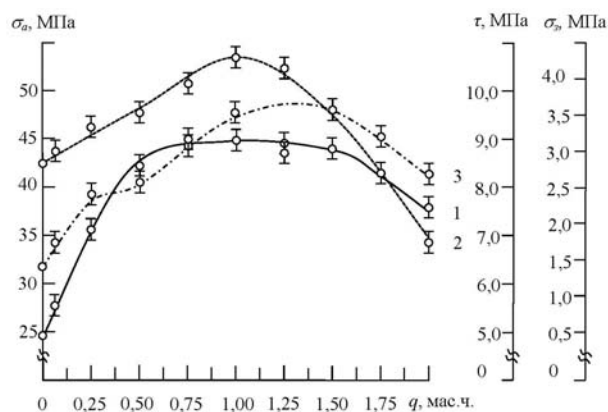


Рис. 4 – Залежність адгезійної міцності і залишкових напружень у КМ від вмісту модифікатора парааміноазобензолу: 1 – адгезійна міцність при відриві (σ_a); 2 – адгезійна міцність при зсуві (τ); 3 – залишкові напруження (σ_3). Матеріал основи – сталь марки Ст 3.

На кривій залежності адгезійної міцності при зсуві сталеві основи марки Ст 3 (рис. 4, крива 2) виявлена схожа тенденція. Зокрема, при введенні модифікатора ПААБ за вмісту $q = 0,10...0,25$ мас.ч. спостерігали підвищення показників адгезійної міцності від $\tau = 8,5$ МПа (для вихідної матриці) до $\tau = 9,0...9,2$ МПа. Надалі при введенні модифікатора за вмісту $q = 1,00$ мас.ч. спостерігали максимальне

підвищення показників адгезійної міцності при зсуві до $\sigma_r = 10,4$ МПа. Слід підкреслити, що пік кривої залежності адгезійної міцності при зсуві від вмісту модифікатора співпадає з аналогічним максимумом кривої залежності показників адгезійної міцності при відриві від концентрації добавки. Враховуючи те, що отримані результати корелюють, можна стверджувати про достовірність даних експерименту. Як зазначено вище, виявлена динаміка адгезійних властивостей розроблених КМ характеризує явище взаємодії модифікатора з компонентами зв'язувача, що активує фізико-хімічні процеси структуроутворення КМ. Водночас доведено, що збільшення вмісту модифікатора до $q = 1,50 \dots 2,00$ мас.ч. призводить до значного зменшення показників адгезійної міцності, що нівелює можливість його використання за такого вмісту у подальшому.

Не менш важливим є дослідження залишкових напружень у КМ. Встановлено, що значення залишкових напружень у матриці, обробленої ультразвуком, становить $\sigma_3 = 1,4$ МПа. Показано (рис. 4, крива 3), що введення модифікатора ПААБ у кількості $q = 0,10 \dots 0,25$ мас.ч. призводить до незначного збільшення залишкових напружень до $\sigma_3 = 2,0 \dots 2,2$ МПа. При введенні модифікатора у кількості $q = 0,50 \dots 1,50$ мас.ч. залишкові напруження значно зростають і становлять $\sigma_3 = 2,4 \dots 3,2$ МПа, досягаючи максимуму на кривій залежності « $\sigma_3 - q$ ». Слід зазначити, що при цьому адгезійна міцність при відриві у цьому випадку також збільшується (рис. 4, крива 1). Подальше збільшення кількості модифікатора до $q = 2,00$ мас.ч. призводить до суттєвого зменшення залишкових напружень до $\sigma_3 = 2,6$ МПа.

Підсумовуючи наведене вище, можна констатувати, що динаміка залишкових напружень від вмісту модифікатора добре узгоджується з результатами експериментальних досліджень адгезійної міцності при відриві та зсуві. Водночас слід зауважити, що максимальні значення адгезійних властивостей у комплексі ($\sigma_a = 43,7$ МПа, $\tau = 10,4$ МПа) спостерігали для КМ із вмістом модифікатора у кількості $q = 1,0$ мас.ч. При цьому такий матеріал характеризується незначними показниками залишкових напружень – $\sigma_3 = 2,8$ МПа.

Висновки На основі проведених досліджень можна констатувати наступне. Встановлено оптимальний вміст модифікатора парааміноазобензолу в епоксидній матриці з поліпшеними адгезійними властивостями. Доведено, що для формування матриці з покращеними адгезійними властивостями до сталюї основи необхідно у епоксидний олігомер (100 мас.ч.) вводити модифікатор парааміноазобензол у кількості $q = 1,0$ мас.ч. У цьому випадку формується матеріал, який відзначається наступними властивостями: адгезійна міцність при відриві – $\sigma_a = 43,7$ МПа, адгезійна міцність при зсуві – $\tau = 10,4$ МПа, залишкові напруження – $\sigma_3 = 2,8$ МПа.

Список літератури:

1. Чернин, И.З. Эпоксидные полимеры и композиции [Текст] / И.З. Чернин, Ф.М. Сметов, Ю.В. Жердев. – М.: Химия, 1982. – 232 с.

2. Тхір, І.Г. Фізико-хімія полімерів [Текст]: навч. посібник / І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
3. Букетов, А. В. Исследование влияния 1,4-бис(N,N-диметилдитиокарбамато)бензена на механические свойства эпоксидной матрицы [Текст] / А. В. Букетов, А. А. Сапронов, В. М. Яцюк, Б. Д. Гришук, В. С. Барановский // Пластические массы. – 2014. – № 3-4. – С. 26–34.
4. Букетов, А. В. Исследование влияния модификатора 4,4'-метиленис(4,1-фенилен)бис(N,N-диэтилдитиокарбамата) на структуру и свойства эпоксидной матрицы [Текст] / А. В. Букетов, А. А. Сапронов, В. Н. Яцюк, В. О. Скирденко // Пластические массы. – 2014. – № 7-8. – С. 9–16.
5. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю. А. Михайлин. – Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2009. – 660 с.
6. Богданова, Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов [Текст] / Ю. Г. Богданова. – М.: Научно-образовательный центр по нанотехнологиям, 2010. – 68 с.
7. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология [Текст]: учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
8. Корякина, М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий [Текст] / М. И. Корякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
9. Стухляк, П. Д. Эпоксидно-дианові композити: технологія формування, фізико-механічні і теплофізичні властивості [Текст] / П. Д. Стухляк, А. В. Букетов, О. І. Редько. – Тернопіль: Крок, 2011. – 165 с.
10. Букетов, А. В. Исследование физико-механических свойств композитных материалов на основе эпоксидиановой смолы, отвержденной полиэтиленполиамином, с добавлением пластификатора-антипирена трихлорэтилфосфата [Текст] / А. В. Букетов, А. В. Акимов, Д. А. Зинченко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 5. – С. 126–134.
11. Яновский, Ю. Г. Оценки эффекта усиления при наполнении эпоксидных связующих наноразмерными частицами различной природы (компьютерные прогнозы) [Текст] / Ю. Г. Яновский, Е. А. Никитина, С. М. Никитин, Ю. Н. Карнет // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2014. – Т.20, № 1. – С. 34–57.
12. Яновский, Ю. Г. Композиты на основе полимерных матриц и углеродно-силикатных нанонаполнителей. Квантово-механическое исследование механических свойств, прогнозирование эффекта усиления [Текст] / Ю. Г. Яновский, Е. А. Никитина, С. М. Никитин, Ю. Н. Карнет // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т.15, № 4. – С. 66–89.

Bibliography (transliterated):

1. Chernin, I. Z., Smehov, F. M., Zherdev, Ju. V. (1982). Jepoksidnye polimery i kompozicii. Moscow: Himija, 232.
2. Tkhir, I., Humenetskyi, T. (2005). Fyzyko-khimiia polimeriv: navch. posibnyk. Lviv: Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika», 240.
3. Buketov, A. V., Saproinov, A. A., Yatsiuk, V. M., Hryshchuk, B. D., Baranovskiy, V. S. (2014). Issledovanie vlijanija 1,4-bis(N,N-dimetilditiokarbamato)benzena na mehanicheskie svojstva epoksidnoj matricy. Plasticheskie massy, 3-4, 26–34.
4. Buketov, A., Saproinov, A., Yatsiuk, V., Skyrdenko, V. (2014). Issledovanie vlijanija modifikatora 4,4'-metilenbis(4,1-fenilen)bis(N,N-dijetiliditiokarbamata) na strukturu i svojstva jepoksidnoj matricy. Plasticheskie massy, 7-8, 9–16.
5. Mihajlin, Ju. A. (2009). Special'nye polimernye kompozicionnye materialy, Saint-Petersburg: Nauchnye osnovy i tehnologii, 660.
6. Bogdanova, Ju. G. (2010). Adgezija i ee rol' v obespechenii prochnosti polimernyh kompozitov. Moscow: Nauchno-obrazovatel'nyj centr po nanotehnologijam, 68.
7. Kerber, M. L., Vinogradov, V. M., Golovkin, G. S. (2008). Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tehnologija. Saint-Petersburg: Professyia, 560.
8. Korjakina, M. I. (1988). Ispytanie lakokrasochnyh materialov i pokrytij. Moscow: Himija, 272.
9. Stukhliak, P. D., Buketov, A. V., Redko, O. I. (2011). Epoksydno-dianovi kompozity: tekhnolohiia formuvannia, fzyko-mekhanichni i teplofizychni vlastyvyosti, Ternopil: Krok, 165.

10. Buketov, A. V., Akymov, A. V., Zynchenko, D. A. (2015). Issledovanie fiziko-mehaniicheskikh svoystv kompozitnykh materialov na osnove jepoksidianovoy smoly, otverzhdennoy polijetilenpoliaminom, s dobavleniem plastifikatora-antipirena trihlorjetilfosfata. VVisnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tehnichni nauki, 5, 126–134.
11. Janovskij, Ju. G., Nykytyna, E. A., Nykytyn, S. M., Karnet Yu. N. (2014). Ocenki jeffekta usilenija pri napolnenii jepoksidnykh svjazujushhih nanorazmernymi chasticami razlichnoj prirody (komp'juternye prognozy). Mehanika kompozicionnykh materialov i konstrukcij, 20 (1), 34–57.
12. Janovskij, Ju. G., Nykytyna, E. A., Nykytyn, S. M., Karnet Yu. N. (2009). Kompozity na osnove polimernykh matric i uglerodno-silikatnykh nanopolnitelej. Kvantovo-mehaniicheskoe issledovanie mehaniicheskikh svoystv, prognozirovanie jeffekta usilenija. Mehanika kompozicionnykh materialov i konstrukcij, 15 (4), 66–89.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту/ О. В. Ходаковський, М. Ю. Амелін, С. О. Сметанкін, О. В. Акімов, В. М. Яцюк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.42–46. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование влияния парааминоазобензола на адгезионные свойства эпоксидной матрицы для защитных покрытий средств транспорта/ А. В. Ходаковский, М. Ю. Амелин, С. А. Сметанкин, А. В. Акимов, В. Н. Яцюк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.42–46. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of the effect of paraaminoazobenzene on the adhesion properties of epoxy matrix for protective coatings of vehicles/ A. Khodakovsky, M. Amelin, S. Smetankin, A. Akimov, V. Yatsyuk//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.42–46. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ходаковський Олексій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Кафедра судноводіння та безпеки життєдіяльності на морі, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Амелін Максим Юрійович – аспірант, Кафедра експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Сметанкін Сергій Олексійович – аспірант, Кафедра транспортних технологій, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Акімов Олександр Вікторович – Кандидат технічних наук, доцент, Кафедра транспортних технологій, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Яцюк Віталій Миколайович – кандидат хімічних наук, Тернопільський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, вул. С. Будного, 48, м. Тернопіль, 46027

Ходаковський Олександр Володимирович – Кандидат технічних наук, доцент, Кафедра судового водіння та безпеки життєдіяльності на морі, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Амелін Максим Юрьевич – аспірант, Кафедра експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Сметанкин Сергей Алексеевич – аспірант, Кафедра транспортних технологій, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Акимов Александр Викторович – Кандидат технічних наук, доцент, Кафедра транспортних технологій, Херсонська державна морська академія, пр. Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000.

Яцюк Віталій Николаевич – Кандидат хімічних наук, Тернопільський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, вул. С. Будного, 48, м. Тернопіль, 46027

Khodakovsky Oleksii – PhD, Associate Professor, Department of navigation and safety of life at sea, Kherson State Maritime Academy, Ushakova ave., 20, Kherson, Ukraine, 73000.

Amelin Maksym – graduate student, Department of operation of ship power plants, Kherson State Maritime Academy, Ushakova ave., 20, Kherson, Ukraine, 73000.

Smetankin Serhii – graduate student, Department of Transport Technologies, Kherson State Maritime Academy, Ushakova ave., 20, Kherson, Ukraine, 73000.

Akimov Aleksandr – PhD, Associate Professor, Department of Transport Technologies, Kherson State Maritime Academy, Ushakova ave., 20, Kherson, Ukraine, 73000.

Yatsyuk Vitalii – PhD, Ternopil Research Forensic Center of MIA of Ukraine, S. Budnoho str., 48, Ternopil, Ukraine, 46027.

УДК 621.301

В. В. ЛЕОНТЬЕВА, Н. А. КОНДРАТЬЕВА**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В НЕКОТОРОМ КЛАССЕ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В работе проводится анализ чувствительности позитивной динамической системы балансового типа, поведение которой описывается разомкнутой непрерывной математической моделью с ограничениями, обеспечивающими получение неотрицательных решений на бесконечном интервале времени. Для исследуемой системы построены уравнения чувствительности по каждому из параметров системы, в результате решения которых получены функции чувствительности системы. По результатам исследования проведены вычислительные эксперименты, результаты которых соответствуют результатам проведенных в работе теоретических исследований оценивания чувствительности.

Ключевые слова: позитивная система, продуктивность, непрерывная модель, чувствительность, функция чувствительности, уравнение чувствительности.

В роботі проводиться аналіз чутливості позитивної динамічної системи балансового типу, поведінка якої описується розімкненою неперервною математичною моделлю з обмеженнями, що забезпечують отримання невід'ємних розв'язків на нескінченному інтервалі часу. Для досліджуваної системи побудовано рівняння чутливості за кожним з параметрів системи, в результаті розв'язання яких отримано функції чутливості системи. За результатами дослідження проведено обчислювальні експерименти, результати яких відповідають результатам проведених в роботі теоретичних досліджень оцінювання чутливості.

Ключові слова: позитивна система, продуктивність, неперервна модель, чутливість, функція чутливості, рівняння чутливості.

The analysis of the parametric sensitivity of the main characteristics of the positive dynamical system of balanced type, the behavior of which is described by opened continuous mathematical model with constraints that ensure the obtaining of non-negative solutions on an infinite intervals of time, is given in this work. The dependence of the results obtained from the model on the variation of the parameters of the initial mathematical model of the positive dynamical system is determined.

For the analysis of parametric sensitivity, for the investigated positive system the sensitivity equations for each of the system parameters are constructed. According to the results of solving the sensitivity equations, the sensitivity functions are obtained in this work. On the basis of these functions it is possible to analyze the changes in the main characteristics of the positive system when the values of the input parameters of the models are varied.

According to the results of research, the computational experiments were conducted for the investigated system. The results of these experiments correspond to the results of the theoretical researches of evaluation of sensitivity.

Keywords: positive system, productivity, continuous model, sensitivity, function of sensitivity, equation of sensitivity, stationary solution.

Введение. В реальных системах управления и регулирования достаточно часто встречаются параметры, изменяющиеся в процессе работы систем [1, 2]. В таком случае в задачах исследования систем управления важную роль играет изучение вопроса чувствительности систем управления к вариациям их параметров [1–7]. Это касается в первую очередь изменений параметров в математических моделях, описывающих поведение исследуемого объекта. Необходимость изучения этих вопросов вызвана, во-первых, тем, что реальные значения параметров системы, как правило, отличаются от расчетных, что в свою очередь приводит к возникновению параметрических ошибок в работе систем, возникающих, как правило, в результате параметрических возмущений в объекте исследования или в его среде функционирования. Во-вторых, информация о зависимости характеристик системы от изменения ее параметров может использоваться для улучшения ее качества. Так, в том случае, если в процессе исследования выявлены отдельные параметры объекта, изменение которых существенным образом влияет на его выходные характеристики, целесообразным становится переход к задаче синтеза, в которой такие изменения будут изначально учтены, а, следовательно, будет выработана программа действий, позволяющая максимально снизить влияние таких параметров на основные характеристики объекта исследования, и, тем самым, становится возможным добиться снижения его чувствительности к вариациям выделенных параметров и, таким образом, уменьшить параметрические ошибки и повысить качество моделируемых систем управления и регулирования. Вместе с тем, повышение качества исследуе-

мых систем управления в отдельных случаях (например, адаптивные системы, системы с идентификацией математических моделей и т.п.) требует целенаправленного изменения некоторых своих параметров. В этих случаях также целесообразно иметь информацию о чувствительности системы к изменению указанных параметров и о степени влияния таких параметров на исследуемую систему управления.

В данной работе исследование параметрической чувствительности проводится применительно к отдельному классу сложных динамических систем – классу позитивных динамических систем балансового типа [6–10], характеризующимся свойством позитивности всех переменных на протяжении всего времени [6–23]. К таким системам относятся системы, описывающие поведение сложных экономических, экологических, биологических и других объектов [10–16, 20–23], на основные параметры, характеристики и начальные условия которых накладываются ограничения позитивности [10–16], гарантирующие получение неотрицательных фазовых траекторий и выходных характеристик системы на протяжении всего времени. Математическим моделям, описывающим поведение указанных систем, присуще наличие большого числа ограничений на входящие в них параметры и переменные [10–13], обеспечивающие выполнение требования позитивности входных и выходных характеристик систем, а также требование асимптотической устойчивости получаемых решений. В этой связи особенно актуальными становятся исследования чувствительности исследуемого класса систем к вариациям указанных параметров, позволяющие существенным образом повысить качество исследуемых

систем и снизить возникновение параметрических ошибок их функционирования, что в дальнейшем позволит расширить спектр возможных управляющих воздействий на объект исследования, а, следовательно, расширить функционирование исследуемых систем в более широком диапазоне воздействующих факторов и, таким образом, повысить их эффективность.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Аппарат теории чувствительности, изучающей влияние вариации параметров (т.е. любые отклонения этих параметров от значений, принятых за исходные) на динамические свойства исследуемых систем, является сильным средством анализа и синтеза систем управления и теоретической основой построения новых классов систем [1–6, 17, 18].

При этом, анализ чувствительности, являющийся одним из самых эффективных способов прогнозирования результатов функционирования систем произвольной природы, позволяет решить одну из важнейших проблем моделирования и анализа сложных систем – проблему исследования влияния изменения параметров системы на ее основные характеристики при изменении различных внутренних и внешних факторов – путем выявления важнейших факторов, способных наиболее существенно повлиять на эффективность функционирования исследуемой системы. Серьезность этой проблемы нашла свое отражение в исследованиях и публикациях отечественных и зарубежных ученых [1–6, 17–23].

Основу теории чувствительности составляют методы, позволяющие качественно исследовать влияние вариации параметров на динамические свойства исследуемых систем [1–6]. В основе различных методов теории чувствительности в качестве прямых оценок чувствительности лежит использование функций чувствительности [1–3, 5, 17], которые играют большую роль в количественной оценке степени влияния вариаций параметров системы на ее динамические свойства и по сути представляют собой градиенты интересных для исследователя показателей качества системы по некоторым совокупностям параметров, характеризующих саму систему и внешнюю среду [3, 4]. Поэтому в теории чувствительности важное место занимают различные способы нахождения функций чувствительности для типовых классов сложных систем [1, 4–6, 17, 18, 23], в частности и позитивных динамических систем [17–19, 22, 23].

Основное внимание в теории чувствительности уделяется изучению бесконечно-малых вариаций, которое дает возможность оценить тенденцию поведения системы, получить более общие соотношения, не связанные с конкретным видом вариации [1, 4, 5]. Кроме того, непосредственное сведение оценок для бесконечно-малых вариаций до случая конечных, но достаточно малых вариаций дает возможность получить приближенные результаты с некоторой степенью точности [1, 2].

Для исследования чувствительности систем управления различной физической природы используется методика [1, 3, 4–6], позволяющая оценить чувствительность всех результативных показателей исследуемой системы к изменению каждого ее параметра в отдельности, а также их реакцию на принятие

любого управленческого решения. Такая методика активно используется и при проведении исследования позитивных динамических систем [6, 7, 17, 18].

Поскольку в данной работе объектом исследования выступает выделенный впервые в работе [10] класс позитивных динамических систем балансового типа, то есть систем с положительными (или, по крайней мере, неотрицательными) переменными [6–10, 18–21, 23], характеризующихся специфическим свойством (свойством позитивности) [6, 7, 10–12, 22], для которых построены впервые в работах [10–14] дискретная и непрерывная модели функционирования, то необходимо отметить, что исследования в области чувствительности данного класса систем не проводились ранее и предлагаются к рассмотрению в данной работе.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является проведение анализа параметрической чувствительности позитивной динамической системы балансового типа, поведение которой описывается линейным неоднородным векторно-матричным дифференциальным уравнением с матрицами постоянных коэффициентов.

Задачей исследования является определение влияния всех коэффициентов разомкнутой непрерывной математической модели позитивной динамической системы балансового типа на ее выходные характеристики и получение обоснования возможных размеров изменения варьируемых коэффициентов модели.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие задачи:

- а) построить уравнения чувствительности позитивной динамической системы от изменения всех параметров модели, описывающей поведение исследуемой системы;
- б) определить функции чувствительности исследуемой системы для всех параметров математической модели позитивной динамической системы в зависимости от вида задания функций управления;
- в) определить стационарные решения уравнений чувствительности;
- г) провести анализ полученных функций чувствительности и стационарных решений уравнений чувствительности;
- г) сформулировать выводы по результатам проведенного анализа.

Объект и предмет исследования. Прежде, чем перейти к непосредственному исследованию чувствительности позитивной динамической системы, остановимся на объекте и предмете исследования, а также на математической модели, описывающей его поведение в условиях непрерывно изменяющегося времени.

В качестве *объекта исследования* в данной работе рассматривается позитивная динамическая система балансового типа [10], под которой понимается система, характеризующаяся свойством позитивности ее переменных на бесконечном интервале времени [10–12].

Поведение объекта исследования в условиях непрерывно изменяющегося времени описывается линейным неоднородным векторно-матричным дифференциальным уравнением первого порядка с матрицами постоянных коэффициентов [10–12] вида

$$\dot{X}(t) = (I - B)^{-1}((A - I)X(t) + C(t)), \quad X(0) = X_0 \quad (1)$$

или

$$\dot{X} = \tilde{A}X(t) + \tilde{B}C(t), \quad X(0) = X_0, \quad (2)$$

где время t предполагается непрерывным; $X(t)$ – n -мерный вектор состояния системы, $X(t) \in R^{n \times 1}$; A, B – матрицы размерности $n \times n$ постоянных коэффициентов; $\tilde{A} = (I - B)^{-1}(A - I)$ – постоянная матрица состояния системы (объекта) размерности $n \times n$; $\tilde{B} = (I - B)^{-1}$ – постоянная матрица управления (входа) размерности $n \times n$; $C(t)$ – n -мерный вектор управления (входа) системы, являющийся либо заданным, либо функционально установленным (определяется в результате обработки экспериментальных данных объекта исследования методами регрессионного анализа), $C(t) \in R^{n \times 1}$; I – единичная матрица размерности $n \times n$; $X(0) = X_0$ – n -мерный вектор-столбец начальных условий системы.

В представленной непрерывной модели позитивной динамической системы балансового типа, описываемой уравнением (1) или (2), для обеспечения выполнения свойства позитивности системы и асимптотической устойчивости (по Ляпунову) получаемых решений на матрицы постоянных коэффициентов A , B накладываются условия неотрицательности [10–12] и продуктивности [10–13], а на матрицу постоянных коэффициентов \tilde{A} накладывается условие неположительности [10–14]: $(I - B)^{-1}(A - I) \leq 0$.

Предметом исследования в работе выступают параметры непрерывной математической модели, описывающей поведение позитивной динамической системы балансового типа, доступные для варьирования в процессе функционирования позитивной системы, а также степень их влияния на объект исследования, а именно на его выходные характеристики.

Для модели, описываемой уравнением (1) или (2) в качестве исследуемых параметров выбираются коэффициенты всех матриц, а также параметры, входящие в вектор-функцию $C(t) = (C_1(t), C_2(t), \dots, C_n(t))^T$.

При этом в работе рассматриваются вектор-функции $C(t)$, заданные соответственно в линейном, квадратичном и гармоническом видах: $C(t) = C^0 + Ct$;

$C(t) = C^0 + Ct^2$; $C(t) = C^0 + C \sin \omega t$, где C^0, C, ω – параметры регрессионной модели.

Материалы и методы исследования параметрической чувствительности позитивной динамической системы балансового типа. В основе проведения комплексных исследований параметрической чувствительности позитивной динамической системы балансового типа является реализация следующих этапов:

а) построение уравнений чувствительности для исследуемой системы;

б) отыскание функций чувствительности всех параметров математической модели позитивной динамической системы;

в) проведение анализа функций чувствительности;

г) формулирование выводов по результатам проведенного анализа.

Исследование чувствительности позитивной системы проводится в работе на основе построения

функций чувствительности вида $U_{ij}(t) = \frac{\partial X_i(t)}{\partial \alpha_j}$, где

α_j ($j = \overline{1, s}$) – параметры модели, по которым проводится анализ чувствительности исследуемой системы,

а также на основе построения уравнений чувствительности вида

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_j} X_i(t) = \frac{d}{dt} U_{ij}(t).$$

Результаты исследования параметрической чувствительности позитивной динамической системы балансового типа. Рассмотрим позитивную систему, состоящую из одной подсистемы (размерность системы $n = 1$). В этом случае поведение исследуемой системы описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dX}{dt} = \frac{A-1}{1-B} X(t) + \frac{1}{1-B} C(t), \quad X(t_0) = X_0. \quad (3)$$

Решая уравнение (3) методом вариации произвольных постоянных при начальном условии $X(t_0) = X_0$ и в зависимости от вида функции $C(t)$, имеем общее решение уравнения (3):

$$X(t) = -\frac{(1-B)C}{(A-1)^2} - \frac{C^0 + Ct}{A-1} + e^{\left(\frac{A-1}{1-B}\right)t} \times \left(X_0 + \frac{C^0}{A-1} + \frac{(1-B)C}{(A-1)^2} \right); \quad (4)$$

$$X(t) = -\frac{C^0 + Ct^2}{A-1} - \frac{2(1-B)Ct}{(A-1)^2} - \frac{2(1-B)^2 C}{(A-1)^3} + e^{\left(\frac{A-1}{1-B}\right)t} \times \left(X_0 + \frac{C^0}{A-1} + \frac{2(1-B)^2 C}{(A-1)^3} \right); \quad (5)$$

$$X(t) = -\frac{C^0}{A-1} - \frac{C((A-1)\sin \omega t + \omega(1-B)\cos \omega t)}{(A-1)^2 + \omega^2(1-B)^2} + e^{\left(\frac{A-1}{1-B}\right)t} \left(X_0 + \frac{C^0}{A-1} + \frac{C\omega(1-B)}{(A-1)^2 + \omega^2(1-B)^2} \right). \quad (6)$$

Исследуем чувствительность решений (4)–(6) на изменение входных параметров A, B, C^0, C, ω непрерывной модели.

Имеем следующие уравнения чувствительности по каждому из интересующих нас параметров:

$$\frac{dU_A^X(t)}{dt} = \frac{A-1}{1-B} U_A^X(t) + \frac{1}{1-B} X(t); \quad (7)$$

$$\frac{dU_B^X(t)}{dt} = \frac{A-1}{1-B} U_B^X(t) + \frac{A-1}{(1-B)^2} X(t) + \frac{1}{(1-B)^2} C(t); \quad (8)$$

$$\frac{dU_{c^0}^X(t)}{dt} = \frac{A-1}{1-B} U_{c^0}^X(t) + \frac{1}{1-B}; \quad (9)$$

$$\frac{dU_C^X(t)}{dt} = \frac{A-1}{1-B} U_C^X(t) + \frac{1}{1-B} \frac{dF(C, \omega, t)}{dC}; \quad (10)$$

$$\frac{dU_\omega^X(t)}{dt} = \frac{A-1}{1-B} U_\omega^X(t) + \frac{1}{1-B} \frac{dF(C, \omega, t)}{d\omega}, \quad (11)$$

де $C(t) = C^0 + F(C, \omega, t)$.

Решая полученные уравнения чувствительности (7)-(11) в зависимости от вида функции $C(t)$, получаем интересующие нас функции чувствительности:

а) при $C(t) = C^0 + Ct$ имеем:

$$U_A^X(t) = \frac{2(1-B)C}{(A-1)^3} + \frac{C^0 + Ct}{(A-1)^2} + \frac{t}{1-B} e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(X_0 - X^* + \frac{(1-B)C}{(A-1)^2} \right) + e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(-\frac{2(1-B)C}{(A-1)^3} - \frac{C}{(A-1)^2} \right); \quad (12)$$

$$U_B^X(t) = \frac{C}{(A-1)^2} + \frac{(A-1)t}{(1-B)^2} e^{\frac{A-1}{1-B}t} \times \left(X_0 - X^* + \frac{(1-B)C}{(A-1)^2} \right) + e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(-\frac{C}{(A-1)^2} \right); \quad (13)$$

$$U_{c^0}^X(t) = -\frac{1}{(A-1)} \left(1 - e^{\frac{A-1}{1-B}t} \right); \quad (14)$$

$$U_C^X(t) = -\frac{t}{(A-1)} - \frac{1-B}{(A-1)^2} + \frac{1-B}{(A-1)^2} e^{\frac{A-1}{1-B}t}; \quad (15)$$

$$U_\omega^X(t) = 0; \quad (16)$$

б) при $C(t) = C^0 + Ct^2$ имеем:

$$U_A^X(t) = \frac{6(1-B)C}{(A-1)^4} + \frac{4(1-B)C}{(A-1)^3} t + \frac{C^0 + Ct^2}{(A-1)^2} + \frac{t}{1-B} e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(X_0 - X^* + \frac{2(1-B)^2 C}{(A-1)^3} \right) + e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(-\frac{6(1-B)^2 C}{(A-1)^4} - \frac{C}{(A-1)^2} \right); \quad (17)$$

$$U_B^X(t) = \frac{4(1-B)C}{(A-1)^3} + \frac{2Ct}{(A-1)^2} + \frac{(A-1)t}{(1-B)^2} e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(X_0 - X^* + \frac{2(1-B)^2 C}{(A-1)^3} \right) + e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(-\frac{4(1-B)C}{(A-1)^3} \right); \quad (18)$$

$$U_{c^0}^X(t) = -\frac{1}{(A-1)} \left(1 - e^{\frac{A-1}{1-B}t} \right); \quad (19)$$

$$U_C^X(t) = -\frac{t^2}{(A-1)} - \frac{2(1-B)t}{(A-1)^2} - \frac{2(1-B)^2}{(A-1)^3} + \frac{2(1-B)^2}{(A-1)^3} e^{\frac{A-1}{1-B}t}; \quad (20)$$

$$U_\omega^X(t) = 0; \quad (21)$$

в) при $C(t) = C^0 + C \sin \omega t$ имеем:

$$U_A^X(t) = \frac{C}{(A-1)^2} + \frac{C((A-1)^2 - (1-B)^2 \omega^2)}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \sin \omega t + \frac{2C((A-1)(1-B)\omega)}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \cos \omega t + \frac{t}{1-B} e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(X_0 - X^* + \frac{C(1-B)\omega}{(A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2} \right) - e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(\frac{C}{(A-1)^2} - \frac{2C(A-1)(1-B)\omega}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \right); \quad (22)$$

$$U_B^X(t) = -\frac{2C((A-1)(1-B)^2 \omega^2)}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \sin \omega t + \frac{C\omega((A-1)^2 - (1-B)^2 \omega^2)}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \cos \omega t + \frac{A-1}{1-B} t e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(X_0 - X^* + \frac{C(1-B)\omega}{(A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2} \right) - e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left(\frac{C\omega((A-1)^2 - (1-B)^2 \omega^2)}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \right); \quad (23)$$

$$U_{c^0}^x(t) = -\frac{1}{(A-1)} \left(1 - e^{\frac{A-1}{1-B}t} \right); \quad (24)$$

$$U_c^x(t) = \frac{(A-1)\sin \omega t + (1-B)\omega \cos \omega t}{(A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2} + e^{\frac{A-1}{1-B}t} \frac{(1-B)\omega}{(A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2}; \quad (25)$$

$$U_\omega^x(t) = \frac{C}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \times \left(-(A-1)((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)t \cos \omega t + 2(A-1)(1-B)^2 \omega \sin \omega t - (1-B) \times \left((A-1)^2 - (1-B)^2 \omega^2 \right) \cos \omega t + (1-B)^2 \omega \left((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2 \right) t \sin \omega t \right) + e^{\frac{A-1}{1-B}t} \left[\frac{C(1-B)((A-1)^2 - (1-B)^2 \omega^2)}{((A-1)^2 + (1-B)^2 \omega^2)^2} \right]; \quad (26)$$

Стационарные решения $U^*(t)$ для уравнений чувствительности (7)–(11), в которых достигается максимум по направлению изменения чувствительности по каждому из параметров модели и которые выступают в роли горизонтальной асимптоты для соответствующей функции чувствительности, имеют вид:

$$U_A^* = \frac{C^0}{(1-A)^2} \geq 0, \quad U_B^* = 0,$$

$$U_{c^0}^* = \frac{1}{1-A} \geq 0, \quad U_C^* = 0, \quad U_\omega^* = 0.$$

Для позитивной динамической системы балансового типа с двумя подсистемами ($n = 2$) исследование устойчивости проводится аналогичным образом. В этом случае уравнения чувствительности получаются путем дифференцирования решения уравнения вида (1) по каждому из параметров матриц, входящих в указанное уравнение:

а) по параметрам a_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) имеем:

$$\dot{U}_{a_{ij}}^k(t) = \tilde{B}_{ki} X_j(t) + \sum_{s=1}^2 \tilde{A}_{ks} U_{a_{ij}}^s(t), \quad k = 1, 2;$$

б) по параметрам b_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) имеем:

$$\dot{U}_{b_{ij}}^k(t) = \sum_{s=1}^2 \left[\frac{d\tilde{A}_{ks}}{db_{ij}} X_s(t) + \frac{d\tilde{B}_{ki}}{db_{ij}} C_s(t) + \tilde{A}_{ks} U_{b_{ij}}^s(t) \right],$$

$k = 1, 2;$

в) по параметрам c_j^i ($i = 1, 2, j = 1, 2$) имеем:

$$\dot{U}_{c_j^i}^k(t) = \tilde{B}_{kj} \frac{dC_j(t)}{dc_j^i} + \sum_{s=1}^2 \tilde{A}_{ks} U_{c_j^i}^s(t), \quad k = 1, 2;$$

где a_{ij}, b_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) – соответствующие элементы матриц A та B ; $\tilde{B}_{ij}, \tilde{A}_{ij}$ ($i = 1, 2, j = 1, 2$) – соответствующие элементы матриц \tilde{B} и \tilde{A} .

Решая эти системы с учетом начальных условий $X_i(t_0) = X_{i0}$ ($i = 1, 2$), можно получить функции чувствительности и стационарное (равновесное) решение, для каждого из параметров модели.

Аналогичным образом проводится и исследование чувствительности позитивной системы с n подсистемами. Полученные зависимости для случаев $n = 1$ и $n = 2$, сохраняются и на общем случае.

С целью определения основной характеристики математической модели позитивной динамической системы, в качестве которой выступает состояние системы, и выявления влияния на нее различных видов функций, проведения анализа чувствительности состояния системы в зависимости от варьирования всех параметров математической модели исследуемой системы, проведем вычислительные эксперименты для позитивных систем с одной и двумя подсистемами.

Проведем вычислительный эксперимент для системы с одной подсистемой при следующих входных параметрах

$$n = 1, \quad A = 0,4, \quad B = 0,3, \quad C^0 = 2,6; \\ C = 0,03; \quad \omega = 45. \quad (27)$$

и начальным условием $X_0 = 3, t_0 = 0$.

Составляя уравнения чувствительности (4)–(6) с учетом имеющихся данных, находятся функции чувствительности для различных видов задания функции $C(t)$ и стационарные (равновесные) решения модели. Графическое их изображение при линейном виде задания функции $C(t)$ приведено на рис. 1. Остальные случаи аналогичны.

Из рис. 1 видно, что все полученные решения (траектории движения динамической сложной системы) асимптотически приближаются к стационарному решению X^* . Аналогичные заключения можно сделать и для построенных функций чувствительности: их графики также асимптотически приближаются к стационарному решению U^* . В данном случае оказывается, что исходная позитивная система является чувствительной к изменению параметров A, B, C^0, C и не чувствительной к изменению параметра ω .

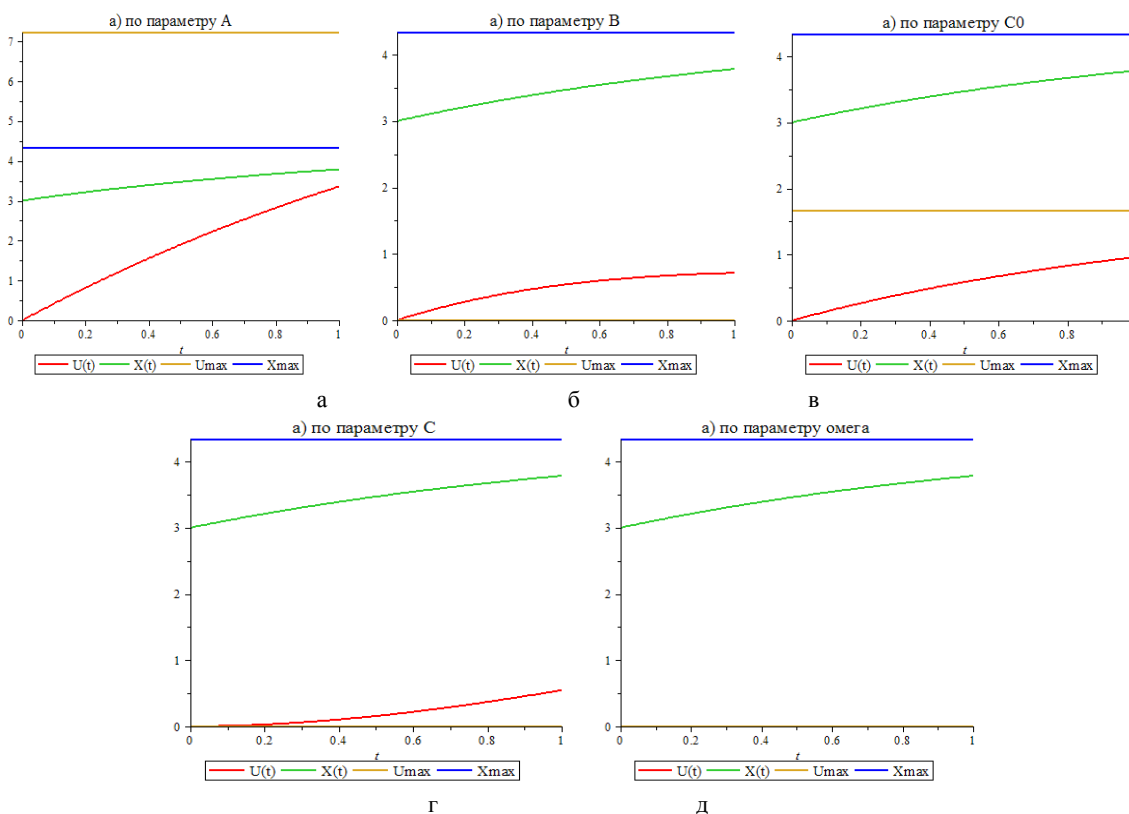


Рис. 1 – График функции чувствительности и решения уравнения (1) при $C(t) = C^0 + Ct$ с учетом (27) и начального условия $X_0(0) = 3$: а – по параметру A ; б – по параметру B ; в – по параметру C^0 ; г – по параметру C ; д – по параметру ω

Обсуждение результатов исследования параметрической чувствительности позитивной динамической системы балансового типа. Согласно результатам проведенного анализа разомкнутой непрерывной модели и построенных для нее функции чувствительности, можно сделать вывод, что качественный характер траекторий выходных характеристик систем и траекторий чувствительности к параметрам системы для этой модели одинаковый, а, следовательно, закономерности, полученные при исследовании параметрической чувствительности позитивной динамической системы балансового типа, а также результаты, полученные при проведении вычислительных экспериментов для непрерывной модели, которая описывается уравнением (1) при $n = 1, n = 2$, сохраняются и для общего случая позитивной системы с n подсистемами.

В результате проведенных исследований было выявлена чувствительность исследуемой позитивной динамической системы к вариации ее параметров. В зависимости от ставящихся перед исследователем целей и в соответствии с полученными ранее результатами управления исследуемой системой [10, 15, 16], таким образом, становится возможным производить определенные целенаправленные управляющие воздействия на объект исследования с целью повышения его качества. Отдельные случаи таких воздействий рассмотрены в работах [10, 15].

Выводы. В работе проведено исследование параметрической чувствительности основных характеристик исследуемой позитивной динамической си-

стемы балансового типа, определена зависимость результатов, полученных по модели, от варьирования параметров исходной математической модели позитивной динамической системы. Для осуществления анализа параметрической чувствительности построены уравнения чувствительности по каждому из параметров модели, которые представляют собой линейные дифференциальные уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами. В результате решения уравнений чувствительности в работе получены функции чувствительности, на основе которых и проводится анализ изменений основных характеристик входных параметров моделей. Кроме того, получены зависимости, с помощью которых могут быть определены равновесные состояния чувствительности, которые, в свою очередь, позволяют найти асимптотические кривые для функций чувствительности и, таким образом, определить максимально возможные изменения основных характеристик исследуемой системы.

Список литературы:

1. Кокотович, П. В. Чувствительность систем автоматического управления [Текст] / П. В. Кокотович, Р. С. Рутман // Автоматика и телемеханика. – 1965. – Т. 26, Вып. 4. – С. 730–750.
2. Розенвассер, Е. Н. Вклад ленинградских ученых в развитие теории чувствительности систем управления [Текст] / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов // Труды СПИИРАН. – 2013. – Вып. 25. – С. 13–41.
3. Рубан, А. И. Идентификация и чувствительность сложных систем [Текст] / А. И. Рубан. – Томск: Изд-во ТГУ, 1982. – 304 с.
4. Городецкий, Ю. И. Функции чувствительности и динамика сложных механических систем [Текст] / Ю. И. Городецкий. –

- Нижний Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 236 с.
5. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления Теория автоматического управления. Часть 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления [Текст] / А. А. Воронов. – М.: Высшая школа, 1986. – 504 с.
 6. Schuppen, J. H. Control and System Theory of Positive Systems [Text] / J. H. Schuppen. – Amsterdam: The Vrije Universiteit, 2007. – 245 p.
 7. Kaczorek, T. Some Recent Developments in Positive 2D Systems [Text] / T. Kaczorek // Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2003. – P. 345–352. doi: [10.1007/978-3-540-44928-7_46](https://doi.org/10.1007/978-3-540-44928-7_46)
 8. Алілуїко, А. М. Інваріантні конуси та стійкість лінійних динамічних систем [Текст] / А. М. Алілуїко, О. Г. Мазко // Український математичний журнал. – 2006. – Т. 58, № 11. – С. 1446–1461.
 9. Красносельский, М. А. Позитивные линейные системы: метод положительных операторов [Текст] / М. А. Красносельский, Е. А. Лифшиц, А. В. Соболев. – М.: Наука, 1985. – 256 с.
 10. Леонтьева, В. В. Математичне моделювання позитивних динамічних систем балансового типу [Текст]: дис. канд. фіз.-матем. наук / В. В. Леонтьева. – Запорізький національний університет. – Запоріжжя, 2008. – 144 с.
 11. Леонтьева, В. В. Разомкнутая дискретная математическая модель позитивных динамических систем балансового типа и ее анализ [Текст]: зб. наук. праць / В. В. Леонтьева, Н. А. Кондратьева // Вісник ЗНУ. – 2009. – № 1. – С. 132–137.
 12. Леонтьева, В. В. Построение и анализ разомкнутой непрерывной математической модели позитивной динамической системы балансового типа [Текст]: зб. наук. праць / В. В. Леонтьева, Н. А. Кондратьева // Вісник ЗНУ. – 2010. – № 1. – С. 81–88.
 13. Леонтьева, В. В. Математическая модель динамики функционирования позитивных систем балансового типа [Текст]: зб. наук. праць / В. В. Леонтьева // Вісник ЗНУ. – Запоріжжя: ЗНУ. – 2008. – № 1 – С. 118–124.
 14. Леонтьева, В. В. Построение и анализ замкнутых дискретной и непрерывной математических моделей позитивных динамических систем балансового типа [Текст]: збір. тез доп. / В. В. Леонтьева // Актуальні проблеми математики та інформатики. – Запоріжжя: ЗНУ, 2008. – С. 34–37.
 15. Леонтьева, В. В. Управление в непрерывной математической модели позитивной динамической системы балансового типа [Текст]: Сб. научных статей / В. В. Леонтьева, Н. А. Кондратьева // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – № 2 (35). – С. 273–278.
 16. Леонтьева, В. В. Управляемость в математической модели позитивной динамической модели балансового типа [Текст]: мат. межн. конф. / В. В. Леонтьева, Н. А. Кондратьева // Динамическое моделирование и исследование стабильности, 2009. – С. 297.
 17. Ebihara, Y. Dominant pole analysis of stable time-delay positive systems [Text] / Y. Ebihara, D. Peaucelle, D. Arzelier, F. Gouaisbaut // IET Control Theory & Applications. – 2014. – Vol. 8, No. 17. – P. 1963–1971. doi: [10.1049/iet-cta.2014.0375](https://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.0375)
 18. Ebihara, Y. Dominant pole of positive systems with time-delays [Text] / Ebihara Y., Peaucelle D., Arzelier D., Gouaisbaut F. // European Control Conference (ECC). – Strasbourg. – 2014. – P. 79–84. doi: [10.1109/ecc.2014.6862165](https://doi.org/10.1109/ecc.2014.6862165)
 19. Loewy, R. Positive operators on the n-dimensional ice cream cone [Text] / R. Loewy, H. Schneider // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 1975. – № 49 (2). – P. 375–392. doi: [10.1016/0022-247x\(75\)90186-9](https://doi.org/10.1016/0022-247x(75)90186-9)
 20. Schuppen, J. H. Mathematical Control and System Theory of Stochastic Systems in Discrete-Time [Text] / J. H. Schuppen. – Amsterdam: The Vrije Universiteit, 2006. – 497 p.
 21. Caswell, H. Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation [Text] / H. Caswell. – John Wiley & Son, 2014 – 722 p. doi: [10.1002/9781118445112.stat07481](https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07481)
 22. De Leenheer, P. Feedback control for chemostat models [Text] / P. De Leenheer, H. L. Smith // Journal of Mathematical Biology. – 2003. – № 46 (1). – P. 48–70. doi: [10.1007/s00285-002-0170-x](https://doi.org/10.1007/s00285-002-0170-x)
 23. Muratori, S. Performance evaluation of positive regulators for population control [Text] / S. Muratori // Modeling, Identification and Control. – 1989. – Vol. 10, No. 3 – P. 125–134.
- Bibliography (transliterated):**
1. Kokotovich, P. V., Rutman, R. S. (1965). Chuvstvitel'nost' sistem avtomaticheskogo upravlenija. Avtomatika i telemekhanika, 26 (4), 730–750.
 2. Rozenvasser, E. N., Jusupov, R. M. (2013). Vklad leningradskih uchenykh v razvitie teorii chuvstvitel'nosti sistem upravlenija. Trudy SPIIRAN, 25, 13–41.
 3. Ruban, A. I. (1982). Identifikacija i chuvstvitel'nost' slozhnykh system. Tomsk: Izd-vo TGU, 304.
 4. Gorodeckij, Ju. I. (2006). Funkcii chuvstvitel'nosti i dinamika slozhnykh mehanicheskikh system. Nizhnij Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo, 236.
 5. Voronov, A. A. (1986). Osnovy teorii avtomaticheskogo upravlenija Teorija avtomaticheskogo upravlenija. Chast' 2. Teorija nelinejnykh i special'nykh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Moscow: Vysshaja shkola, 504.
 6. Schuppen, J. H. (2007). Control and System Theory of Positive Systems. Amsterdam: The Vrije Universiteit, 245.
 7. Kaczorek, T. (2004). Some Recent Developments in Positive 2D Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 345–352. doi: [10.1007/978-3-540-44928-7_46](https://doi.org/10.1007/978-3-540-44928-7_46)
 8. Aliluiko, A. M., Mazko, O. H. (2006). Invariantni konusy ta stikiyst liiniykh dynamichnykh system. Ukrainskyi matematychnyi zhurnal, 58 (11), 1446–1461.
 9. Krasnosel'skij, M. A., Lifshic, E. A., Sobolev, A. V. (1985). Pozitivnye linejnye sistemy: metod polozhitel'nykh operatorov. Moscow: Nauka, 256.
 10. Leontieva, V. V. (2008). Matematychno modeliuвання pozytyvnykh dynamichnykh system balansovoho typu. Zaporizkyi natsionalnyi universytet, Zaporizhzhia, 144.
 11. Leont'eva, V. V., Kondrat'eva, N. A. (2009). Razomknutaja diskretnaja matematicheskaja model' pozitivnykh dinamicheskikh sistem balansovogo tipa i ee analiz. Visnik ZNU, 1, 132–137.
 12. Leont'eva, V. V., Kondrat'eva, N. A. (2010). Postroenie i analiz разомкнутой непрерывной математической модели позитивной динамической системы балансового типа. Visnik ZNU, 1, 81–88.
 13. Leont'eva, V. V. (2008). Matematicheskaja model' dinamiki funkcionirovanija pozitivnykh sistem balansovogo tipa. Visnik ZNU, Zaporizhzhja: ZNU, 1, 118–124.
 14. Leont'eva, V. V. (2008). Postroenie i analiz zamknytykh diskretnoj i nepreryvnoj matematicheskikh modelej pozitivnykh dinamicheskikh sistem balansovogo tipa. Aktual'ni problemi matematiki ta informatiki, Zaporizhzhja: ZNU, 34–37.
 15. Leont'eva, V. V., Kondrat'eva, N. A. (2009). Upravlenie v nepreryvnoj matematicheskoy modeli pozitivnoj dinamicheskoy sistemy balansovogo tipa. Vestnik Hersonskogo nacional'nogo tehničeskogo universiteta, 2 (35), 273–278.
 16. Leont'eva, V. V., Kondrat'eva, N. A. (2009). Upravljaemost' v matematicheskoy modeli pozitivnoj dinamicheskoy modeli balansovogo tipa. Dinamicheskoe modelirovanie i issledovanie stabil'nosti, 297.
 17. Ebihara, Y., Arzelier, D., Gouaisbaut, F., Peaucelle, D. (2014). Dominant pole analysis of stable time-delay positive systems. IET Control Theory & Applications, 8 (17), 1963–1971. doi: [10.1049/iet-cta.2014.0375](https://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.0375)
 18. Ebihara, Y., Peaucelle, D., Arzelier, D., Gouaisbaut, F. (2014). Dominant pole of positive systems with time-delays. 2014 European Control Conference (ECC), 79–84. doi: [10.1109/ecc.2014.6862165](https://doi.org/10.1109/ecc.2014.6862165)
 19. Loewy, R., Schneider, H. (1975). Positive operators on the n-dimensional ice cream cone. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 49 (2), 375–392. doi: [10.1016/0022-247x\(75\)90186-9](https://doi.org/10.1016/0022-247x(75)90186-9)
 20. Schuppen, J. H. (2006). Mathematical Control and System Theory of Stochastic Systems in Discrete-Time. Amsterdam: The Vrije Universiteit, 497.
 21. Caswell, H. (2014). Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation. John Wiley & Son, 722. doi: [10.1002/9781118445112.stat07481](https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07481)
 22. De Leenheer, P., Smith, H. (2003). Feedback control for chemostat models. Journal of Mathematical Biology, 46 (1), 48–70. doi: [10.1007/s00285-002-0170-x](https://doi.org/10.1007/s00285-002-0170-x)
 23. Muratori, S. (1989). Performance evaluation of positive regulators for population control. Modeling, Identification and Control, 10 (3), 125–134.

Поступила (received) 06.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження чутливості в деякому класі складних динамічних систем/ В. В. Леонтьєва, Н. О. Кондрат'єва// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.47–54. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование чувствительности в некотором классе сложных динамических систем/ В. В. Леонтьева, Н. А. Кондратьева// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.47–54. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Research the Sensitivity of Certain Class of Complex Dynamical Systems/ V. Leontieva, N. Kondratieva//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.47–54. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Леонтьєва Вікторія Володимирівна – кандидат фізико-математичних наук, Запорізький національний університет, доцент кафедри прикладної математики і механіки; вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, Україна, 69600; e-mail: vleonteva@mail.ru.

Кондрат'єва Наталія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, Запорізький національний університет, доцент кафедри прикладної математики і механіки; вул. Жуковського 66, м. Запоріжжя, Україна, 69600; e-mail: n-kondr@mail.ru.

Леонтьєва Вікторія Владимировна – кандидат фізико-математических наук, Запорожский национальный университет, доцент кафедры прикладной математики и механики; ул. Жуковского 66, г. Запорожье, Украина, 69600; e-mail: vleonteva@mail.ru.

Кондратьева Наталья Александровна – кандидат физико-математических наук, Запорожский национальный университет, доцент кафедры прикладной математики и механики; ул. Жуковского 66, г. Запорожье, Украина, 69600; e-mail: n-kondr@mail.ru.

Leontieva Viktoriia – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Zaporizhzhya National University; Zhukovskogo str., 66, Zaporizhzhya, Ukraine, 69600; e-mail: vleonteva@mail.ru.

Kondratieva Nataliia – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Zaporizhzhya National University; Zhukovskogo str., 66, Zaporizhzhya, Ukraine, 69600; e-mail: n-kondr@mail.ru.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА КОМПЛЕКСАМИ

УДК 621.311.1

В. Л. БАКУЛЕВСЬКИЙ

ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ ТЕХНІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАПРУГОЮ 6-35 кВ

Розглядається тестування розробленого програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ на нових даних в ОС STATISTICA в нейроімітаторі Neural Networks американської компанії StatSoft, в результаті чого доведена його працездатність. Здійснено впровадження розробленого програмного забезпечення в промислову експлуатацію. Результати дослідження можуть бути корисні в енергопостачальних та проектних організаціях.

Ключові слова: втрати електроенергії, повітряні лінії електропередач, нейронні мережі, модель, програмна реалізація.

Рассматривается тестирование разработанного программного обеспечения расчета технических потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередач напряжением 6–35 кВ на новых данных в ОС STATISTICA в нейроимитаторе Neural Networks американской компании StatSoft, в результате чего доказана его работоспособность. Осуществлено внедрение разработанного программного обеспечения в промышленную эксплуатацию. Результаты исследования могут быть полезны в энергоснабжающих и проектных организациях.

Ключевые слова: потери электроэнергии, воздушные линии электропередач, нейронные сети, модель, программная реализация.

As a result of the comparative review of methods, models and software tools for calculating electric energy losses, it is proved to develop a refined neural network model taking into account climatic factors and applying the method of average loads, taking into account the shape factor of the load graphs. A neural network model for calculating and predicting technical losses of electric power in overhead power transmission lines with a voltage of 6–35 kV is developed, taking into account climatic factors, which makes it possible to reduce the modeling error, allowing for rapid model construction without expert participation, and working with noisy data. The software implementation of the proposed neural network model in STATISTICA Neural Network program of StatSoft Company is carried out.

When applying the proposed model in the developed software based on neural networks, the error in calculating the annual power losses in the investigated 6–35 kV overhead power transmission lines decreased by an average of 4-7% compared to the official approach. The maximum relative error of the neural network model does not exceed 1.98 %.

Testing of the developed software for calculating technical losses of electric power in 6-35 kV overhead power lines on new data in the STATISTICA Neural Network in the Neuro-simulator Neural Networks of StatSoft Company (USA) is carried out, and as a result, its operability is proved.

The developed software is put into commercial operation in LLC "Scientific and Technical Enterprise "Polytechelectro" and in the Kotovsk (Podilsk District Inter-Farm Production and Operating Enterprise "Raiselkhozenergo".

Research materials are used in the educational process of the Department of Power Supply and Energy Management of the Odessa National Polytechnic University and the cyclic commission of electrotechnical disciplines of the mechanical and technological college of the Odessa National Academy of Food Technologies.

Research results can be useful in power supply and project organizations.

Keywords: power losses, overhead power transmission lines, neural networks, model, software implementation.

Вступ. Сьогодні основним формалізованим засобом аналізу функціонування і управління режимами електромереж є математичне моделювання, основу якого складає сукупність математичних моделей, що адекватно відображають процеси, які досліджуються. Підвищення складності електромереж, тенденція до комплексного розгляду процесів, що відбуваються в них, посилення вимог до оперативності розрахунків призводить до об'єктивних труднощів побудови і застосування традиційних багатовимірних нелінійних математичних моделей. Їх використання є малоефективним, а частково неможливим [1, 2].

Крім того, вони погано працюють при частковій відсутності вхідної інформації [3–5]. Цим обґрунтовується необхідність впровадження сучасних математичних моделей (зокрема, нейромереж) для поліпшення розрахунку та прогнозування втрат електроенергії в повітряних ЛЕП енергосистеми [6–8].

Проблеми щодо втрат електроенергії досліджували вітчизняні та закордонні вчені, серед них П. П. Говоров, П. Д. Лежнюк, Ю. І. Тугай, В. В. Кулик, А. О. Демов, В. Е. Воротницький, Ю. С. Железко, В. Н. Казанцев, Д. А. Арзамасцев,

А. А. Потребич, В. Г. Пекеліс, Д. Л. Файбісович, Kindler H., Labl H. та інші.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Сьогодні в багатьох програмних засобах, які застосовуються в українських енергокомпаніях, при розрахунках та прогнозуванні не враховується навіть температурний фактор, що призводить до значних похибок [3, 9, 10].

Офіційний підхід [11] пропонує врахування середньорічної температури повітря при розрахунку втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач (ЛЕП).

В роботах українських [2–4] та закордонних фахівців [6–10] увага акцентується на необхідності удосконалення методологічного і технічного забезпечення, більш точного та повного врахування факторів, що впливають на втрати електроенергії в обладнанні, а також застосуванні поліпшених методів та моделей розрахунку та прогнозування втрат електроенергії з подальшим впровадженням у сучасне програмне забезпечення [3, 9, 12, 13].

© В. Л. Бакулевський. 2016

Застаріле програмне забезпечення (ПЗ) деяких енергопостачальних компаній України не відповідає сучасним вимогам, погано працює в умовах неповноти інформації та має незручний інтерфейс [3, 13]. Тому розробка поліпшеного ПЗ з застосуванням сучасних математичних моделей обумовлює необхідність даного дослідження.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ.

Для досягнення мети сформульовані та вирішені задачі:

1. Тестування розробленого програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ на нових даних.

3. Впровадження та практичне використання запропонованого програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ.

Матеріали та методи дослідження тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ. Матеріали, методи та результати дослідження впливу кліматичних факторів на технічні втрати електроенергії, а також методи розробки моделі нейромережі для розрахунку та прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ, наведені в [14].

В [14] запропонована модель штучної нейронної мережі (ШНМ) для завдання розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ з наступними параметрами:

– архітектура – багатошаровий перцептрон, 7 нейронів у вхідному шарі, 5 нейронів – в прихованому шарі і 1 вихідний нейрон;

– вхідні змінні: активне навантаження ПЛ, номінальна напруга ПЛ, переріз проводу ПЛ, довжина проводу ПЛ, середньодобова температура повітря, швидкість вітру, наявність опадів;

– вихідна змінна – технічні втрати активної електроенергії в ПЛ;

– об'єми виборок: навчальна – 250 спостережень, контрольна – 250 спостережень, тестова – 232 спостереження;

– функція активації – логістична; алгоритм навчання – в 2 етапи: на першому етапі – метод швидкого поширення, на другому – метод Левенберга-Марквардта.

Матеріали, методи та результати програмної реалізації розробленої моделі нейромережі для розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ з урахуванням кліматичних факторів, наведені в [15].

Тестування запропонованого програмного забезпечення на нових даних проведено для перевірки адекватності розробленої моделі [14] та визначення працездатності розробленого програмного забезпечення [15]. Процес тестування супроводжується відповідними скріншотами.

Тестування запропонованого програмного забезпечення проводиться для повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ Котовських електричних мереж згідно [15]. База даних, за якою автоматично формуються вибірки (навчальна, контрольна та тестова), детально описана в [14].

Результати дослідження тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ. На основі запропонованого алгоритму програмної реалізації моделі [14, 15], моделі «сутність/зв'язок» БД для програмної реалізації запропонованої ШНМ та з урахуванням вибору параметрів вхідних змінних, запропоновано програмне забезпечення (ПЗ) для вирішення даного завдання.

На базі запропонованої ШНМ та БД, яка застосовувалась при навчанні та тестуванні вказаної ШНМ [14, 15], при введенні значень вхідних змінних, програма автоматично прогнозує значення вихідної змінної (втрати електроенергії).

Результати тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6–35 кВ наведені нижче. Алгоритм програмної реалізації моделі [15] передбачає реалізацію наступних етапів:

– запуск збереженого файлу запропонованої ШНМ в програмі STATISTICA Neural Networks. Файл запускається автоматично без необхідності додаткових налаштувань;

– запуск в запропонованій ШНМ збереженого файлу БД, яка використана при проектуванні ШНМ з навчальною, контрольною та тестовою вибірками. Для вирішення завдання потрібно у вікні, що випадає, вказати шлях до збереженого файлу БД, яка використана при проектуванні ШНМ з навчальною, контрольною та тестовою вибірками (рис. 1).

У вікні, що випадає, потрібно обрати пункт «ЗАПУСТИТЬ МОДЕЛЬ» і натиснути ОК. При цьому на екрані з'являється вікно зі структурою запропонованої ШНМ з основними характеристиками (рис. 2).

Лівою кнопкою миші потрібно зробити клік на рядок з вказаною ШНМ і натиснути ОК. Після цього програма видає таблицю результатів збереженої запропонованої ШНМ на запропонованій БД (рис. 3).

На цьому етапі є можливість додатково вивести (на екран та на друк) основні характеристики запропонованої ШНМ (в вигляді таблиць та в графічному вигляді):

– кнопка «ГРАФИК ОТКЛИКА» (рис. 4) буде двомірну функцію відгуку, тобто залежність математичного очікування вихідної змінної (втрати електроенергії) від факторів моделі (вхідних змінних). Як видно з рис. 4, дана залежність є лінійною;

– кнопка «ПОВЕРХНОСТЬ ОТКЛИКА» (рис. 5) дозволяє побудувати тривимірні поверхні відгуку, які отримані за категоризованими даними (вхідними змінними), тобто підмножини даних, що задані обраним методом категоризації, які зображуються в одному графічному вікні, що дає можливість порівнювати ці підмножини (категорії);

– кнопка «АРХИТЕКТУРА СЕТИ» дозволяє графічно відобразити архітектуру запропонованої ШНМ з її структурою (рис. 6).

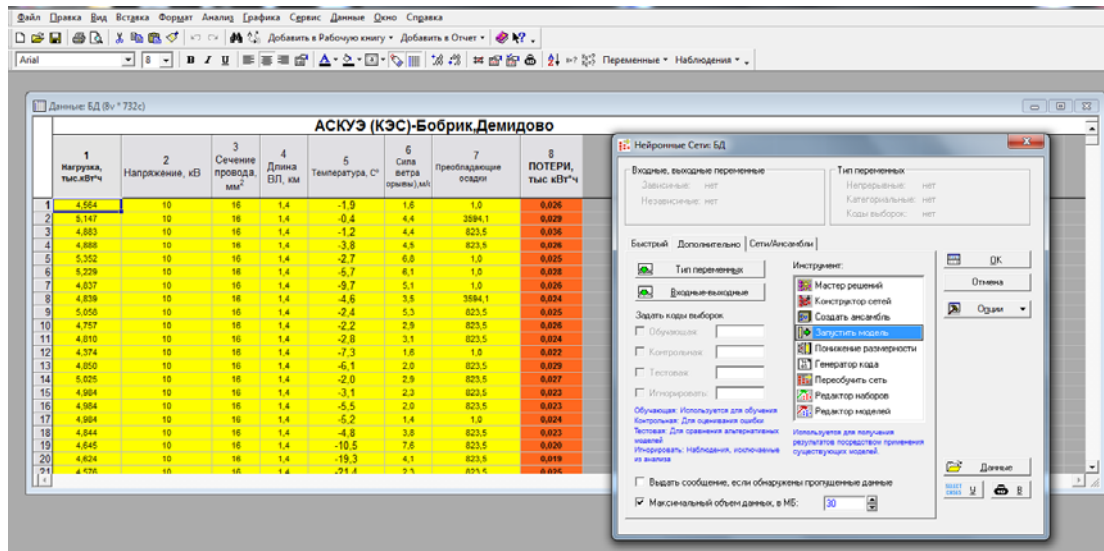


Рис. 1 – Интерфейс программы при запуске збереженого файлу ШНМ

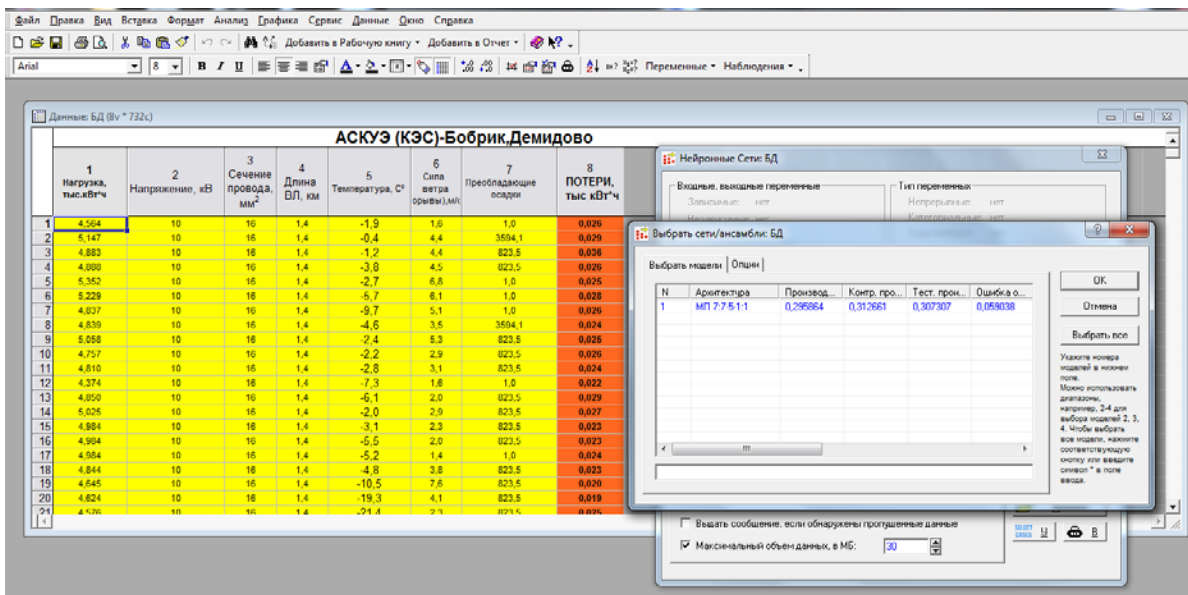


Рис. 2 – Интерфейс программы з вікном зі структурою запропонованої ШНМ з основними характеристиками

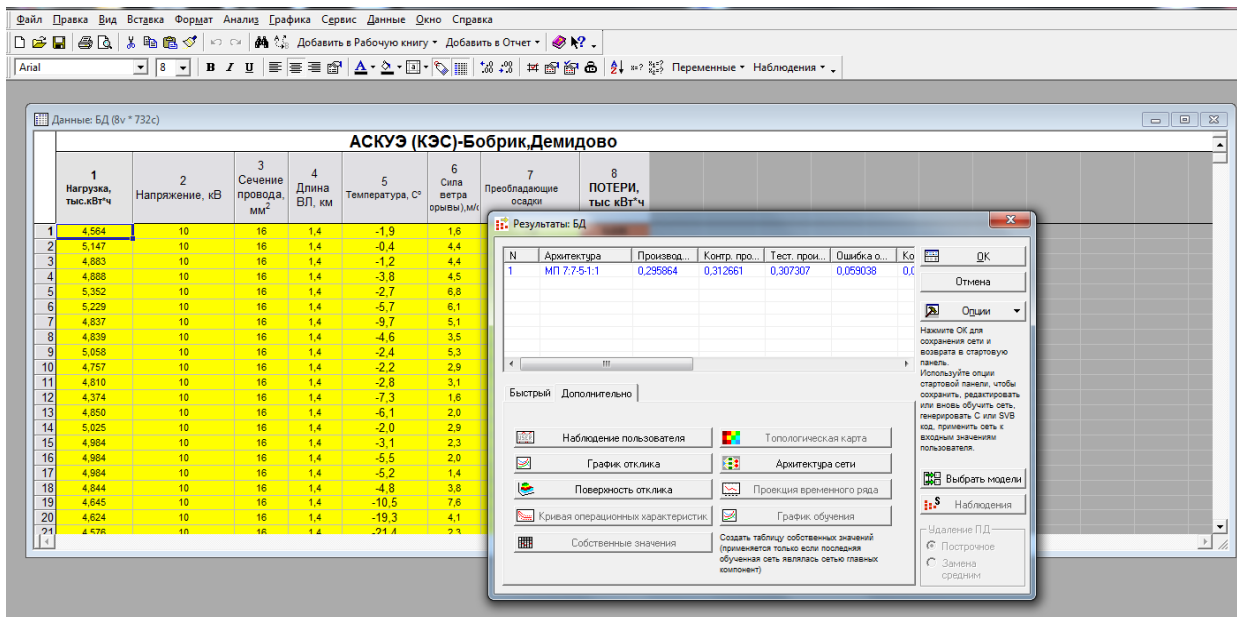


Рис. 3 – Интерфейс программы з вікном таблиці результатів збереженої запропонованої ШНМ на запропонованій БД

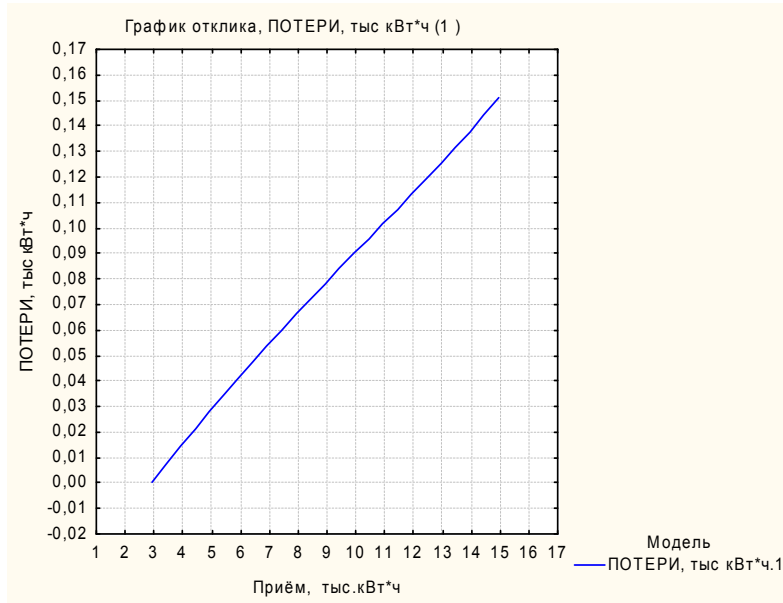


Рис. 4 – График відгуку збереженої запропонованої ШНМ

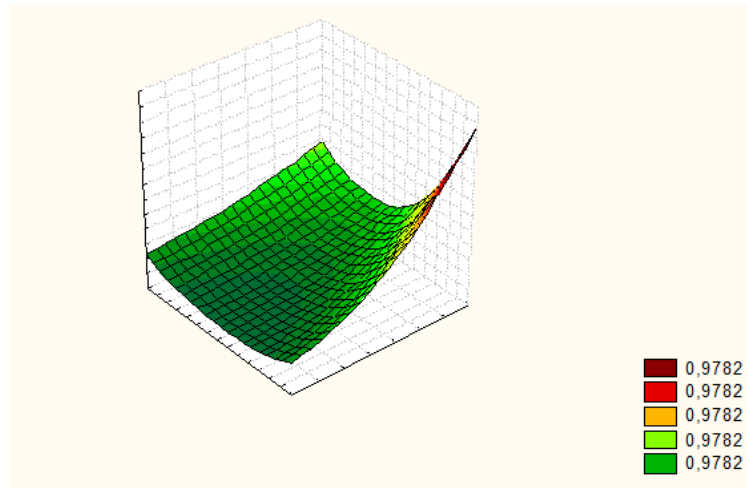


Рис. 5 – Поверхня відгуку збереженої запропонованої ШНМ

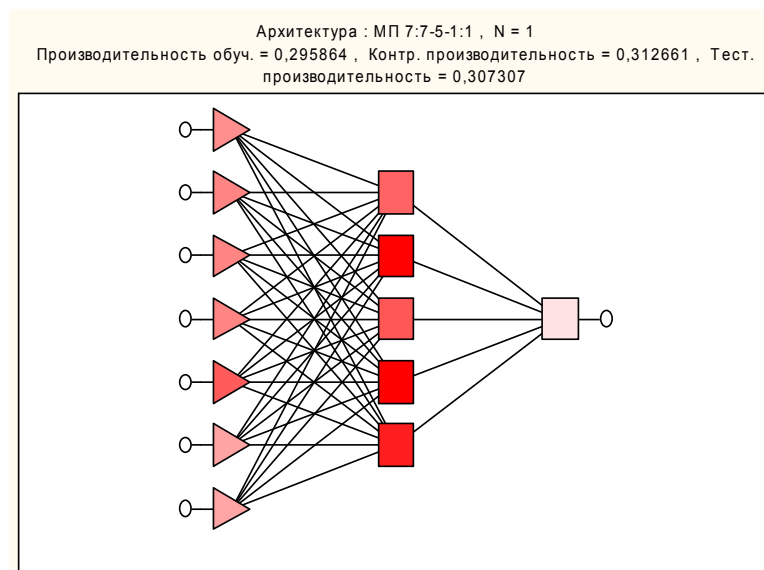


Рис. 6 – Графічне відображення архітектури запропонованої ШНМ

Для тестування запропонованого ПЗ на нових даних потрібно лівою кнопкою миші натиснути на кнопку «НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ». В вікні, що випадає (рис. 7), натиснути кнопку «ЗНАЧЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ» і ввести нові значення вхідних змінних і натиснути ОК (рис. 8).

Далі потрібно натиснути на кнопку ОК, після цього вікно, що випадає, в якому введені нові значен-

ня вхідних змінних, закриється. Потім в вікні прогнозу для спостереження користувача натискається кнопка «ПРЕДСКАЗАННЫЕ» і з'являється результат (значення вихідної змінної) – значення втрат активної електроенергії, який можна зберегти в окремому файлі. Проводиться тестування програми на довільних даних з отриманням результату (рис. 9, 10).

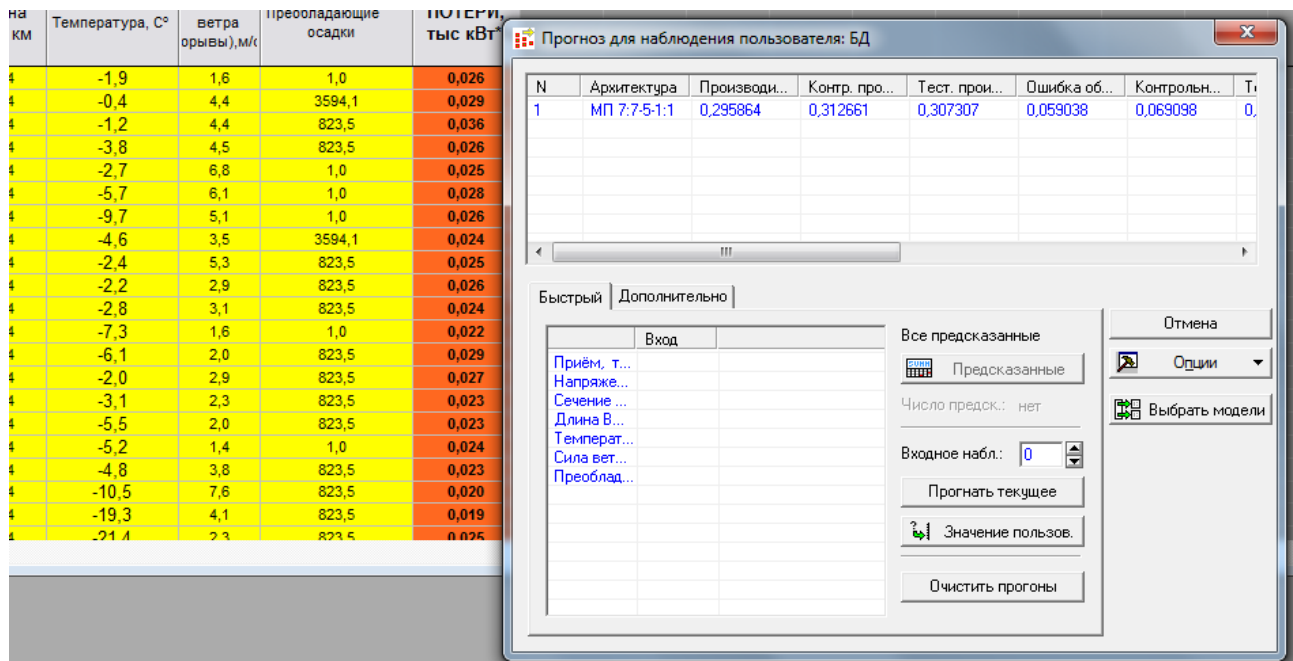


Рис. 7 – Интерфейс программы «НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ»

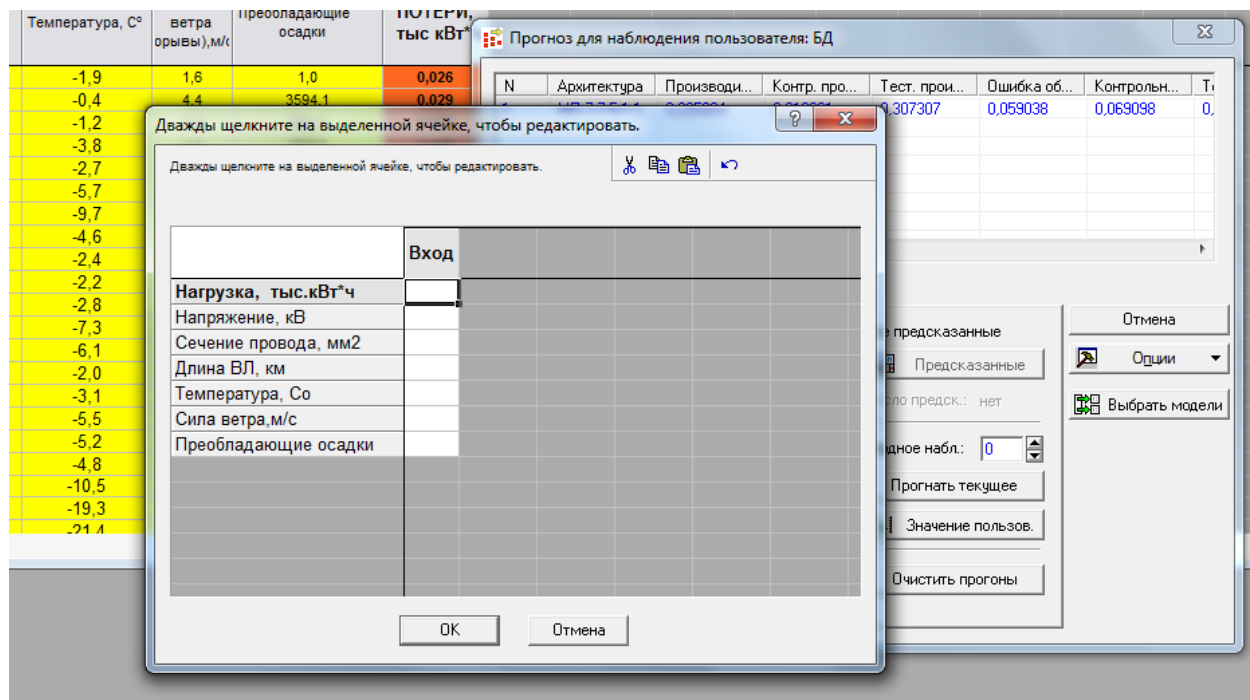


Рис. 8 – Интерфейс программы при введении новых значений вхідних змінних

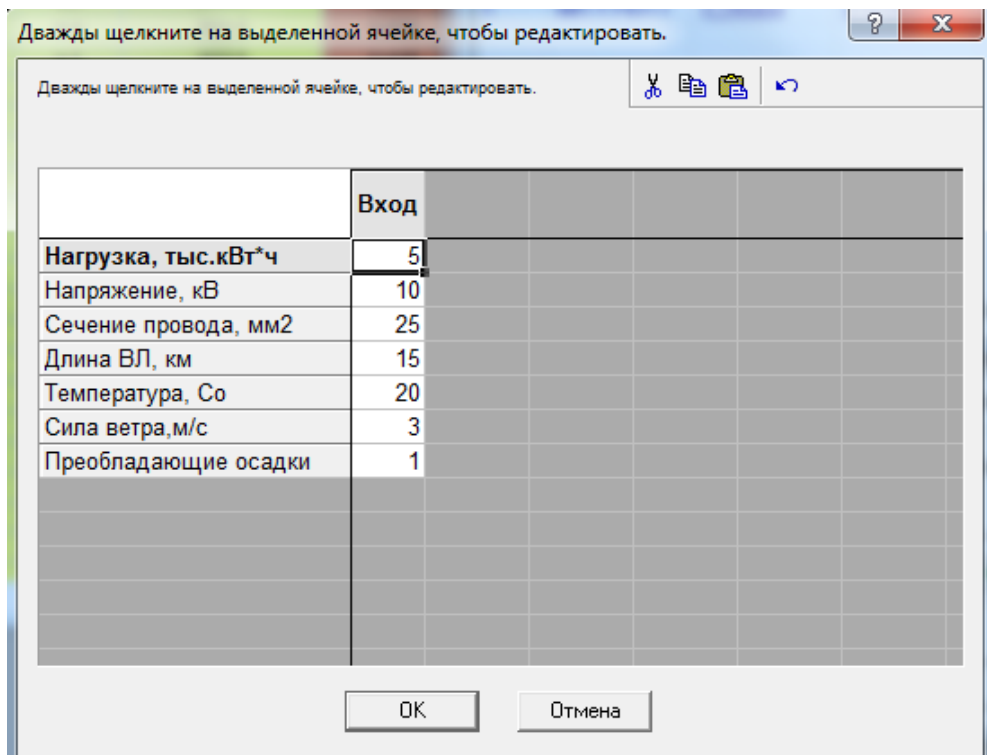


Рис. 9 – Тестування програми на довільних даних

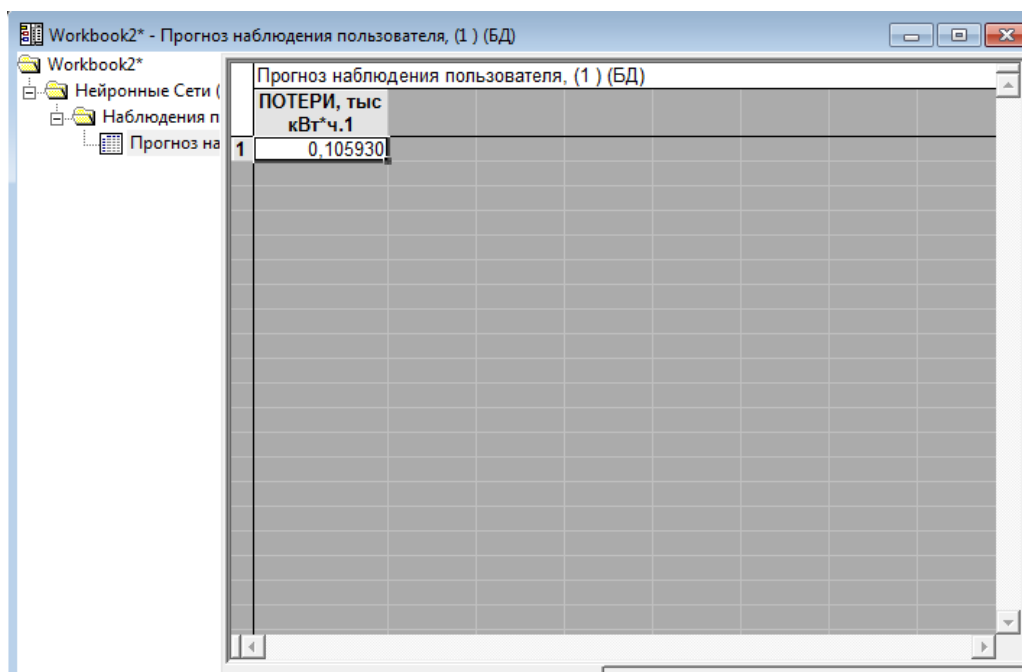


Рис. 10 – Результати тестування програми на довільних даних

Отримані результати зберігаються в вигляді файлу на ПК в місці, яке вказує користувач.

Обговорення результатів дослідження тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6-35 кВ. В результаті тестування на нових даних доведена спроможність запропонованого програмного забезпечення, розробка якого обґрунтована в [14, 15], якісно та швидко розраховувати вихідну змінну (втрати електроенергії в повітряній ЛЕП), що підтверджується відповідними

скріншотами, які зняті з екрана персонального комп'ютера.

Встановлено [14, 15], що результати розрахунку річних втрат електроенергії, проведеного для повітряних ЛЕП напругою 10 кВ і 35 кВ Котовських електричних мереж за допомогою розробленого програмного забезпечення, виявилися точнішими в середньому на 4–7 % у порівнянні з офіційним підходом. При цьому максимальна відносна похибка моделі нейромережі не перевищує 1,98 %.

Розроблене програмне забезпечення впроваджено в промислову експлуатацію, що має практичну цінність. Результати дослідження можуть бути корисні в енергопостачальних та проектних організаціях.

Подальше дослідження в напрямку врахування кліматичних факторів при розрахунку втрат електроенергії в повітряних ЛЕП є перспективною задачею. При цьому в майбутніх дослідженнях доцільним є дослідження додаткових факторів, наприклад, топографічних умов місцевості, вологості повітря, тиску тощо. Доцільним є проведення дослідження для інших класів напруги повітряних ЛЕП.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено:

1. В результаті тестування запропонованого програмного забезпечення на нових даних доведена його працездатність. Показано, що запропоноване програмне забезпечення для розрахунку та прогнозування втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ має наступні переваги:

– інтерфейс програмного забезпечення розроблений таким чином, щоб надати користувачу максимальні зручності і мінімальну кількість роботи з його боку. При введенні значень вхідних змінних (вручну чи автоматично), програма автоматично прогнозує значення вихідної змінної (втрати електроенергії);

– файл запропонованої ШНМ збережений в форматі PMML, що дозволяє безпосередньо запустити його в системі STATISTICA. Також збережений файл бази даних (БД), яка використана для навчання та тестування запропонованої ШНМ;

– можливий запис в окремий файл статистичних даних моделі, вхідних і вихідної змінної та його збереження;

– прогнозування здійснюється для кожного дня, що зменшує похибку розрахунку;

– автоматичне збереження результату прогнозування в окремому файлі, а також аналізів на всіх етапах роботи ПЗ, можливість їх друку;

– автоматичне самонавчання і якісне прогнозування запропонованої ШНМ на іншій БД, тобто система має високий рівень адаптації до зміни вхідних параметрів;

– аналіз статистичних параметрів та графічне відображення вхідних змінних, вихідної змінної та моделі в цілому;

– можливість інтегрування в інші програмні комплекси та системи.

2. Розроблене програмне забезпечення впроваджено в промислову експлуатацію в ТОВ «Науковотехнічне підприємство «Політехелектро»» та в Котовському районному міжгосподарському виробничо-експлуатаційному підприємстві «Райсільгоспэнерго». Матеріали досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Одеського національного політехнічного університету та циклової комісії електротехнічних дисциплін механіко-технологічного технікуму Одеської національної академії харчових технологій. Результати дослідження можуть бути ко-

рисні в енергопостачальних та проектних організаціях.

Література

1. Комплексна державна програма енергозбереження України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/148-97-%D0%BF>
2. Крассовский, П. Ю. Факторы, що впливають на динаміку технічних втрат у лініях електропередач [Текст] / П. Ю. Крассовський // Праці Дніпропетровського національного гірничого університету. – 2006. – № 76. – Режим доступу: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/76/7.pdf>
3. Мирошник, А. А. Уточненные алгоритмы расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ в реальном времени [Текст] / А. А. Мирошник // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – Т. 2, № 13. – С. 35–42.
4. Турбин, С. В. Удосконалення методів визначення кліматичних навантажень на повітряні лінії з урахуванням топографічних особливостей місцевості [Текст] / С. В. Турбін // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 10. – С. 3–9.
5. Vacha, H. Automated load forecasting using neural networks [Text]: the 54 th Annual Meeting / H. Vacha W. Meyer // American Power Conference, 1992. – P. 1144–1149.
6. Gupta, P. C. Adaptive short-term forecasting of hourly loads using weather in formation [Text] / P. C. Gupta, K. Yamada // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1972. – Vol. PAS-91, Issue 5. – P. 2085–2094. doi: [10.1109/tpas.1972.293541](https://doi.org/10.1109/tpas.1972.293541)
7. Panuska, V. Short-term forecasting of electric power system load from a weather dependent model [Text] / V. Panuska // IFAC Symposium on Automatic Control and Protection of Electric Power Systems, 1977. – P. 414–418.
8. Воротицкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеословий [Текст] / В. Э. Воротицкий, О. В. Туркина // Электрические станции. – 2008. – № 10. – С. 42–49.
9. Левченко, И. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях [Текст] / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 2–8.
10. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии в электрических сетях, зависящие от погодных условий [Текст] / Ю. С. Железко // Электрические станции. – 2004. – № 11. – С. 42–48.
11. Методика визначення технологічних витрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередавання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.mega-billing.com/files/metodika_vtrat.pdf - http://www.mega-billing.com/files/metodika_vtrat.pdf
12. Осипов, Д. С. Учет нагрева токоведущих частей в расчетах потерь мощности и электроэнергии при несинусоидальных режимах систем электроснабжения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Осипов. – Омск: Омский государственный технический университет, 2005. – 152 с.
13. Глебов, А. А. Модель краткосрочного прогнозирования электропотребления с помощью нейро-нечетких систем [Текст]: автореф. ... канд. техн. наук / А. А. Глебов. – Астрахань: Астраханский государственный университет, 2006. – 20 с.
14. Bakulevskiy, V. Research into the influence of climatic factors on the losses of electric energy in overhead power transmission lines [Text] / V. Bakulevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 5/8 (83). – С. 4–8. doi: [10.15587/1729-4061.2016.80072](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80072)
15. Бакулєвський, В.Л. Розробка алгоритма програмної реалізації моделі прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередачі напругою 6-35 кВ [Текст] / В. Л. Бакулєвський // ScienceRise. – 2016. – № 12/2 (29). – С. 6–10. doi: [10.15587/2313-8416.2016.85480](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.85480)

Bibliography

1. The Cabinet of Ministers of Ukraine. Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/148-97-%D0%BF>
2. Krasovsky, P. Y. (2006). Faktory, shcho vplyvaiut na dynamiku tekhnichnykh vtrat u liniyakh elektroperedach. Pratsi Dnipropetrovskoho natsionalnogo hirnychoho universytetu, 76. Available at: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/76/7.pdf>
3. Miroshnik, A. A. (2010). Refined algorithms for calculating the energy losses in networks 0,38 kV in real time. Regional energy

- issues, 2 (13), 35–42.
4. Turbin, S. V. (2007). Improving methods for determining environmental loads on air routes taking into consideration subject topographical features of the area. *Energy and Electrification*, 10, 3–9.
 5. Hamid, B. (1992). Automated load forecasting using neural networks. *American Power Conference*, 1149–1153.
 6. Gupta, P., Yamada, K. (1972). Adaptive Short-Term Forecasting of Hourly Loads Using Weather Information. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-91(5), 2085–2094. doi: [10.1109/tpas.1972.293541](https://doi.org/10.1109/tpas.1972.293541)
 7. Panuska, V. (1977). Short-term forecasting of electric power system load from a weather dependent model. *IFAC Symposium on Automatic Control and Protection of Electric Power Systems*, 414–418.
 8. Vorotnitsky, V. E., Turkina, O. V. (2008). Estimation of variable energy losses error in overhead lines because of the weather conditions neglect. *Electric stations*, 10, 42–49.
 9. Levchenko, I. I., Satsuk, E. I. (2008). Carrying capacity and monitoring of overhead power lines in extreme weather conditions. *Electricity*, 4, 2–8.
 10. Zhelezko, Y. S. (2004). Loss of electric energy in electric grids, depending on weather conditions. *Power station*, 11, 42–48.
 11. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine (2011). Method for determining the technological power consumption of transshaper and power lines. Available at: http://www.mega-billing.com/files/metodika_vtrat.pdf
 12. Osipov, D. S. (2005). Uchet nagreva tokovedushhih chastej v raschetah poter' moshhnosti i jelektroenergii pri nesinusoidal'nyh rezhimah sistem jelektrosnabzhenija. Omsk: Omskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet, 152.
 13. Glebov, A. A. (2006). Model' kratkosrochnogo prognozirovanija jelek-tropotreblenija s pomoshh'ju nejro-nechetkih sistem. Astrahan: Astrahanskij gosudarstvennyj universitet, 20.
 14. Bakulevskiy, V. (2016). Research into the influence of climatic factors on the losses of electric energy in overhead power transmission lines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (8 (83)), 4–8. doi: [10.15587/1729-4061.2016.80072](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80072)
 15. Bakulevskiy, V. (2016). Development of algorithms for software implementation of prediction models of technical electricity losses in 6-35 kV overhead power lines. *ScienceRise*, 12 (2 (29)), 6–10. doi: [10.15587/2313-8416.2016.85480](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.85480)

Надійшла (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6-35 кВ/ В. Л. Бакулевський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.55–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Тестирование программного обеспечения расчета технических потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередач напряжением 6-35 кВ/ В. Л. Бакулевский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.55–62. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Software testing calculation of technical losses in electricity overhead lines with voltage 6-35 kV/ V. Bakulevskiy // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.55–62. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бакулевський Володимир Леонідович – викладач, голова циклової комісії, циклова комісія електротехнічних дисциплін, Механіко-технологічний технікум Одеської національної академії харчових технологій, вул. Чорноморського козацтва, 12, м. Одеса, Україна, 65003; e-mail: bakulevsky_80@mail.ru.

Бакулевський Володимир Леонідович – преподаватель, глава цикловой комиссии, цикловая комиссия электротехнических дисциплин, Механико-технологический техникум Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Черноморского казачества, 12, г. Одеса, Украина, 65003; e-mail: bakulevsky_80@mail.ru.

Bakulevskiy Vladimir – lecturer, head of cyclic commission, the cycle commission of electrotechnical disciplines, Mechanics and Technology College of Odessa National Academy of Food Technologies, Chornomors'kogo kozactva str., 12, Odessa, Ukraine, 65003; e-mail: bakulevsky_80@mail.ru.

УДК 681.325.5.068

Н. В. САЧАНЮК-КАВЕЦЬКА**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СУБ'ЄКТІВ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ДОСТУПУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є**

В статті розглядаються можливості використання ряду Фур'є у логіко-часовому середовищі для підвищення ефективності обробки інформації. Детально описано спосіб розпізнавання зображень з виділенням ознак. Розглянуто класи логіко-часових функцій та доведено за допомогою теореми А.В. Кузнєцова їх замкнутість відносно операцій диференціювання та нерівнозначного віднімання. В якості наукової новизни розглянуто представлення логіко-часових функцій у матричній формі та реалізація дискретного перетворення Фур'є в логіко-часовому середовищі. Результати досліджень можуть бути використані при ефективній обробці образів для ідентифікації суб'єктів в системах захисту інформації.

Ключові слова: логіко-часова функція, матриця, нерівнозначне віднімання, ідентифікація суб'єктів, дискретне перетворення Фур'є

В статье рассматривается возможность использования ряда Фурье в логико-временной среде для повышения эффективности обработки информации. Детально описан способ распознавания изображений с выделением характерных свойств. Рассмотрены классы логико-временных функций и доказана их замкнутость относительно операций дифференцирования и неравнозначного вычитания. В качестве научной новизны рассмотрено представление логико-временных функций в матричной форме и реализация дискретного преобразования Фурье в логико-временной среде. Результаты исследований могут использоваться при эффективной обработке образов для идентификации субъектов в системах защиты информации.

Ключевые слова: логико-временная функция, матрица, неравнозначное вычитание, идентификация субъектов, дискретное преобразование Фурье

The article discusses the possibility of using Fourier transformation in the logical-time environment to improve the efficiency of information processing. The method of pattern recognition characteristics is described in detail. The classes of logic-time functions are considered and confirmed their relative isolation to the operation of non-equivalent subtraction and differentiation. As scientific novelty the ideas of logic-time functions in matrix form and implementation the discrete Fourier transformation in logical-time environment. The research results can be used for efficient image processing for the identification of subjects in information security systems.

Practical rule of representation of logic-time functions in the form of a matrix is developed. It is possible to calculate the Fourier coefficients and to make the appropriate number.

The effectiveness of the discrete Fourier transformation in the logical-time environment is characterized by a reduction of computational complexity and protection level of the source data and conversion results.

Practical advantage of the proposed method is further simplification for data encryption and decryption data that provides a low cost of computational time required to perform operations related to the protection of information.

The proposed approach implements a stream data encryption.

Keywords: logic-time functions, matrix, non-equivalent subtraction, identification of subjects, discrete Fourier transform.

Вступ. Розпізнавання образів – об'єктів, сигналів, ситуацій, явищ чи процесів – являє собою одну із найбільш розповсюджених задач, які людина розв'язує практично з першого і до останнього дня свого життя. Для розв'язування цієї задачі ми використовуємо свої потужні мозкові ресурси, вмикаючи одночасно, паралельно близько 7-8 мільярдів нейронів. Саме цей факт дає людині можливість практично миттєво впізнавати один одного, з великою швидкістю читати друковані та рукописні тексти тощо. Розпізнавання є задачею перетворення вхідної інформації, в якості якої доцільно використовувати деякі параметри, ознаки об'єктів, що розпізнаються у вихідну, яка є висновком про те, до якого класу відноситься даний образ. Зрозумілим є той факт, що для розпізнавання складних об'єктів та явищ потрібно створювати спеціальні системи розпізнавання для ідентифікації суб'єктів.

Однією з фундаментальних операцій комп'ютерної обробки інформації є дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) [1, 10]. Ця операція лежить в основі технологій обробки сигналів, зокрема, зображень та звуків. ДПФ перетворює послідовність цифрових вимірів сигналу через певні проміжки часу в спектральне представлення сигналу у вигляді набору амплітуд та фаз синусоїд, сума яких його відтворює. Для сучасного етапу розвитку інформаційних технологій характерним є динамічне розширення інтерфейсу між зовнішнім світом та засобами комп'ютерної обробки інформації [2, 9].

З розвитком цифрової техніки змінилися способи зберігання та оброблення даних. Наразі, домінуючу роль в процесі комп'ютерної обробки інформації відіграють засоби цифрової обробки сигналів, в основі яких лежить ДПФ. Це означає, що коло застосування ДПФ розширюється з кожним роком, як і вимоги до якості перетворення. Потужний імпульс використанню ДПФ надає розповсюдження систем відео нагляду та ідентифікації суб'єктів. Ці системи широко використовуються в технологічних процесах, системах регулювання, а також, є технічною основою боротьби з проявами тероризму. Окрім того, для більшості застосувань ДПФ, дані, які обробляються, носять конфіденційний характер. Тому важливою є ідентифікація суб'єктів в системах захисту інформації.

Характерним для таких систем є те, що вони працюють у реальному часі, а це диктує вимоги щодо швидкості реалізації ДПФ. Таким чином, важливою проблемою є пошук резервів для підвищення ефективності та прискорення реалізації ДПФ. Одним із таких резервів є можливість використання ДПФ в логіко-часовому середовищі [3, 6].

Основні задачі побудови систем розпізнавання образів для ідентифікації об'єктів в системах захисту інформації. Розглянемо основні задачі, які виникають в процесі побудови систем розпізнавання образів для ідентифікації об'єктів в системах захисту інформації.

Задача 1. Задача полягає у детальному та ретельному вивченні об'єктів, для розпізнавання яких проєктується дана система. Її мета – встановити особливості об'єктів, що вивчаються.

Задача 2. Полягає у проведенні класифікації об'єктів та явищ. Основне в даній задачі – вибір потрібного принципу класифікації. Останній визначається вимогами, що висувуються до системи розпізнавання і які залежать від того, які рішення будуть прийматись за результатами розпізнавання.

Задача 3. Ця задача полягає у складанні словника ознак, що використовується для апріорного опису кожного невідомого об'єкта чи явища. При розробці словника ознак потрібно пам'ятати про певні обмеження. По-перше, в словник можуть бути включені лише ті ознаки, відносно яких може бути отримана апріорна інформація, достатня для опису класів на мові цих ознак. По-друге, не доцільно включати до словника усі ознаки.

Задача 4. Задача полягає у описі класів об'єктів мовою ознак. Вона не має однозначного розв'язку і в залежності від обсягу апріорної інформації для її розв'язування можуть бути використані методи безпосередньої обробки вхідних даних, навчання чи самонавчання.

Задача 5. Задача полягає у розробці алгоритмів розпізнавання, що забезпечують віднесення об'єкту чи явища до того чи іншого класу.

Задача 6. Задача полягає у розробці спеціальних алгоритмів керування роботою системи. Їх призначення полягає в тому, щоб процес функціонування системи розпізнавання був оптимальним та обраний критерій якості цього процесу досягав екстремального значення.

Задача 7. Задача полягає у виборі показників ефективності системи розпізнавання та оцінки їх значень.

Сучасний розвиток суспільства пов'язаний з необхідністю збору та обробки великих об'ємів інформації. Саме ефективна і своєчасна обробка інформації та розпізнавання образів є однією з найважливіших науково-технічних проблем створення систем розпізнавання зображень на рівні людського сприйняття та мислення.

Мета роботи. Метою даної статті є розгляд можливості ефективного використання ДПФ в логіко-часовому середовищі для ідентифікації об'єктів в системах захисту інформації.

Математичні перетворення розпізнавання зображень із виділенням ознак в логіко-часовому середовищі. Одним із шляхів розпізнавання зображень є спосіб виділення ознак [4, 6], в якому при допомозі нових математичних операцій виділення спільних амплітудно-часових частин та ієрархічного додавання досягаються паралельна обробка усієї поверхні та створення неявно виражених ознак різних типів. Зокрема цей спосіб можна використовувати для ідентифікації та розпізнавання двовимірних та тривимірних зображень.

Ідентифікація зображень складається з результатів аналізу описів ознак з геометричними даними об'єкта. Структурно-символьний опис містить відомості про тип і форму, положення й орієнтацію об'єкта в полі зору відеодатчика. Для підвищення оперативності і якості такого розпізнавання необхідно вводити геометричні ознаки, які можна сформувати із силуетного контура зображення.

Розпізнавання зображення відбувається на якісно новому рівні шляхом генерації неявно виражених характерних ознак з організацією еволюціонуючої бази знань та врахуванням впливу цих ознак одна на одну та на вихідну функцію, яка може описувати характеристики реального об'єкта, не залежно від типу вхідного сигналу.

В якості такої функції використано логіко-часову функцію (ЛЧФ) [3], яка є подальшим розвитком апарату векторно-перемикаючих функцій Рабиновича З. Л. [5]. В апараті ЛЧФ використовується період існування аргументу T_i , особливості k -значної логіки, момент початку відрізка існування t_i . Оскільки за носія інформації ЛЧФ використовує час, то з'являється можливість перетворення будь-якого набору вхідних сигналів на часові інтервали і отримання шляхом певної обробки на виході пристрою деякого інтегрального показника, за допомогою якого можна ідентифікувати як стаціонарні зображення, так і об'єкти в динаміці.

У способі розпізнавання зображень з виділенням ознак паралельно проєктують зображення та перетворюють всі параметри об'єкта у ЛЧФ [4, 7]. Обробка отриманої системи ЛЧФ відбувається одночасно по кількісним та якісним каналам. При цьому в каналах якісної обробки з ЛЧФ синтезують відповідні ознаки об'єкта, а в каналах кількісної обробки з ЛЧФ формують комутаційні коди ознак. За результатами обробки ЛЧФ формують цільовий кодер. На основі синтезованих ознак та цільового кодера формують ідентифікаційну ЛЧФ. Розпізнають зображення шляхом порівняння отриманої ідентифікаційної ЛЧФ з еталонними зразками бази знань. За умови неповного розпізнавання зображення здійснюється розширення бази знань, шляхом запису отриманого результату порівняння в пам'ять бази в якості нового еталонного зразка та визначення найбільш близького до отриманого еталонного зразка.

Спосіб розпізнавання зображень з виділенням ознак здійснюється за допомогою способу паралельного складання на основі виділення спільної амплітудно-часової частини для усіх сигналів, які надходять, не залежно від їх типу. Під спільною амплітудно-часовою частиною розглядається мінімальний відрізок існування ЛЧФ з однаковою амплітудою. Спочатку всі сигнали підлягають попередній обробці у вхідному блоці 1 (рис. 1), під час якої відбувається перетворення сигналу у ЛЧФ. Потім виділяють одночасно декілька спільних амплітудно-часових частин, які характеризують ознаки зображення у вигляді фізичних розмірностей та якісних характеристик зображення. В блоці 2 відбувається аналіз якісних характеристик сигналів, за допомогою якого відбувається розподіл вхідної інформації на два канали: якісний канал 3 та кількісний канал 4; обробка даних в цих каналах проводиться паралельно і в результаті отримуються ЛЧФ. Операція синтезу ознак містить в собі ієрархічне додавання згідно з ієрархіч-

ною структурою, яка формується у відповідності з конкретними вимогами, що висуваються до розпізнавання зображень. В блоці 5 формується цільовий кодер, який в результаті виконання спеціальних операцій модифікується у ідентифікаційну ЛЧФ. Кожну нову ідентифікаційну ЛЧФ аналізують та порівнюють в 6-му блоці з еталонними зразками бази знань.

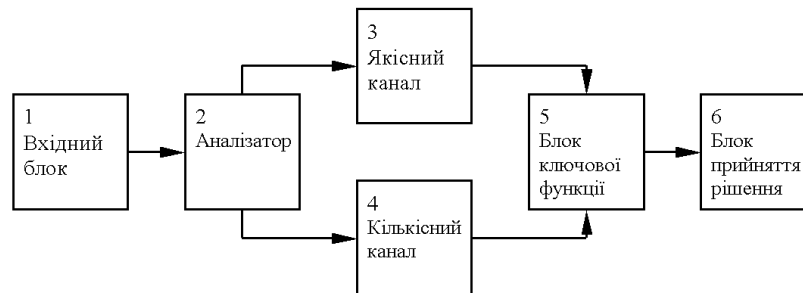


Рис. 1 – Схема розпізнавання зображень

Для аналізу інформації у логіко-часових середовищах та аналітичного представлення ідентифікаційної ЛЧФ було запропоновано [4] математичний апарат, що описує операції над ЛЧФ і за допомогою якого було доведено можливість паралельної обробки даних, які представлені за допомогою апарату ЛЧФ. Для розширення можливостей розпізнавання зображень у логіко-часовому середовищі, розглянуто спеціальні операції над ЛЧФ, які базуються на введеному понятті Δ -розбиття, що дозволило перейти від аналогового представлення ЛЧФ до дискретного. Зокрема, для покращення можливостей виділення контурів зображення введено операцію диференціювання ЛЧФ та доведено основні властивості цієї операції, які дозволяють: розробити класифікацію ознак об'єктів; підвищити швидкість обробки зображень шляхом незалежної обробки окремих його фрагментів; розробити методи апаратного визначення похідної ЛЧФ для виділення контуру зображення.

Виділено три класи ЛЧФ k -значної логіки, які замкнуті відносно операцій диференціювання та нерівнозначного віднімання. За теоремою А.В. Кузнецова доведено базову функціональну повноту системи ЛЧФ k -значної логіки. Перерахуємо вказані класи ЛЧФ: клас ЛЧФ, що між двома нулями приймають стале значення ($f(t, t_1, T_1, a_1)$, де t – поточне значення часу, t_1 – часова координата, T_1 – тривалість відрізка існування, a_1 – амплітуда, $a_1 = \overline{0, k-1}$, $T_1 \neq t_{k+1} - t_k$); клас ЛЧФ, які мають m часових координат, причому їх відрізки існування не перетинаються ($f(t, t_1, \dots, t_m, T_1, \dots, T_m, a_1, \dots, a_m)$, $a_i = \overline{0, k-1}$, $i = \overline{0, m}$); клас монотонних функцій (ЛЧФ $f(t, t_1, \dots, t_m, T_1, \dots, T_m, a_1, \dots, a_m)$ називається зростаючою (спадною) ЛЧФ, якщо часові координати, починаючи з другої, утворюються за допомогою першої часової координати та відповідних тривалостей відрізків існування

$$t_i = t_1 + \sum_{j=1}^{i-1} T_j,$$

Експериментальна ідентифікація складається з аналізу отриманої ключової функції на інформативність, визначення найбільш близького еталону з метою з'ясування типу зображення та визначення можливих варіантів розширення бази знань за ступенем наближення отриманого результату до еталону з подальшим емпіричним уточненням.

$i = \overline{2, m}$ і справедлива нерівність $a_i < a_{i+1}$ ($a_i > a_{i+1}$), $i = \overline{1, m}$.)

Ще однією формою аналізу логічних даних, знаходження якісних і кількісних ознак є дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) [9, 10]. Це потужний засіб дослідження сигналів різної фізичної природи. Теоретичний та практичний інтерес до цього перетворення з роками не зменшується, оскільки воно застосовується у різноманітних галузях науки та техніки.

Розвиток апарату ДПФ в теорії логіко-часових функцій дозволить використати його для ефективного розв'язування задач розпізнавання властивостей та належності ЛЧФ до заданого класу та для синтезу і аналізу дискретних пристроїв.

Найбільш перспективно реалізувати це перетворення у логіко-часовому базисі, застосувавши матричну форму представлення ЛЧФ, яка ґрунтується на введеному понятті Δ -розбиття [4, 8].

Нехай маємо деяку ЛЧФ k -значної логіки $f(t, t_1, t_2, \dots, t_k, T_1, T_2, \dots, T_k, a_1, a_2, \dots, a_k)$, де t_1, \dots, t_m – часові координати; T_1, \dots, T_m – відповідні відрізки існування; a_1, \dots, a_m – амплітуди, що відповідають даним відрізкам існування; яка розглядається на деякому часовому проміжку $[t_i, t_{i+1}]$.

Усі тривалості часових інтервалів T_i , $i = \overline{1, k}$ можна виразити в Δ -інтервалах, тому:

а) якщо $t_{i+1} - t_i = mn\Delta_i$, то

$$F = \begin{pmatrix} \underbrace{a_1 \ a_1 \dots a_1}_{T_1 \text{ раз}} & \underbrace{a_2 \ a_2 \dots a_2}_{T_2 \text{ раз}} & & \\ \dots & \dots & & \\ \dots & & \underbrace{a_k \ a_k \dots a_k}_{T_k \text{ раз}} & \end{pmatrix}_{m \times n}.$$

б) якщо $t_{i+1} - t_i = p\Delta_i$ та $p < mn\Delta_i$, то

$$F = \begin{pmatrix} p \left\{ \begin{array}{cc} \underbrace{a_1 \ a_1 \dots a_1}_{T_1 \text{ раз}} & \underbrace{a_2 \ a_2 \dots a_2}_{T_2 \text{ раз}} \\ \dots & \dots \\ \underbrace{a_{k-1} \ a_{k-1} \dots a_{k-1}}_{T_{k-1} \text{ раз}} & \underbrace{a_k \ a_k \dots a_k}_{T_k \text{ раз}} \end{array} \right. \\ m-p \left\{ \dots \right. \\ \left. \begin{array}{cc} * & * \dots * \\ * & * \dots * \end{array} \right. \end{pmatrix}_{m \times n},$$

де символ “*” може набувати довільне із значень від 0 до $k-1$, яке обирається з огляду на поставлену задачу.

Пара ДПФ у базисі B_n визначається матричним співвідношенням виду:

$$F = B_n T; T = B_n^{-1} F,$$

де у першому виразі T – вектор вихідних даних розмірності n , який піддається перетворенню;

F – вектор результату (спектр сигналу) тієї ж розмірності; B_n – квадратна матриця перетворень розмірності n .

У другому виразі F – вектор вихідних даних; B_n^{-1} – матриця, обернена до матриці перетворень; T – спектр сигналу.

Використання рядів Фур’є, які дозволяють виконувати згортку функцій є одним із потужних методів обробки зображень.

Априорне переконання в тому, що ряд Фур’є інтегрованої функції реалізує поточкове представлення цієї функції базується на співвідношеннях ортогональності. Як можна переконатись, це співвідношення виконується для рядів Фур’є достатньо гладких функцій. Однак ці вимоги не виконуються для функцій із більш широких класів. Але можна досягти цікавих результатів замінюючи поняття збіжності ряду можливістю підсумовування. Варто додати, що аналогічні питання виникають і при тлумаченні диференціювання, оскільки поточкове диференціювання, якщо не робити обмежень на клас функцій, також не завжди ефективне в якості технічного апарату.

Для розвинення ЛЧФ в ряд, подібний до ряду Фур’є будемо використовувати оператор узагальненого інтегрування:

$$\int_m (f_i \omega_i) dt,$$

де f_i – інформація, що міститься в i -му визначнику; m – кількість отриманих функцій; ω_i – вагові коефіцієнти функцій систем визначників; \int_m – узагальнений

оператор інтегрування.

Підінтегральні функції представляються у матричній формі і їх множення це є логічний кон’юнктивний добуток матриць (логічним кон’юнктивним добутком матриць X_n та Y_n назива-

ється матриця $X_n Y_n (\wedge)$, кожен елемент якої обчислюється за формулою $\bigwedge_{i=1}^n x_{il} y_{ij}$, $i, j = \overline{1, n}$).

Зрозуміло, що довільна ЛЧФ та її інверсія є ортогональними функціями, оскільки

$$\int_m g(t) \cdot \overline{g(t)} dt = 0.$$

Зауваження.

Для спрощення записів довільну логіко-часову функцію $g(t, t_1, t_2, \dots, t_k, T_1, T_2, \dots, T_k, a_1, a_2, \dots, a_k)$, будемо позначати $g(t)$.

Нехай $f(t, t_1, t_2, \dots, t_k, T_1, T_2, \dots, T_k, a_1, a_2, \dots, a_k)$ – довільна інтегрована функція. Тоді коефіцієнтами Фур’є відносно логіко-часових функцій k -значної логіки називаються функції

$$C_k = \int_m g(t) \cdot f(t) \cdot \overline{g(t)} dt,$$

де $g(t), \overline{g(t)}$ – базис перетворення.

Для довільної інтегрованої ЛЧФ можна обчислити коефіцієнти Фур’є та скласти відповідний ряд:

$$\sum_{k=1}^{\infty} g(t) \cdot C_k \cdot \overline{g(t)}.$$

Оскільки можливих класів ЛЧФ k -значної логіки є три, то для кожного класу формується свій базис перетворення.

$$g(t, t_1, \Delta_i, a_1) = \begin{cases} 0, & t < t_1; \ t > t_1 + \Delta_i \\ a_1, & t_1 < t < t_1 + \Delta_i \end{cases}$$

та її інверсія.

Висновки. Застосування рядів та перетворення Фур’є для ЛЧФ можливе при використанні матричної форми представлення ЛЧФ. При цьому для кожного класу k -значної ЛЧФ необхідно формувати свій базис перетворення. Даний підхід, по суті, реалізує потокове шифрування даних, а також дешифрування отриманих результатів. Головною перевагою цього підходу є простота операцій шифрування та дешифрування, що забезпечує низький рівень витрат обчислювального часу на виконання операцій, пов’язаних із захистом інформації. Ефективність ДПФ в логіко-часовому середовищі характеризується зменшенням обчислювальної складності та рівнем захищеності вихідних даних та результатів перетворення.

Список літератури:

1. Смит, С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников [Текст] / С. Стивен. – Москва: Додэка XXI. – 2008. – 720 с.
2. Марковський, О. П. Захищена реалізація захисту зображень в GRID – системах [Текст] / О. П. Марковський, М. В. Невдащенко, А. М. Білашевська // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2014. – № 61. – С. 103–109.

3. Кожем'яко, В. П. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники [Текст] / В. П. Кожем'яко, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лысенко, Ю. Ф. Кутаев. – Киев: УМК ВО, 1990. – 251 с.
4. Сачанюк-Кавецька, Н. В. Елементи око-процесорної обробки зображень у логіко-часовому середовищі [Текст]: монографія / Сачанюк-Кавецька, Н. В. Кавецька, В. П. Кожем'яко. – Вінниця: Універсум, 2004. – 135 с.
5. Рабинович, З. Л. Основы теории элементарных структур ЭВМ [Текст] / З. Л. Рабинович. – Москва: Радио и связь, 1982. – 280 с.
6. Кожем'яко, В. П. Паралельно-ієрархічне перетворення як системна модель оптико-електронних засобів штучного інтелекту [Текст]: монографія / В. П. Кожем'яко, Ю. Ф. Кутаєв, С. В. Свєчніков, Л. І. Тимченко, А. А. Яровий. – Вінниця: Видавництво Вінницького національного технічного університету, 2003. – 324 с.
7. Сачанюк-Кавецька, Н. В. Некоторые вопросы теории взаимодействия логико-временных функций [Текст] / Сачанюк-Кавецька Н. В. // Электронное моделирование. – 2001. – Т. 23, № 5.
8. Панасенко, С. П. Алгоритмы шифрования: специальный справочник [Текст] / С. П. Панасенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 576 с.
9. Bianchi, T. On the implementation of the Discrete Fourier transform in the encrypted domain [Text] / T. Bianchi, A. Piva, M. Barni // 2008 IEEE transactions on information forensics and security, 2009. – P. 86–97. doi: [10.1109/icassp.2008.4517970](https://doi.org/10.1109/icassp.2008.4517970)
10. Брэй, Б. Микропроцессоры Intel: 8086/8088, 80186/80188, 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium Pro Processor, Pentium 4. Архитектура, программирование, интерфейсы [Текст] / Б. Брэй. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, – 2005. – 1328 с.

Bibliography (transliterated):

1. Smit, S. (2008). Cifrovaja obrabotka signalov. Prakticheskoe rukovodstvo dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. Moscow: Dodjeka HHI, 720.
2. Markovskiy, O. P., Nevdashchenko, M. V., Bilashevskaya, A. M. (2014). Zakhyschena realizatsiia zakhystu zobrazen v GRID-systemakh. Visnyk NTUU «KPI». Informatyka, upravlinnia ta obchysluvalna tekhnika, 61, 103–109.
3. Kozhemjako, V. P., Timchenko, L. I., Lysenko, G. L., Kutaev, Ju. F. (1990). Funkcional'nye jelementy i ustrojstva optoelektroniki. Kyiv: UMK VO, 251.
4. Sachaniuk-Kavetska, N. V., Kozhem'iako, V. P. (2004). Elementy oko-protsesornoj obrobky zobrazen u lohiko-chasovomu seredovyshchi. Vinnytsia: Universum, 135.
5. Rabinovich, Z. L. (1982). Osnovy teorii jelementnyh struktur JeVM. Moscow: Radio i svjaz', 280.
6. Kozhem'iako, V. P., Kutaiev, Iu. F., Sviechnikov, S. V., Tymchenko, L. I., Yarovy, A. A. (2003). Parallelnio-iiєrarkhichne peretvorennia yak systemna model optyko-elektronnykh zasobiv shtuchnoho intelektu. Vinnytsia: Vydavnytstvo Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 324.
7. Sachanjuk-Kaveckaja, N. V. (2001). Nekotorye voprosy teorii vzaimodejstvija logiko-vremennyh funkcij. Jelektronnoe modelirovanie, 23 (5).
8. Panasenko, S. P. (2009). Algoritmy shifrovaniya : special'nyj spravochnik. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 576.
9. Bianchi, T., Piva, A., Barni, M. (2009). On the implementation of the Discrete Fourier transform in the encrypted domain. 2008 IEEE transactions on information forensics and security, 86–97. doi: [10.1109/icassp.2008.4517970](https://doi.org/10.1109/icassp.2008.4517970)
10. Brzej, B. (2005). Mikroprocessory Intel: 8086/8088, 80186/80188, 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium Pro Processor, Pentium 4. Arhitektura, programmirovanie, interfejsy. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 1328.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення ефективності обробки інформації для ідентифікації суб'єктів в системах контролю доступу за допомогою перетворення Фур'є/ Н. В. Сачанюк-Кавецька// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.63–67. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Повышение эффективности обработки информации для идентификации субъектов в системах контроля доступа с помощью преобразования Фурье/ Н. В. Сачанюк-Кавецкая// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.63–67. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Improving the efficiency of information processing for the identification of subjects in access control systems with the help of Fourier transform/ N. Sachaniuk-Kavets'ka//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.63–67. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сачанюк-Кавецька Наталія Василівна – кандидат технічних наук, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри «Вищої математики» та кафедри «Менеджменту безпеки інформаційних систем»; Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021; e-mail: sachanuk@ya.ru.

Сачанюк-Кавецька Наталія Васильевна – кандидат технических наук, Винницкий национальный технический университет, доцент кафедры “Высшей математики» и кафедры «Менеджмента безопасности информационных систем»; Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, Украина, 21021; e-mail: sachanuk@ya.ru.

Sachaniuk-Kavets'ka Natalya – PhD, associate professor, Vinnytsia National Technical University; Khmelnytske shose, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21021; e-mail: sachanuk@ya.ru.

УДК 621.396.969

Н. С. ЄРЬОМІНА, О. М. СОТНІКОВ, В. А. ТАРШИН

ФОРМУВАННЯ ВИРІШАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМУМУ УЗАГАЛЬНЕНОГО КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ

Проведено аналіз впливу геометрії візування кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН) на вирішальну функцію (ВФ), яка визначає точнісні характеристики системи. Встановлено, що найбільший вплив з геометричних спотворень на ВФ здійснюють перспективні спотворення.

Запропоновано метод формування ВФ КЕСН, заснований на адаптації еталонних зображень (ЕЗ) до перспективних спотворень. Показана доцільність формування ЕЗ поверхні візування (ПВ) шляхом визначення максимуму коефіцієнта взаємної кореляції в кожному елементі розрізнення та побудови узагальненої взаємної функції кореляції.

Ключові слова: кореляційно-екстремальні системи навігації, вирішальна функція, перспективні спотворення, еталонні зображення.

Проведен анализ влияния геометрии визирования корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭСН) на решающую функцию (РФ), которая определяет точностные характеристики системы. Установлено, что наибольшее влияние из геометрических искажений на РФ осуществляют перспективные искажения.

Предложен метод формирования РФ КЭСН, основанный на адаптации эталонных изображений (ЭИ) к перспективным искажениям. Показана целесообразность формирования ЭИ поверхности визирования (ПВ) на основе определения максимума коэффициента взаимной корреляции в элементах разрешения и построения обобщенной взаимной функции корреляции.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальные системы навигации, решающая функция, перспективные искажения, эталонные изображения.

The article deals with issues related to improving the correlation-extreme navigation systems by developing a method of forming a crucial function based on adaptation of reference images to perspective distortion depending on the viewing conditions in obtaining basic information about viewing surface. The research include: suggestions for improving the correlation-extreme navigation systems and increasing system performance. In scientific innovation first formulated and solved the problem of developing a method of forming the crucial function of correlation-extreme air navigation systems based on the adaptation of reference images to perspective distortion depending on the viewing conditions in obtaining basic information about viewing surface. Method wording set out an approach based on identifying cross-correlation coefficient maximum in each distribution building elements and functions of generalized cross correlation.

The practical significance lies in the possibility of using the proposed method in designing and researching ways to improve value-extreme navigation systems of aircraft and their systems of recycling.

Keywords: correlation-extreme navigation system, a critical function, perspective distortions, reference image.

Вступ. Ефективність функціонування КЕСН визначається впливом факторів, що призводять до невідповідності первинної інформації про ПВ, яка використовується для формування поточних зображень (ПЗ), еталонній, одержаній задалегідь [1]. До такої невідповідності можуть призводити зміни електрофізичних властивостей об'єктів і фонів ПВ, застосування засобів спотворення об'єктів та самої ПВ [2, 3]. Також на ефективність функціонування КЕСН можуть впливати сезонні, погодні, добові зміни, які мають природний характер. Крім того, невідповідність ПЗ задалегідь сформованому ЕЗ виникає при різних геометричних умовах візування КЕСН та формування ЕЗ [4]. Вплив факторів, які призводять до невідповідності ПЗ еталонному зображенню, не може бути компенсований на етапі первинної обробки.

Основне завдання КЕСН полягає в високоточному місцевизначенні об'єкта навігації на основі формування неспотвореної унімодальної ВФ, яка визначається шляхом порівняння поточного та еталонного зображень. Тому забезпечення відповідності зображень, що використовуються КЕСН при місцевизначенні, підкреслює актуальність розробки методу формування ВФ КЕСН безпілотних літальних апаратів (БПЛА), заснованого на адаптації ЕЗ до перспективних спотворень зображень ПВ.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Питанням розробки методів формування ЕЗ присвячена значна кількість публікацій. Так в [5] запропоновано підхід до синтезу ЕЗ на основі формування поля кореляційного аналізу; в [6] запропоновано

підхід до синтезу ЕЗ на основі формування поля фрактальних розмірностей; в [7] досліджується можливість використання в якості інформативних ознак геометричних параметрів сукупності фрагментів зображення; в [8] розглядаються принципи вибору ділянок місцевості для формування ЕЗ; в [9] пропонується підхід до формування ЕЗ в умовах високої об'єктової насиченості; в [10] розглядається підхід до покращення зображень на основі фільтрації шумів. Але не зважаючи на широкий спектр досліджень в області створення ЕЗ, в відомих роботах синтез ЕЗ здійснюється без урахування умов візування КЕСН, перспективні спотворення не беруться до уваги. Відповідно до цього виникає необхідність проведення досліджень, спрямованих на розробку методу формування ВФ, заснованого на урахуванні перспективних спотворень при формуванні еталонних зображень в залежності від умов візування при одержанні первинної інформації про поверхню візування.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення впливу перспективних спотворень на ефективність функціонування КЕСН.

Задачею дослідження є розробка методу формування ВФ кореляційно-екстремальними системами навігації БПЛА, заснованого на адаптації ЕЗ до перспективних спотворень.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідження впливу геометричних спотворень на ВФ КЕСН.
2. Розробка методу формування ВФ КЕСН

по критерію максимуму коефіцієнта взаємної кореляції в кожному елементі розрізнення та побудови узагальненої взаємної функції кореляції шляхом адаптації ЕЗ до перспективних спотворень.

Матеріали та методи дослідження впливу геометричних спотворень на ВФ та їх урахування при корекції ЕЗ.

Методичною основою виконання комплексних досліджень є: моделювання процесу формування ВФ в умовах геометричних спотворень на різних типах поверхонь візування; моделювання побудови узагальненої взаємної кореляційної функції на основі визначення максимуму коефіцієнта взаємної кореляції в кожному елементі розрізнення.

Об'єктом дослідження є процес формування ВФ в умовах впливу перспективних спотворень на ПЗ за критерієм максимуму коефіцієнта взаємної кореляції в

кожному елементі розрізнення та побудови узагальненої взаємної функції кореляції.

Предметом дослідження є зменшення впливу перспективних спотворень на ВФ шляхом корекції ЕЗ.

Відповідно до узагальненої структурної схеми КЕСН, яка наведена на рис. 1, вирішальна функція $\mathbf{R}(t, \mathbf{r}, \theta)$, що формується системою навігації має наступний вигляд

$$\mathbf{R}(t, \mathbf{r}, \theta) = \mathbf{F}[\mathbf{S}_{Cl}(t, \theta), \mathbf{S}_{Rl}], \quad (1)$$

де t – параметр часу; \mathbf{r} – вектор зсуву ПЗ $\mathbf{S}_{Cl}(t, \theta)$ відносно ЕЗ $\mathbf{S}_{Rl}(\theta)$; θ – кут візування, що визначає перспективні спотворення поточного зображення $\mathbf{S}_{Cl}(t, \theta)$.

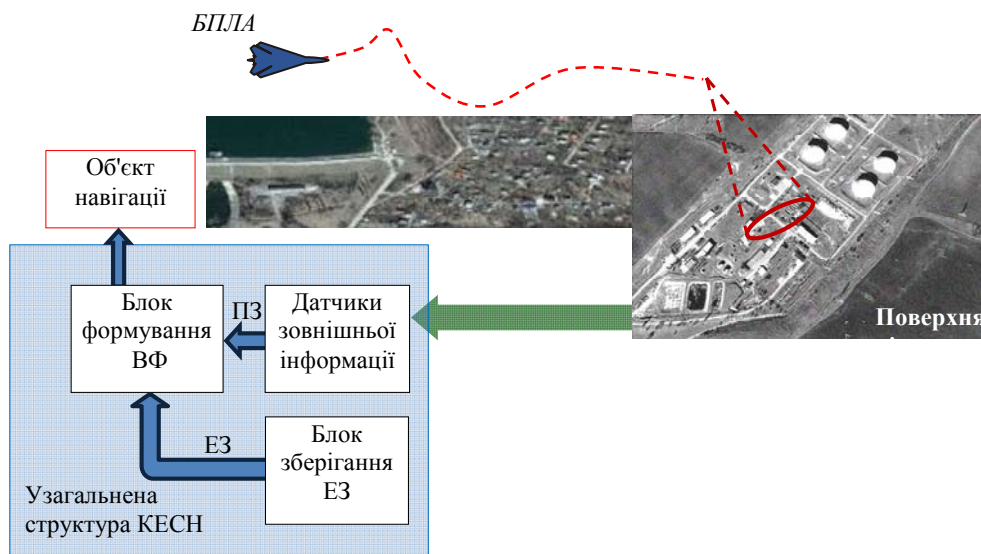


Рис. 1 – Приклад схеми системи навігації з КЕСН та її узагальненої структури

Модель поточного зображення $\mathbf{S}_{Cl}(t, \theta)$ з урахуванням впливу середовища розповсюдження та шумів приймальної системи має вигляд

$$\mathbf{S}_{Cl}(t, \theta) = \mathbf{F}_{RS} \{ \mathbf{F}_{PM} [\mathbf{F}_{OS} (\boldsymbol{\varepsilon}(t), \boldsymbol{\mu}(t))], \mathbf{n}(t), \theta \}, \quad (2)$$

де \mathbf{F}_{RS} – оператор первинної обробки інформації в приймальній системі КЕСН; \mathbf{F}_{PM} – оператор середовища розповсюдження сигналів; \mathbf{F}_{OS} – оператор, що описує яскравість (відбивну здатність) елементів ПВ в залежності від діелектричної $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ та магнітної $\boldsymbol{\mu}(t)$ проникностей об'єктів і фонів; $\mathbf{n}(t)$ – адитивний шум приймальної системи.

Така модель ПЗ справедлива в разі, якщо поворот ПЗ щодо ЕЗ відсутній. В іншому випадку модель ПЗ повинна враховувати геометричні спотворення, обумовлені геометрією візування.

При теоретичних дослідженнях КЕСН використовують ЕЗ, які синтезовані заздалегідь та не враховують геометричних умов візування району місцевизначення БПЛА. Тобто ЕЗ на етапі вторинної обробки не підлягають перетворенням. Але у процесі функці-

онування КЕСН може виникати необхідність корекції ЕЗ до конкретних умов візування.

Розглянемо формування ВФ у випадку виникнення геометричних спотворень на типових поверхнях візування, модель яких розроблена та досліджена в роботах [4, 5, 7]. За результатами статистичного моделювання процесу місцевизначення КЕСН на ПВ з різним фоновим об'єктовим складом (ФОС) визначено, що яскравість елемента неспотвореного вихідного зображення (ВЗ) $S_{Oj}(i, j)$ має описуватися через яскравість об'єктів і фонів ПВ

$$S_{Oj} = \left\| \sum_{v=1}^V F_{O_v}(i, j) + \sum_{w=1}^W F_{B_w}(i, j) \right\|, \quad (3)$$

де F_{O_v} – яскравість зображення v -го об'єкта; F_{B_w} – яскравість зображення w -го фонів; V та W – кількість об'єктів та фонів різної яскравості і форми на ВЗ.

Загальна кількість об'єктів і фонів (V і W) на зображенні ПВ може бути довільною.

За результатами аналізу великої кількості зображень ПВ та використання їх при статистичному моделюванні процесу місцевизначення КЕСН на ПВ з різ-

ним ФОС на основі розробленої моделі ВЗ (3) здійснено класифікацію зображень ПВ за об'єктовою насиченістю. Згідно з цією класифікацією зображення ПВ з кількістю об'єктів $V \leq V_{\min} = 3 \dots 5$, віднесені до ПВ з низькою об'єктовою насиченістю та позначені підмножиною Φ_{01} , зображення з $V_{\min} < V \leq V_{\max} = 10 \dots 15$ віднесені до ПВ з нормальною об'єктовою насиченістю (Φ_{02}), а зображення з $V > V_{\max}$ – до ПВ з високою об'єктовою насиченістю (Φ_{03}).

При моделюванні процесу формування ВФ покладаємо відомими висоту h_0 зйомки ПВ з БПЛА, координати центру ПЗ в системі координат, пов'язаної з ПВ в районі прив'язки (рис. 2), а також розподіл як-

равостей (відбиваючих властивостей) об'єктів та фонів в залежності від типу датчика зовнішньої інформації в площині, що збігається з земною поверхнею. Крім того, припустимо, що діаграма спрямованості антени (ДСА) (по потужності) для кожного з парціальних променів багатопроменевої антени КЕСН відома, також відомі розміри матриці ЕЗ та крок сітки ЕЗ по кожній з координат.

Відповідно до сітки зображення ПВ (рис.2, в) лінійні розміри на краях відносно центру зображення мають суттєву нелінійну відмінність. Ці обставини обумовлюють необхідність їх врахування для зменшення або повного усунення перспективних спотворень зображень.

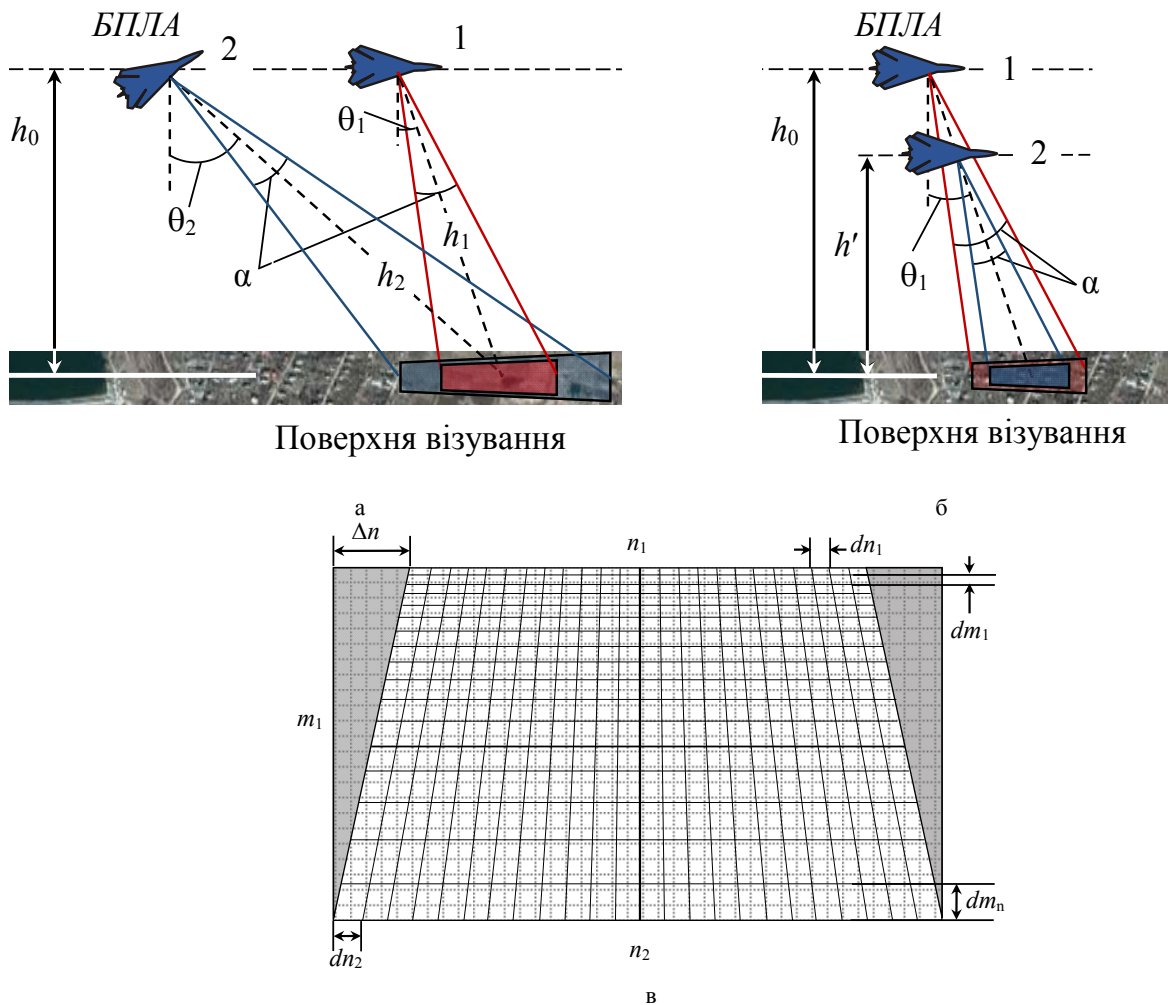


Рис. 2 – Геометричні спотворення: а – перспективні спотворення; б – масштабні спотворення; в – сітка зображення

Для врахування впливу перспективних спотворень доцільно використовувати модель опису ПВ, яка враховує кореляційні властивості зображень ПВ та уявляє собою узагальнений телеграфний процес [11]. Відповідно до цієї моделі ПВ вибір фрагменту місцевості для побудови ЕЗ доцільно здійснювати кореляційним методом на основі побудови взаємної кореляційної функції (ВКФ) та пошуку її максимального значення. Але, враховуючи нерівномірність спотворень зображення, пошук максимального значення ВКФ потрібно здійснювати шляхом побудови окре-

мих ВКФ для кожного елементу розрізнення та побудови узагальненої ВКФ. Для формування часткових вирішальних функцій для різних кутів візування необхідно мати сукупність G еталонних зображень, $G-1$ з яких побудовані з урахуванням виникнення перспективних спотворень зображення ПВ відповідно до виразу

$$S_{Rl} = \left\| S_{Rl_1}(\theta_1) \ S_{Rl_2}(\theta_2) \ \dots \ S_{Rl_G}(\theta_G) \right\|, \quad (4)$$

де $S_{R_{I_2}}(\theta_2)$, $S_{R_{I_G}}(\theta_G)$ – ЕЗ, сформовані при наявності перспективних спотворень.

В подальшому відповідно до виразу (1) формулюються часткові ВФ

$$R_g(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g) = F[S_{Cl}(t, \theta), S_{R_I}(\theta_g)]. \quad (5)$$

Відповідно до представленої на рис. 2, а геометрії візування КЕСН для різних типів поверхонь району місцевизначення шляхом математичного моделювання одержані усереднені оцінки коефіцієнта взаємної кореляції (КВК) ПЗ та ЕЗ. Результати оцінки КВК для умов візування $\alpha = 40^\circ$ та $h_0 = 1000$ м наведені на рис. 3.

Усереднені для вказаних вище умов моделювання оцінки середньоквадратичних помилок (СКП) суміщення ПЗ та ЕЗ при наявності перспективних спотворень наведені на рис. 4.

Аналіз результатів оцінки коефіцієнта кореляції та СКП суміщення ПЗ та ЕЗ з різною об'єктивною насиченістю показав, що перспективні спотворення незалежно від типу ПВ суттєво впливають на ВФ, що обумовлює необхідність їх врахування при місцевизначенні КЕСН.

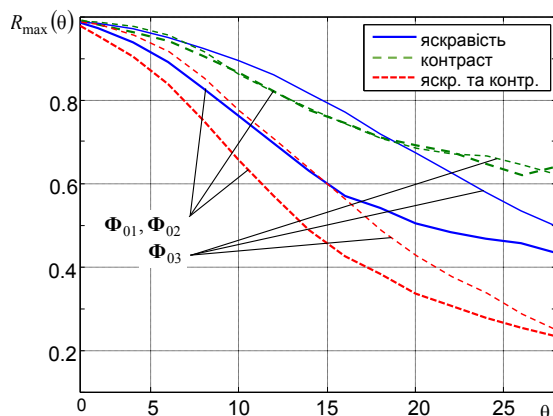


Рис. 3 – Результати оцінки коефіцієнта кореляції ПЗ та ЕЗ при наявності перспективних спотворень на зображеннях з різною об'єктивною насиченістю

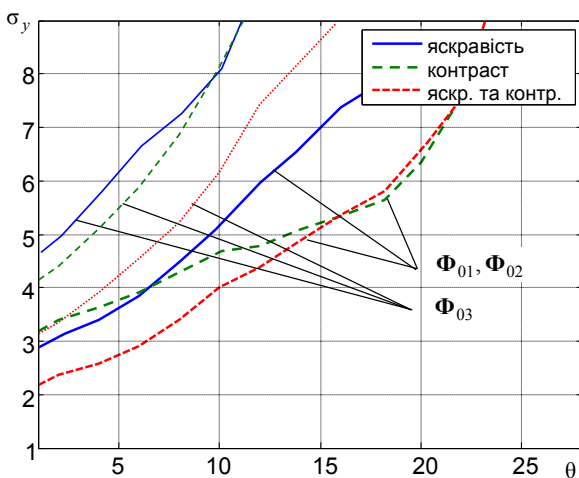


Рис. 4 – Результати оцінки СКП суміщення ПЗ та ЕЗ при наявності перспективних спотворень на зображеннях з різною об'єктивною насиченістю

Визначення максимального значення коефіцієнта взаємної кореляції ПЗ та ЕЗ здійснюється шляхом одночасного формування сукупності часткових ВФ відповідно до виразу (5). При цьому максимальне значення $R_g(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g)$ буде забезпечуватися при умові $|\theta - \theta_g| \rightarrow \min$. Виконання цієї умови також буде забезпечувати мінімальне значення похибки місцевизначення КЕСН

$$\Delta R(\bar{\mathbf{r}}) = |R_{g_{\max}}(t, \mathbf{r}, \theta, \theta_g) - R_{g_{\max}}(t, \mathbf{r})| \rightarrow \min. \quad (6)$$

Приклад формування часткових ВФ КЕСН, відповідно до виразу (5), для трьох кутів візування ($G = 3$) КЕСН при здійсненні місцевизначення на ПВ з нормальною об'єктивною насиченістю наведений на рис. 5.

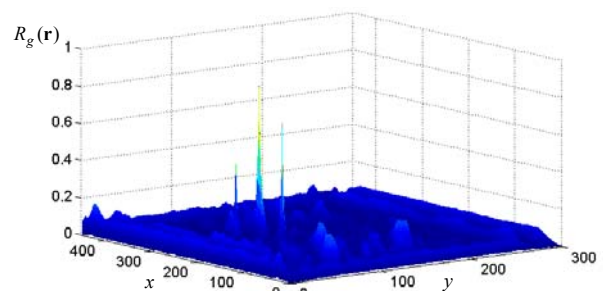


Рис. 5 – Результати обчислення часткових ВФ при наявності перспективних спотворень

Відповідно до одержаного результату уточнення оцінки максимуму ВФ ($\bar{\mathbf{r}}$) може бути здійснене шляхом побудови параболічної апроксимації часткових ВФ (рис. 6). Також слід зазначити, що застосування запропонованого підходу до формування ВФ забезпечує можливість оцінки величини перспективних спотворень зображень ПВ по параметрах ВФ.

Алгоритм реалізації розробленого методу формування ВФ по критерію максимуму узагальненої ВФ, який ґрунтується на локалізації об'єктів прив'язки шляхом поелементного кореляційного аналізу поточного та еталонного зображень ПВ, представлений у вигляді структурної схеми, наведений на рис. 7.

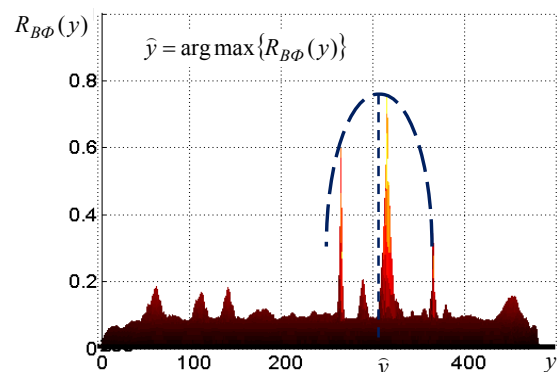


Рис. 6 – Результати визначення координат максимуму результуючої ВФ КЕСН шляхом параболічної апроксимації

Обговорення результатів розробки методу формування вирішальної функції КЕСН за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції.

Формування унімодальної неспотвореної ВФ потребує урахування геометричних спотворень, що виникають в залежності від геометрії візування КЕСН. Одержані шляхом моделювання чисельні оцінки коефіцієнта взаємної кореляції та середньоквадратичної помилки суміщення ПЗ та ЕЗ з різною об'єктовою насиченістю показали, що зменшення помилки місцевизначення КЕСН потребує використання для прив'язки ділянок ПВ з нормальною та низькою об'єктовою насиченістю, оскільки на ділянках ПВ з високою об'єктовою насиченістю точність прив'язки буде гіршою.

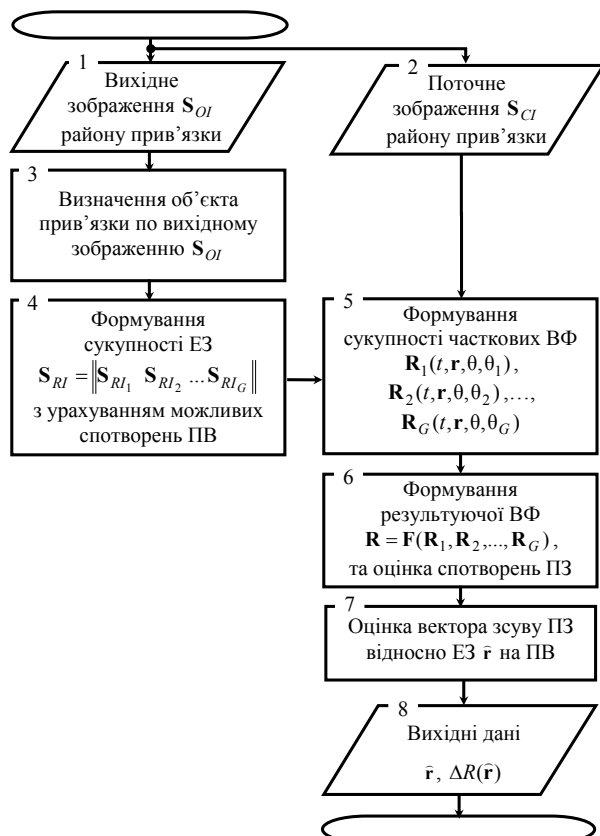


Рис. 7 – Структурна схема алгоритму формування ВФ матричним корелятором

Уточнення місцевизначення КЕСН в умовах перспективних спотворень ПВ доцільно здійснювати шляхом формування матриці часткових ВФ побудованих для кожного з елементів розрізнення, та визначення максимального значення узагальненої взаємної функції кореляції, яка в свою чергу визначає як ймовірність правильної локалізації об'єкту прив'язки на ПВ, так і точність місцевизначення КЕСН.

Висновки

1. Розроблений метод формування вирішальної функції КЕСН за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції дозволяє на етапі вторинної обробки інформації врахувати вплив перспективних спотворень на функціонування КЕСН за рахунок адаптації ЕЗ до геометричних умов візування. Та-

кий підхід суттєво спрощує алгоритми формування ВФ, в яких усунення впливу геометричних спотворень здійснюється за рахунок геометричних перетворень поточного зображення.

2. Чисельні оцінки визначення координат максимуму результуючої ВФ підтверджують обґрунтованість розробленого методу та показують можливість забезпечення малих значень помилки місцевизначення КЕСН незалежно від типу ПВ та кутів візування.

Список літератури:

1. Сотников, А. М. Проблемы и перспективы развития навигационного обеспечения летательных аппаратов [Текст] / А. М. Сотников, В. А. Таршин // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2013. – Вип. 3 (36). – С. 57–63.
2. Сотников, О. М. Проблеми та напрямки розвитку кореляційно-екстремальних систем наведення керованих літальних апаратів [Текст] / О. М. Сотников, В. А. Таршин, П. В. Опенько // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2013. – № 3 (18). – С. 93–96.
3. Vorobiov, O. Development of radioisotopic-plasma technology for the protection of radio electronic means from powerful electromagnetic radiation [Text] / O. Vorobiov, V. Savchenko, A. Sotnikov, V. Tarshyn, T. Kurtseitov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 1/5 (85). – P. 16–22. doi:10.15587/1729-4061.2017.91642
4. Сотников, А. М. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа [Текст] / А. М. Сотников, В. А. Таршин // Системи управління навігації та зв'язку. – 2012. – № 4 (24). – С. 7–11.
5. Таршин, В. А. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе использования прямого корреляционного анализа [Текст] / В. А. Таршин, А. М. Сотников, П. Г. Сидоренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 2. – С. 69–73.
6. Таршин, В. А. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе формирования поля фрактальных размерностей [Текст] / В. А. Таршин, А. М. Сотников, П. Г. Сидоренко, В. В. Мегельбей // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 2. – С. 142–144.
7. Таршин, В. А. Принципы формирования сложных эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации [Текст] / В. А. Таршин, А. М. Сотников, П. Г. Сидоренко // Системи обробки інформації. – 2014. – № 6. – С. 86–89.
8. Таршин, В. А. Методика выбора исходных изображений при подготовке эталонных изображений для корреляционно-экстремальных систем навигации [Текст] / В. А. Таршин, А. М. Сотников, П. Г. Сидоренко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2015. – № 4. – С. 67–70.
9. Таршин, В. А. Метод оперативной подготовки эталонов на основе фрактальной обработки изображений с высокой объектовой насыщенностью [Электронный ресурс] / В. А. Таршин, А. М. Сотников, Р. Э. Пащенко // Техническое зрение. – 2014. – Вып. 1 (5). – С. 2–8. – Режим доступа: \www/URL: <http://magazine.technicalvision.ru/archive/issue-1-5>
10. Егорова, И. Н. Методика повышения качества изображений с использованием методов фильтрации шумов [Электронный ресурс] / И. Н. Егорова, Е. К. Коваленко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2011. – № 4/2 (52). – С. 64–66. – Режим доступа: \www/URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1324>
11. Еремينا, Н. С. Обобщенная модель изображений поверхности визуирования для представления в базах данных [Текст] / Н. С. Еремينا, Ю. В. Самсонов, А. М. Сотников // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – № 3 (35). – С. 77–79.

Bibliography (transliterated):

1. Sotnikov, A. M., Tarshyn, V. A. (2013). Problemy i perspektivy razvitiya navigatsionnogo obespecheniya letatelnykh apparatov. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu

- Povitrianykh Syl, 3 (36), 57–63.
2. Sotnikov, A. M., Tarshyn, V. A., Openko, P. V. (2013). Problemy ta napriamky rozvytku korelyatsiino-ekstremalnykh system navedennia kerovanykh litalnykh aparativ. Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony, 3 (18), 93–96.
 3. Vorobiov, O., Savchenko, V., Sotnikov, A., Tarshyn, V., Kurtseitov, T. (2017). Development of radioisotopic-plasma technology for the protection of radio electronic means from powerful electromagnetic radiation. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 1(5(85)), 16–22. doi:10.15587/1729-4061.2017.91642
 4. Sotnikov, A. M., Tarshyn, V. A. (2012). Obosnovanie printsipov postroeniya i razrabotka modeli korrelyatsionno-ekstremalnoy sistemy navedeniya kombinirovannogo tipa. Systemy upravlinnia navihatsii ta zviazku, 4 (24), 7–11.
 5. Tarshyn, V. A., Sotnikov, A. M., Sidorenko, R. G. (2015). Podgotovka etalonnih izobrazheniy dlya vyisokotochnih korrelyatsionno-ekstremalnih sistem navigatsii na osnove ispolzovaniya pryamogo korrelyatsionnogo analiza. Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy, 2, 69–73.
 6. Tarshyn, V. A., Sotnikov, A. M., Sidorenko, R. G., Megelbey, V. V. (2015). Podgotovka etalonnih izobrazheniy dlya vyisokotochnih korrelyatsionno-ekstremalnih sistem navigatsii na osnove formirovaniya polya fraktalnih razmernostey. Systemy ozbroeniia i viiskova tekhnika, 2, 142–144.
 7. Sotnikov, A. M., Tarshyn, V. A., Sidorenko, R. G. (2014). Printsipy formirovaniya slozhnykh etalonnih izobrazheniy dlya vyisokotochnih korrelyatsionno-ekstremalnih sistem navigatsii. Systemy obrobky informatsii, 6, 86–89.
 8. Tarshyn, V. A., Sotnikov, A. M., Sidorenko, R. G. (2015). Metodika vyibora ishodnykh izobrazheniy pri podgotovke etalonnih izobrazheniy dlya korrelyatsionno-ekstremalnih sistem navigatsii. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl, 4, 67–70.
 9. Sotnikov, A. M., Tarshyn, V. A., Paschenko, R. E. (2014). Metod operativnoy podgotovki etalonov na osnove fraktalnoy obrabotki izobrazheniy s vyisokoy ob'ektovoy nasyischen-nostyu. Tehnicheskoe zrenie, 1 (5), 2–8. Available at: <http://magazine.technicalvision.ru/archive/issue-1-5>.
 10. Egorova, I., Kovalenko, E. (2011). The technique of improving the quality of images using the methods of filtering noise. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, 4(2(52)), 64–66. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1324>
 11. Eremina, N. S., Samsonov, Yu. V., Sotnikov, A. M. (2015). Obobschennaya model izobrazheniy poverhnosti vizirovaniya dlya predstavleniya v bazah daniy. Zbirnyk naukovykh prats. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, 3 (35), 77–79.

Надійшла (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції/ Н. С. Єрміна, О. М. Сотніков, В. А. Таршин// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.68–73. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Формирование решающей функции корреляционно-экстремальных систем навигации по критерию максимума обобщенного коэффициента взаимной корреляции/ Н. С. Еремина, А. М. Сотников, В. А. Таршин// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.68–73. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Creating a decision function correlation-extreme systems navigation on generalized criterion of maximum cross-correlation coefficient/ N. Eremina, Alexander Sotnikov, Volodymyr Tarshyn//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P. 68–73. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єрміна Наталія Сергіївна – Українська інженерно-педагогічна академія, асистент кафедри, вул. Університетська, 16, м. Харків, Україна, 61003; e-mail: eremina-port@mail.ru.

Еремина Наталья Сергеевна – Украинская инженерно-педагогическая академия, ассистент кафедры теплоэнергетики и энергосберегающих технологий, ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина, 61003.

Yeromina Nataliia – Ukrainian Engineering Pedagogic Academy, teaching assistant of the Department of Heat and Power Engineering and Energy Saving Technologies, str. Universitetskaya, 16, Kharkov, Ukraine, 61003.

Сотніков Олександр Михайлович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, провідний науковий співробітник Наукового центру Повітряних Сил, вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна, 61023, e-mail: alexsot@ukr.net.

Сотников Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, ведущий научный сотрудник Научного центра Воздушных Сил, ул. Сумская, 77/79, г. Харьков, Украина, 61023; e-mail: alexsot@ukr.net.

Sotnikov Alexander – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv national Ivan Kozhedub Air Force University, Leading Researcher of Department of the Air Force Scientific Center, Sumska str., 77/79, Kharkiv, Ukraine, 61023.

Таршин Володимир Анатолійович – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, професор кафедри озброєння радіотехнічних військ, вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна, 61023; e-mail: vratar-73@ukr.net.

Таршин Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, профессор кафедры вооружения радиотехнических войск, ул. Сумская, 77/79, г. Харьков, Украина, 61023; e-mail: vratar-73@ukr.net.

Tarshyn Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv national Ivan Kozhedub Air Force University, Professor of the Department of Armament of Radar Troops, Sumska str., 77/79, Kharkiv, Ukraine, 61023.

УДК.514.18

С. О. АДОНЬЄВ, В. М. ВЕРЕЩАГА, К. Ю. ЛИСЕНКО

РОЗРОБКА УЗАГАЛЬНЕНОЇ ТЕХНІКИ АЛГЕБРАЇЧНОГО ФОРМУВАННЯ Б-ФУНКЦІЙ ДЛЯ ТРЬОХ ТОЧОК

Розглядається застосування математичного апарату точкового числення Балюби-Найдиша для моделювання багатofакторних процесів. Зокрема, розглядається метод побудови параболічних поверхонь відгуку на основі Б-функцій (Балюби функцій) в точковому численні. Авторами взята за основу геометрична схема побудови параболи другого ступеня у точковій формі. Дослідження властивостей функцій-параметрів на прикладах побудови кривої по трьох точках показали, що з метою створення моделей багатofакторних процесів, Б-функції можна отримувати і алгебраїчним шляхом. Розроблено узагальнену техніку алгебраїчного формування Б-функцій з метою визначення класу кривих, що визначаються множиною Б-функцій, які являють собою новий клас функцій.

Ключові слова: Б-функції, Б-криві, функціональний коефіцієнт кореляції, новий клас функцій, точкове числення.

Рассматривается применение математического аппарата точечного исчисления Балюбы-Найдыша для моделирования многофакторных процессов. В частности, рассматривается метод построения параболических поверхностей отклика на основе Б-функций (Балюбы функций) в точечном исчислении. Авторами взята за основу схема построения параболы второй степени в точечном исчислении. Исследование свойств функций-параметров на примерах построения кривой по трем точкам показали, что с целью построения моделей многофакторных процессов, Б-функции можно получать и алгебраическим путем. Разработана обобщенная техника алгебраического формирования Б-функций с целью определения класса кривых, которые определяются множеством Б-функций, которые являются новым классом функций.

Ключевые слова: Б-функции, Б-кривые, функциональный коэффициент корреляции, новый класс функций, точечное исчисление.

The problem of multifactor processes modeling, in particular, in the sphere of application of energy-saving technologies is acute at the moment. Many approaches have been developed, each of which has advantages and disadvantages. For example, the existing methods of geometric modeling allow solving many problems in the sphere of support for making managerial decisions. However, as often happens in practice, the complexity of the application of these analytical methods increases in an avalanche-like manner with an increase in the number of input factors of the model. In our opinion, in order to solve this problem, the mathematical apparatus of the Balyuba-Naidysh point calculus is optimal as a tool.

The application of the mathematical apparatus of the Balyuba-Naidysh point calculus for the modeling of multifactor processes is considered. In particular, we consider a method for constructing parabolic response surfaces on the basis of B-functions (Balyuba functions) in point calculus. The authors take as a basis the scheme for constructing a second-order parabola in the point calculus. Researches of the properties of the function-parameters on the examples of constructing the curve from three points showed that for the purpose of constructing models of multifactorial processes, the B-functions can also be obtained algebraically. A generalized technique for the algebraic formation of B-functions is developed with the aim of determining the class of curves that are determined by the set of B-functions that are a new class of functions.

Keywords: B-functions, B-curves, functional correlation coefficient, new class of functions, point calculation.

Вступ. Проблема моделювання багатofакторних процесів, зокрема, в сфері застосування енергозберігаючих технологій, є актуальною на даний момент. Розроблено багато підходів, кожен з яких має свої переваги та недоліки [1]. Наприклад, існуючі методи геометричного моделювання дозволяють вирішувати багато проблем в сфері підтримки управлінських рішень [2]. Однак, як часто буває на практиці, складність застосування цих аналітичних методів зростає лавиноподібно зі зростанням кількості вихідних факторів моделі [3]. На наш погляд, для вирішення даної проблеми оптимальним, в якості інструментарію, є математичний апарат точкового числення Балюби-Найдиша [4].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Останнім часом активно розвивається точкове числення [4], що було розроблено у Мелітопольській школі прикладної геометрії. Як було з'ясовано, у своїх дослідженнях, авторами цієї статті, для створення точкових агрегатів [4] дуже часто необхідно визначати функції-параметри, що приймають значення нуль або одиниця [3, 5, 6]. При цьому, ці функції-параметри не можуть бути довільно створеними, вони повинні створюватися у відповідності до вимог точкового БН-числення [4, 7]. Формування цих вимог є певною проблемою, розв'язанню якої і присвячено цю статтю.

Ціль та задачі дослідження. Застосування математичного апарату точкового БН-числення для моделювання багатofакторних процесів потребує додаткових досліджень, зокрема, в напрямку формування

Б-функцій. Для розробки узагальненої техніки алгебраїчного формування Б-функцій необхідно виконати такі задачі: сформувати ознаки нового класу функцій; провести дослідження функції для трьох точок та визначити перспективи застосування вказаного методу для моделювання багатofакторних процесів.

Основна частина. Узагальнена техніка формування Б-функцій. Б-функції – це функції параметрів (функції-параметри), які, при наперед визначених значеннях аргумента, дорівнюють одиниці або нулю.

Б-функції (Балюби функції) нами так названі тому, що вперше у своїх дослідженнях їх застосував професор Балюба І. Г. [4], які він отримав, виходячи з геометричної схеми побудови параболи другого ступеня у точковій формі.

Як з'ясувалося в ході наших досліджень, з метою створення моделей багатofакторних процесів, Б-функції можна отримувати і алгебраїчним шляхом [8, 9] через виконання техніки, яку, у цьому дослідженні, ми і будемо розробляти.

Розглянемо найпростіший випадок (не враховуючи пряму) для кривої, що повинна пройти через три точки A, B, C (рис. 1).

Нехай параметр t визначається як відношення уздовж координат x_i кожної з трьох точок

$$t_A = \frac{x_A - x_A}{x_C - x_A} = 0; \quad t_B = \frac{x_B - x_A}{x_C - x_A}; \quad t_C = \frac{x_C - x_A}{x_C - x_A} = 1. \quad (1)$$

© С. О. Адоньєв, В. М. Верещага, К. Ю. Лисенко. 2016

Як бачимо, $0 \leq t_i \leq 1$, при цьому, у точці A : $t=0$, у точці C : $t=1$.

Для того, щоб крива, яка визначена точковим рівнянням:

$$M = AP_A + BP_B + CP_C \quad (2)$$

проходила через точку A , необхідно, щоб $P_A=1$, а $P_B=0$, $P_C=0$, тоді рівняння (1) матиме вигляд:

$$M = A \cdot 1 + B \cdot 0 + C \cdot 0 \rightarrow M = A.$$

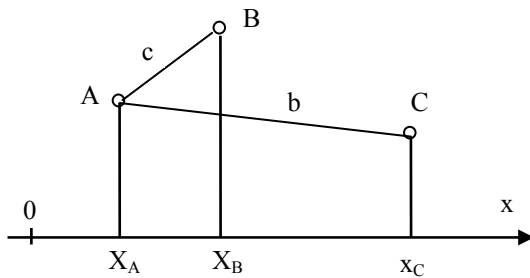


Рис. 1 – Схема щодо визначення параметру t_i ($i = A, B, C$)

Для створення (формування) функцій-параметрів P_i ($i=A:B:C$) введемо параметр $\bar{t}=1-t$, що доповнює значення параметру t до одиниці. Оскільки у точці A параметр $t=0$, то $\bar{t}_A=1-0=1$.

Тоді у точці A :

$$P_A = \bar{t}; \quad P_B = t; \quad \dots$$

Розглянемо тепер окремо кожен з параметрів P_i для різних значень t , що відповідають (1). При цьому, на останньому кроці завжди застосовуються значення параметру t , при яких P_i повинен дорівнювати одиниці. Наприклад, для P_A – спочатку формується його алгебраїчний вигляд для значень t_B та t_C , при яких $P_A=0$, а потім, на останньому кроці, для значення $t_A=0$, при якому $P_A=1$. Отже, виходячи з (1) $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{CA}}$, де

$$x_{BA} = x_B - x_A; \quad x_{CA} = x_C - x_A; \quad \text{тоді } \bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{CA}}.$$

Таким чином, при визначених значеннях t та \bar{t} $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{CA}}$; $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{CA}}$, що відповідають розташуванню точки B при визначеній геометричній фігурі (1), функція-параметр $P_A=0$. Це можливо при створенні будь-якої Б-функції, що аргументами має t та \bar{t} і дорівнює нулю. Наприклад, найпростіша з можливих:

$$\alpha_1 t_B - \bar{t}_B = 0 \quad \text{або} \quad t_B - \alpha_2 \bar{t}_B = 0, \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{\bar{t}_B}{t_B}, \quad \alpha_2 = \frac{t_B}{\bar{t}_B}$$

Тоді, P_A у точці B матиме вигляд:

$$P_A = \alpha_1 t - \bar{t}, \quad \text{або} \quad P_A = t - \alpha_2 \bar{t}; \quad (4)$$

або якийсь інший вигляд.

Розглянемо техніку подальшого формування Б-функції P_A у точці C , аргументи у якій $t=1$; $\bar{t}=0$, яка повинна враховувати сформовані P_A з (4). Розглянемо:

$$P_A = \alpha_1 t - \bar{t} = \alpha_1 \cdot 1 - 0 = \alpha_1; \rightarrow P_A = \alpha_1.$$

Виходячи з геометричної фігури (рис. 1) $\alpha_1 \neq 0 \rightarrow P_A \neq 0$, а за вимогою, необхідно, щоб у точці $C \rightarrow P_A=0$. На виконання цієї вимоги у точці C Б-функція P_A матиме вигляд:

$$P_A = (\alpha_1 t - \bar{t}) \cdot \bar{t} \quad (5)$$

Останній, третій крок для аргументів $t=0$, $\bar{t}=1$, необхідно формувати на базі Б-функції (5), яка враховує перші два кроки. Для цього необхідно обчислити (5) для аргументів $t=0$, $\bar{t}=1$, $P_A = (\alpha_1 \cdot 0 - 1) \cdot 1 = -1$, як бачимо, треба змінити знак на протилежний, тому Б-функція P_A матиме вигляд:

$$P_A = (\bar{t} - \alpha_1 t) \cdot \bar{t}. \quad (6)$$

Тепер сформуємо Б-функцію P_B : спочатку перші два кроки у точках A і C , а третій крок – у точці B .

Перший крок: $t=0$; $\bar{t}=1$; $P_B = t$.

Другий крок: $t=1$; $\bar{t}=0$; $P_B = t\bar{t}$.

Третій крок, який враховує параметр P_B з попередніх двох кроків, виконаємо наступним чином. У $P_B = t\bar{t}$ підставимо аргумент t_B з (1)

$$\frac{x_{BA}}{x_{CA}} \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{CA}}\right) \beta = 1 \rightarrow \beta = \frac{1}{\frac{x_{BA}}{x_{CA}} \left(1 - \frac{x_{BA}}{x_{CA}}\right)}. \quad (7)$$

$$\text{Тоді } P_B = \beta t \bar{t}. \quad (8)$$

Тепер сформуємо Б-функцію P_C : спочатку перші два кроки у точках A і B , а третій крок – у точці C .

Перший крок: $t=0$; $\bar{t}=1$; $P_C = t$.

Другий крок: $t_B = \frac{x_{BA}}{x_{CA}}$; $\bar{t}_B = 1 - \frac{x_{BA}}{x_{CA}}$,

$$P_C = t(\bar{t} - \alpha_1 t),$$

де

$$\alpha_1 = \frac{\bar{t}_B}{t_B},$$

тоді

$$P_C = t_B (\bar{t}_B - \frac{\bar{t}_B}{t_B} t_B) = t_B (\bar{t}_B - \bar{t}_B) = 0.$$

Третій крок: $t=1$; $\bar{t}=0$; $P_C=1$.

$$P_C = t(\alpha_1 t - \bar{t}) \cdot \frac{1}{\alpha_1} = 1(\alpha_1 \cdot 1 - 0) \frac{1}{\alpha_1} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1} = 1.$$

$$P_C = \frac{1}{\alpha_1} t(\alpha_1 t - \bar{t}). \tag{9}$$

Таким чином, враховуючи (6), (8), (9) можемо записати:

$$\gamma \cdot \bar{t}(\bar{t} - \alpha_1 t) + \beta t \bar{t} + \frac{1}{\alpha_1} t(\alpha_1 t - \bar{t}) = 1. \tag{10}$$

звідкіля:

$$\gamma = \frac{1 - \beta t \bar{t} - \frac{1}{\alpha_1} t(\alpha_1 t - \bar{t})}{\bar{t}(\bar{t} - \alpha_1 t)}. \tag{11}$$

Як бачимо, коефіцієнт γ не є постійним, а являє собою функцію аргументів t та \bar{t} , тобто $\gamma(t, \bar{t})$, що дозволяє, у кожному мить зміни $0 \leq t \leq 1$, зберігати справедливості рівняння (10). У той же самий час, коефіцієнти α_1 та β є постійними величинами і залежать від розташування точки B , уздовж координати x , відносно точок A і C .

Приклад 1.

Розглянемо точки A, B, C (рис. 2)

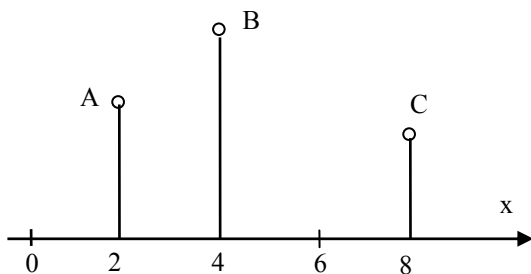


Рис. 2 – Схема розташування вихідних точок для прикладу 1

$$x_{CA} = 8 - 2 = 6; \quad x_{BA} = 4 - 2 = 2;$$

$$t_B = \frac{x_{BA}}{x_{CA}} = \frac{2}{6} = \frac{1}{3};$$

$$\bar{t}_B = 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3}; \quad \alpha_1 = \frac{\bar{t}_B}{t_B} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{1} = 2;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2}; \quad \beta = \frac{1}{\frac{1}{3}(1 - \frac{1}{3})} = \frac{9}{2};$$

Перевіримо Б-функцію: $P_A = (\bar{t} - \alpha_1 t) \cdot \bar{t}$, у точці $A: t=0$; $\bar{t}=1$; $P_A = (\bar{t} - \alpha_1 t) \cdot \bar{t} = (1 - 2 \cdot 0) \cdot 1 = 1$;

у точці $B: t_B = \frac{1}{3}$; $\bar{t}_B = \frac{2}{3}$;

$$P_A = (\bar{t} - \alpha_1 t) \cdot \bar{t} = (\frac{2}{3} - 2 \cdot \frac{1}{3}) \cdot \frac{2}{3} = 0;$$

у точці $C: t=1$; $\bar{t}=0$;

$$P_A = (\bar{t} - \alpha_1 t) \cdot \bar{t} = (0 - 2 \cdot 1) \cdot 0 = 0.$$

Як бачимо, основна умова щодо Б-функції P_A , виконується, тобто у точці $A, P_A=1$, а у точках B і $C, P_A=0$.

Перевіримо Б-функцію P_B для наведеного прикладу: $P_B = \beta t \bar{t}$,

$$\text{у точці } A: t=0; \bar{t}=1; P_B = \frac{9}{2} \cdot 0 \cdot 1 = 0;$$

$$\text{у точці } B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3}; P_B = \frac{9}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} = 1;$$

$$\text{у точці } C: t=1; \bar{t}=0; P_B = \frac{9}{2} \cdot 1 \cdot 0 = 0.$$

Як бачимо, основна умова, щодо Б-функції P_B , виконується, тобто у точці $B, P_B=1$, а у точках A і $C, P_B=0$.

Перевіримо Б-функцію P_C для наведеного прикладу:

$$P_C = \alpha_2 t(\alpha_1 t - \bar{t}),$$

$$\text{у точці } A: t=0; \bar{t}=1; P_C = \frac{1}{2} \cdot 0 \cdot (2 \cdot 0 - 1) = 0;$$

$$\text{у точці } B: t = \frac{1}{3}; \bar{t} = \frac{2}{3};$$

$$P_C = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \frac{1}{3} - \frac{2}{3}) = \frac{1}{6} \cdot 0 = 0;$$

$$\text{у точці } C: t=1; \bar{t}=0; P_C = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (2 \cdot 1 - 0) = 1.$$

Як бачимо, основна умова, щодо Б-функції P_C , виконується, тобто у точці $C, P_C=1$, а у точках A і $B, P_C=0$.

Приклад 2.

Розглянемо точки A, B, C (рис. 3)

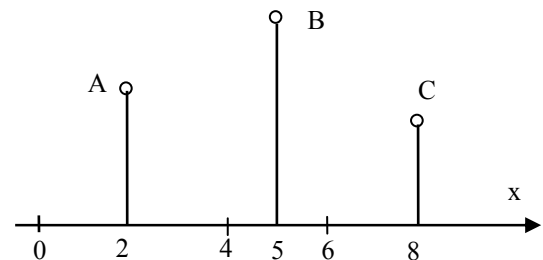


Рис. 3 – Схема розташування вихідних точок для прикладу 2

$$x_{CA} = 8 - 2 = 6; \quad x_{BA} = 5 - 2 = 3; \quad t_B = \frac{x_{BA}}{x_{CA}} = \frac{1}{2};$$

$$\bar{t}_B = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}; \quad \alpha_1 = \frac{\bar{t}_B}{t_B} = 1; \quad \alpha_2 = 1;$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{2}(1-\frac{1}{2})} = 4.$$

Перевіряємо Б-функцію: $P_A = (\bar{t} - \alpha_1 t) \cdot \bar{t}$,

у точці A: $t=0$; $\bar{t}=1$; $P_A = (1-1 \cdot 0) \cdot 1 = 1$;

у точці B: $t=\frac{1}{2}$; $\bar{t}=\frac{1}{2}$; $P_A = (\frac{1}{2}-1 \cdot \frac{1}{2}) \cdot \frac{1}{2} = 0$;

у точці C: $t=1$; $\bar{t}=0$; $P_A = (0-1 \cdot 1) \cdot 0 = 0$.

Як бачимо, вимога, щодо P_A , виконується.

Перевіримо Б-функцію P_B для наведеного прикладу: $P_B = \beta t \bar{t}$,

у точці A: $t=0$; $\bar{t}=1$; $P_B = 4 \cdot 0 \cdot 1 = 0$;

у точці B: $t=\frac{1}{2}$; $\bar{t}=\frac{1}{2}$; $P_B = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = 1$;

у точці C: $t=1$; $\bar{t}=0$; $P_B = 4 \cdot 1 \cdot 0 = 0$.

Як бачимо, умова, щодо P_B , виконується.

Перевіримо Б-функцію P_C для наведеного прикладу:

$$P_C = \alpha_2 t (\alpha_1 t - \bar{t}),$$

у точці A: $t=0$; $\bar{t}=1$; $P_C = \frac{0}{1} \cdot 0 \cdot (\frac{1}{0} \cdot 0 - 1) = 0$;

у точці B: $t=\frac{1}{2}$; $\bar{t}=\frac{1}{2}$;

$$P_C = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} - \frac{1}{2}) = \frac{1}{2} (\frac{1}{4} - \frac{1}{2}) = 0;$$

у точці C: $t=1$; $\bar{t}=0$; $P_C = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (\frac{2}{1} \cdot 1 - 0) = 1$.

Як бачимо, основна умова, щодо P_C , виконується.

Результати розрахунків для першого прикладу зведемо у табл. 1, а для другого – у табл. 2.

Таблиця 1 – Результати розрахунків для першого прикладу

Точки	t		
	0	1/3	1
P_A	1	0	0
P_B	0	1	0
P_C	0	0	1
ΣP_i	1	1	1

Таблиця 2 – Результати розрахунків для другого прикладу

Точки	t		
	0	1/2	1
P_A	1	0	0
P_B	0	1	0
P_C	0	0	1
ΣP_i	1	1	1

Повернімося до рівняння (10), у якому показано, що сума параметрів Б-кривої дорівнює одиниці. У цьому рівнянні було введено функціональний коефіцієнт $\gamma(t, \bar{t})$, який здійснює кореляцію параметрами,

що мають нульове значення у вихідних опорних точках. Річ у тім, що параметри-функції, значення яких дорівнюють нулю, не завжди належать одній і тій же Б-кривій і тому у точках загушення (що знаходяться поміж опорних точок) сума трьох параметрів (Б-функцій) не буде дорівнювати одиниці, що буде порушувати основну вимогу точкового БН-числення [10]. Коефіцієнт $\gamma(t, \bar{t})$, як раз, і усуватиме цю невідповідність. Однак, у рівнянні (10) та розрахунковій формулі (11) $\gamma(t, \bar{t})$ є вибіркоким і тому не завжди в змозі виправити вказану некорельованість. Наведене найбільш узагальнене значення коефіцієнту $\gamma(t, \bar{t})$. Виходячи з наступного рівняння:

$$\gamma(t, \bar{t}) \cdot (\bar{t}(\bar{t} - \alpha_1 t) + \beta t \bar{t} + \alpha_2 t (\alpha_1 t - \bar{t})) = 1, \quad (12)$$

$$\gamma(t, \bar{t}) = \frac{1}{t(\bar{t} - \alpha_1 t) + \beta t \bar{t} + \alpha_2 t (\alpha_1 t - \bar{t})}. \quad (13)$$

Кореляційні коефіцієнти γ з (11) та (13) мають різні призначення, $\gamma(t, \bar{t})$ з (11) дозволяє з'ясувати окремо для кожного параметру P_i ($i=A, B, C$), їхню відповідність до Б-кривої, що моделюється. І навпаки, $\gamma(t, \bar{t})$ з (13) не дозволяє кореляції окремо по кожному параметру, а виконує її, в цілому, за їхньою сумою.

Висновки. Запропонована у цій статті узагальнена техніка алгебраїчного формування Б-функцій допоможе сформувати ознаки нового класу функцій. Подана техніка виконана для трьох точок, однак її можна застосовувати і для більшої їхньої кількості, що відкриває нові перспективи застосування точкового числення для моделювання багатofакторних процесів.

Список літератури:

1. Адоньєв, Є. О. Застосування поверхонь відгуку при моделюванні сталого енергетичного розвитку міст [Текст] / Є. О. Адоньєв, В. М. Верещага // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – № 3. – С. 471–476.
2. Балюба, И. Г. Точечное исчисление [Текст] // И. Г. Балюба, В. М. Найдьш. – Мелитополь: МГПУ им. Б. Хмельницького, 2015. – 236 с.
3. Бумага, А. І. Точкове рівняння дуги параболи другого порядку [Текст] / А. І. Бумага // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2012. – № 90 – С. 49–52.
4. Верещага, В. М. Спосіб згортання (розгортання) чарунок [Текст] / В. М. Верещага, Є. О. Адоньєв, О. М. Павленко // Сучасні проблеми моделювання. – 2016. – № 7. – С. 32–38.
5. Верещага, В. М. Монофакторний принцип побудови моделі багатofакторних задач термореновації будівель [Текст] / В. М. Верещага, Є. О. Адоньєв // Сучасні проблеми моделювання. – 2016. – № 7. – С. 24–31.
6. Конопацький, Є. В. Геометричне моделювання алгебраїчних кривих та їх використання при конструюванні поверхонь у точковому численні Балюби-Найдьша [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.01.01 / Є. В. Конопацький. – Таврійський державний агротехнологічний університет. – Мелітополь, 2012. – 163 с.
7. Кучеренко, В. В. Формалізовані геометричні моделі нерегулярної поверхні для гіперкількісної дискретної скінченної множини точок [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.01.01 / В. В. Кучеренко. – Таврійський державний агротехнологічний університет. – Мелітополь, 2013. – 232 с.
8. Мартинов, В. Л. Моделювання оптимальних геометричних параметрів енергоефективних будівель гранної форми [текст]: дис. ... докт. тех. наук: 05.01.01 / В. Л. Мартинов. – КНУБА. – Київ, 2015. – 390 с.

9. *Нечволод, Л. І.* Сучасний словник іншомовних слів [Текст] / *Л. І. Нечволод.* – Харків: Торсинг плюс, 2008. – 768 с.
10. *Підгорний, О. Л.* Актуальні проблеми геометричного моделювання в задачах енергозбереження у будівництві [Текст] / *О. Л. Підгорний, В. О. Плоский, О. В. Сергейчук* // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2010. – № 14. – С. 25–31.

Bibliography (transliterated):

1. Adoniev, Ye. O., Vereshchaha, V. M. (2016). Zastosuvannya poverkhon vidhuku pry modeliuvanni staloho enerhetychnoho rozvytku mist. Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 3, 471–476.
2. Baliuba, Y. H., Naidysh, V. M. (2015). Tochechnoe uschyslenye. Melitopol': MGPU im. B. Hmel'nickogo, 236.
3. Bumaha, A. I. (2012). Tochkovye ravnaniya duhy paraboly drugoho poriadku. Prikladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 90, 49–52.
4. Vereshchaha, V. M., Adoniev, Ye. O., Pavlenko, O. M. (2016). Sposib zghortannia (rozghortannia) charunok. Suchasni problemy modeliuvannia, 7, 32–38.
5. Vereshchaha, V. M., Adoniev, Ye. O. (2016). Monofaktornyi pryntsyyp pobudovy modeli bahatofaktornykh zadach

- termorenovatsii budivel. Suchasni problemy modeliuvannia, 7, 24–31.
1. 6. Konopatskyi, Ye. V. (2012). Heometrychne modeliuvannia alhebraichnykh kryvykh ta yikh vykorystannia pry konstruiuvanni poverkhon u tochkovomu chyslenni Baliuby-Naidysya. Tavria state agrotechnological university. Melitopol, 163.
6. Kucherenko, V. V. (2013). Formalizovani heometrychni modeli nerehuliarnoi poverkhni dlia hiperkilkisnoi dyskretnoi skinchenoi mnozhyny tochok. Tavria state agrotechnological university. Melitopol, 232.
7. Martynov, V. L. (2014). Modeliuvannia optymalnykh heometrychnykh parametriv enerhoefektyvnykh budivel hrannoї formy. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, 353.
8. Nechvolod, L. I. (2008). Suchasnyi slovnyk inshomovnykh sliv. Kharkiv: Torsynh plus, 768.
9. Pidhornyi, O. L., Ploskyi, V. O., Serheichuk, O. V. (2010) Aktualni problemy heometrychnoho modeliuvannia v zadakhk enerhozberezhennia u budivnytstvi. Ventyliatsiia, osviltlennia ta teplohazapostachannia, 14, 25–31.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка узагальненої техніки алгебраїчного формування Б-функцій для трьох точок/ Є. О. Адоньєв, В. М. Верещага, К. Ю. Лисенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.74–78. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка обобщенной техники алгебраического формирования Б-функций для трех точек/ Е. А. Адоньев, В. М. Верещага, К. Ю. Лысенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.74–78. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of a generalized technique for the algebraic formation of B-functions for three points/ Y. O. Adoniev, V. M. Vereshchaha, K. Y. Lysenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.74–78 . – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Адоньєв Євген Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, декан Економіко-гуманітарного факультету Запорізького національного університету в м. Мелітополі; вул. Героїв України, 160А., м. Мелітополь, Україна, 72316; e-mail: evgen.adoniev@gmail.com.

Верещага Віктор Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Лисенко Ксенія Юрївна – магістрант, кафедра прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; вул. Гетьманська, 20, м. Мелітополь, Україна, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Адоньєв Євгеній Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, декан Економіко-гуманітарного факультета Запорізького національного університету в г. Мелітополі; ул. Героев Украины, 160А, г. Мелітополь, Украина, 72316, e-mail: evgen.adoniev@gmail.com.

Верещага Віктор Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; ул. Гетьманская, 20, г. Мелітополь, Украина, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Лысенко Ксения Юрьевна – магістрант, кафедра прикладної математики та інформаційних технологій Мелітопольського державного педагогічного університету ім. Богдана Хмельницького; ул. Гетьманская, 20, г. Мелітополь, Украина, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Adoniev Yvhen Oleksandrovich – PhD, associate professor, dean of the Economics and Humanities Faculty of the Zaporizhzhya National University in Melitopol. Heroiv Ukrainy str., 160A, Melitopol, Ukraine, 72316.

Vereshchaha Viktor Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

Lysenko Ksenia Yuryevna – Master of Science, Department of Applied Mathematics and Information Technologies of the Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky; Getmansky str., 20, Melitopol, Ukraine, 72300; e-mail: vervik49@gmail.com.

УДК 519.7:616.8

О. К. БІЛОШИЦЬКА

НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ЯК ІНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАТОЛОГІЧНИХ ЗМІН НА ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАМІ

Розглядаються методи нелінійної динаміки аналізу діяльності електричної активності головного мозку, зокрема, при патологічних змінах. Для аналізу EEG-сигналів використовувалися метод R/S-аналізу, показник Херста та фазовий портрет. За допомогою методів нелінійної динаміки можна говорити про системні процеси, які відбуваються в головному мозку, та прогнозувати своєчасне виявлення епілептичних нападів.

Ключові слова: нелінійна динаміка, EEG, R/S-аналіз, показник Херста, фазовий портрет.

Рассматриваются методы нелинейной динамики анализа деятельности электрической активности головного мозга, в частности, при патологических изменениях. Для анализа ЭЭГ-сигналов использовались метод R/S-анализа, показатель Хёрста и фазовый портрет. С помощью методов нелинейной динамики можно говорить об системных процессах, которые происходят в головном мозге, и прогнозировать своевременное обнаружение эпилептических припадков.

Ключевые слова: нелинейная динамика, ЭЭГ, R/S-анализ, показатель Хёрста, фазовый портрет.

This article is about the application of nonlinear dynamics to the study of human brain. Paroxysmal electrical discharges periodically cause a variety of brain dysfunctions and the brain activity can be described in frame of dissipative nonlinear chaotic systems. R/S-analysis, Hurst exponent and phase portrait of the system are used to demonstrate multidimensionality of dynamical systems. This work reveals that complicated structure of the brain can be considered as deterministic nonlinear system and can be described with complex mathematical model using parameters mentioned above. The Hurst exponent (the exponent of non-linear dynamic) was counted for three periods of EEG signal (preictal, ictal and postictal). This parameter can be used for qualitative and quantitative estimation of electrical brain activity. Analyzing the phase portraits, it is shown that the complexity of EEG decreases in ictal periods compared with ictal. The results of electrical brain activity investigation will give an opportunity to improve and develop new methods of epileptical treatment, to predict and to prevent epileptical seizures that will lead to improving of life conditions and extending the life span of patients.

Keywords: nonlinear dynamics, EEG, R/S-analysis, Hurst exponent, phase portrait.

Вступ. Аналіз графіки діяльності головного мозку відіграє важливу роль при діагностиці різних захворювань мозку. Мозок складається з мільярдів клітин мозку – нейронів, які взаємодіють між собою за допомогою електричних імпульсів. Якщо велика кількість нейронів одночасно посиляє сигнали, виникає потужна електрична активність в головному мозку, яка може бути виявлена лише за допомогою чутливого медичного обладнання, таких як електроенцефалографів, який відображає графік зміни електричного рівня. Запис електроенцефалограми є потужним та важливим інструментом для вивчення функціонального стану головного мозку та для діагностики певних захворювань. Сукупність електричної активності мозку відображається у вигляді хвиль.

Метод EEG, як традиційний, застосовується при діагностиці неврологічних патологічних змін; оцінці деструктивних порушень, пов'язаних з вогнищевими процесами, особливо при дослідженні в динаміці; оцінці дифузних змін, пов'язаних з енцефалопатіями та іншими ураженнями мозку; захворюваннях, пов'язаних з порушенням рівня свідомості [1]. Зустрічається незначна кількість діагностичних помилок при використанні методу EEG в клінічній практиці.

EEG генерується механізмами, які підпорядковуються нелінійним детерміністичним законам. Існують переконливі докази, що ці процеси – хаотичні. Для пояснення динамічних процесів функцій епілептогенної області мозку потрібні реалістичні математичні моделі, а нелінійні методи можуть бути використані для пояснення періодичності епілептичних нападів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В останні роки почав розвиватися такий потужний метод аналізу електроенцефалограм з використанням динаміки нелінійних систем, як фрактальний аналіз (Г. Хакен, Ф. Takens, Р. Grassberger,

А. Babloyantz). Методи динаміки нелінійних систем дозволяють дослідити взаємодії між нейронами, їх популяціями та стани організму в цілому. Ще одним новим напрямком аналізу EEG є дослідження EEG з позицій теорії динамічного хаосу. Згідно цієї теорії EEG можна представити як хаотичний процес. За допомогою кореляційної розмірності відновленого аттрактору можна характеризувати на скільки складна система та процес, що вона відображає. [1].

EEG також можна представити у вигляді серії числових значень залежно від часу. Статистичні властивості EEG залежать від часу і простору [2]. Такі характеристики EEG, як існування граничних циклів (α -активність), швидкі явища (гістерезис), залежність амплітуди від частоти (чим менша амплітуда, тим більша частота EEG) та гармонічні частоти (наприклад, під час дослідження спалахом світла) є одними з багатьох властивостей, які властиві нелінійним системам [3]. Деякі дослідники довели, що EEG – це нелінійний сигнал з детерміністичними та, можливо, хаотичними властивостями [4]. Інші ж вказали на характерні динамічні властивості EEG відповідно специфічним нормальним та патологічним станам, такі як розумові завдання, сон, кома [5]. Тому гостро відчувається потреба в нових методах дослідження, які зможуть дати суттєвий прогрес у вивченні природи електричної активності головного мозку та її зв'язку зі структурою та функцією [1].

Однією з найбільш поширених хвороб нервової системи, що не піддається автоматичному і надійному прогнозуванню, є епілепсія. Епілепсія – це пароксизмальний та тимчасовий розлад мозкової функції, який виникає раптово, припиняється автоматично та здатний повторюватися [6]. Слід пам'ятати, що кілька спровокованих або обумовлених виразними причинами (пухлина мозку, черепно-мозкова травма) епілеп-

тичних нападів не свідчать про наявність у пацієнта епілепсії. Епілептичні напади можуть бути повторювані та непередбачувані, а також супроводжуватися міоклонічними нападами, які можуть призвести до трагічних наслідків. Дослідження електричної активності мозку для прогнозування епілептичних нападів дасть можливість удосконалити та розробити нові методики лікування епілепсії, передбачити та запобігти епілептичні напади, що достатньою мірою зможе покращити та продовжити життя хворих.

Нещодавні дослідження показали, що епілептичний напад представляє собою нелінійний хаотичний процес. Доведено, що ЕЕГ-сигнал під час незначного епілептичного нападу можна охарактеризувати низькою розмірністю хаосу. Дослідження часткового нападу скроневого походження показали наявність граничних циклів у записаних розрядах нападу з субдоральних електродів вищерозміщеного епілептичного фокусу [4]. Граничні цикли є особливістю нелінійних систем.

Найбільшим відкриттям можна вважати динамічний аналіз ЕЕГ скроневої епілепсії і саме те, що нападам передують динамічні зміни в ЕЕГ сигналах, які відбуваються протягом декількох хвилин після нападу. За декілька хвилин до початку нападу в області передньої та латеральної частині скроні (найбільш віддалених від фокусу) замикаються фази з точки зору хаосу. Це вказує на те, що за декілька хвилин до нападу області стають динамічно визначеними. Це не можна виявити шляхом візуального огляду справжнього ЕЕГ-сигналу або іншими більш традиційними методами обробки сигналів.

Ціль та задачі дослідження. Адекватну оцінку діяльності нейронної мережі головного мозку можна отримати лише за допомогою електроенцефалографічного дослідження. Використання статистичних та математичних методів сприяє зростанню інформативності ЕЕГ.

Дослідження електричної активності мозку для прогнозування епілептичних нападів дасть можливість удосконалити та розробити нові методики лікування епілепсії, передбачити та запобігти епілептичні напади, що достатньою мірою зможе покращити та продовжити життя хворих.

Матеріали та методи дослідження. Як відомо, прогнозування епілепсії за допомогою кореляційного аналізу [7] не дало високого результату. Спектральний аналіз та перетворення Фур'є дають лише усереднені показники для досліджуваного сигналу. Вейвлет-аналіз не дозволяє відрізнити епілептичну активність від артефактів різної природи. Метод візуального аналізу не дозволяє точно визначити початок епілептичної активності.

Хоч і існує багато доступних методів обробки сигналу для аналізу та класифікації ЕЕГ, нелінійним підходам аналізу електричної активності мозку приділяється багато уваги. Різноманітність методів нелінійного аналізу сигналів дозволяють краще характеризувати просторову і тимчасову динаміку епілептичних процесів в головному мозку. Діяльність мозку може бути описана в рамках дисипативних систем. Наявність детермінованого хаосу в таких систе-

мах можна встановити, визначивши будь-яку з динамічних змінних і при цьому, зокрема можна оцінити [8]:

- розмірність аттрактора, яка свідчить про багатоконтентність досліджуваної нейродинамічної системи;

- кореляційну розмірність, яка є характеристикою «складності» динамічної системи мозку;

- старший показник Ляпунова, який є характеристикою «хаотичності» поведінки динамічної системи мозку;

- кореляційну ентропію, яка показує ступінь «передбачуваності» процесів, що відбуваються в мозку;

- ентропію Колмогорова-Синяя, що характеризує швидкість втрати динамічної інформації системою, яка дозволяє оцінити проміжок часу, на якому можна зробити прогноз поведінки нейродинамічної системи;

- логістичне відображення, яке описує, як змінюється чисельність популяції нейронів з плином часу;

- показник Херста, що використовується для аналізу часових рядів складних систем, містить мінімум припущень про досліджувану систему та дозволяє ввести класифікацію часових рядів в залежності від свого значення [9].

ЕЕГ-дослідження проводилися у відділенні функціональної діагностики та ультразвукового дослідження серцево-судинної системи Консультативно-діагностичного центру Державної наукової установи «Науково-практичний центр профілактичної та клінічної медицини» Державного управління справами. Усі добровольці (здорові та хворі пацієнти) дали письмову згоду на проведення даних досліджень. Досліджувалися як дорослі особи різного віку та статі, так і діти.

Реєстрація ЕЕГ відбувалася за стандартною методикою – міжнародною схемою відведень «10-20». Дані ЕЕГ реєструвалися за допомогою 16-канального телеметричного електроенцефалографа Expert з відеомоніторингом ТОВ «Компанія Tredex» з відеомоніторингом з верхнім граничним фільтром 30 Гц, постійною часу 0,1 с та частотою дискретизації 400 Гц. Запис відбувався у 16 стандартних відведеннях з частотою дискретизації більше 400 Гц.

В цілому весь запис ЕЕГ тривав 9 хвилин. Під час реєстрації ЕЕГ проводилися основні функціональні проби: очі закриті, очі відкриті, фотостимуляція на різних частотах, гіпервентиляція. Дані проби спрямовані на дослідження функціонування головного мозку в стані спокою і при певних зовнішніх впливах [10]. Відносні зміни показників активності головного мозку при проходженні цих проб дають важливу інформацію для діагностики. Для візуальної обробки та отримання цифрових даних використовувалося програмне забезпечення ExpertNet.

Отримані дані ЕЕГ-сигналів було розділено на 3 групи: вогнищеві ураження (наприклад, епілепсія), системні ураження (наприклад, цереброваскулярні хвороби) та норма [9]. Дані по трьом групам були досліджені, разом з лікарями зроблено заключення про функціональні та морфологічні особливості динаміки ЕЕГ, про наявність та вираженість церебральних патологій.

Для прогнозування епілептиформної активності головного мозку потрібно дослідити та проаналізувати як змінюються показники ЕЕГ під час різних періодів. За певними дослідженнями можна вважати, що складність ЕЕГ менша в іктальні періоди, ніж в інтеріктальні [11].

При аналізі патологічних ЕЕГ для достовірного аналізу потрібно вважати напади незалежними подіями, для цього між нападами повинні бути достатні інтервали. Тому що при незначному інтервалі (кластерні напади) важко визначити постіктальний стан від наступного преіктального стану, оскільки точна тривалість жодного з них точно невідома.

Для систем, які не є нормально розподіленими або близькими до неї Херстом [12] був запропонований метод нормованого розмаху (R/S-аналіз). Головним чином даний метод дозволяє розрізнити випадковий і фрактальний часові ряди, а також робити висновки про наявність неперіодичних циклів, довготривалої пам'яті.

Для визначення рівня стохастичності рядів використовують так званий показник Херста.

Результати дослідження динамічних особливостей нейронної мережі головного мозку на основі ЕЕГ-даних. Так як мозок функціонує в нелінійному, хаотичному режимі (Albert et al., 1994), ЕЕГ можна розглядати як результат динамічної системи мозку, у відповідь на вплив зовнішнього та внутрішнього середовища. Система містить багато нелінійних компо-

нентів (нейрони) та має певні потенціальні ідентифікуючі параметри системи.

При закритих очах стохастичність роботи мозку в стані спокою мінімальна [3]. При реєстрації фоновій ЕЕГ з відкритими очима спостерігалася варіативна робота мозку, і, отже, ЕЕГ ставала більш стохастичною. Причиною цього є те, що сильне збільшення притоку зовнішньої інформації призводить до збільшення числа ступенів свободи у взаємодії організму з навколишнім середовищем, що неминуче знаходить відображення в діяльності мозку.

Отримані патологічні сигнали ЕЕГ (група «вогнищеві ураження») було умовно поділено на такі періоди: преіктальний (перед нападом), іктальний (напад), постіктальний (після нападу) та інтеріктальний (між нападами).

За допомогою програмного продукту, який був реалізований в програмному середовищі Matlab вдалося провести дослідження дієвості нелінійних показників при аналізі патологічних ЕЕГ-сигналів.

Використовуючи R/S-аналіз, було виокремлено візуально ділянки різних «стрибків» активностей та показано, що показник Херста не має різких змін значень при відсутності епілептичної активності. Значення показника Херста починає зростати при настанні епілептичної активності та зменшується після закінчення мозкової активності, що свідчить про припинення нападу (рис. 1).

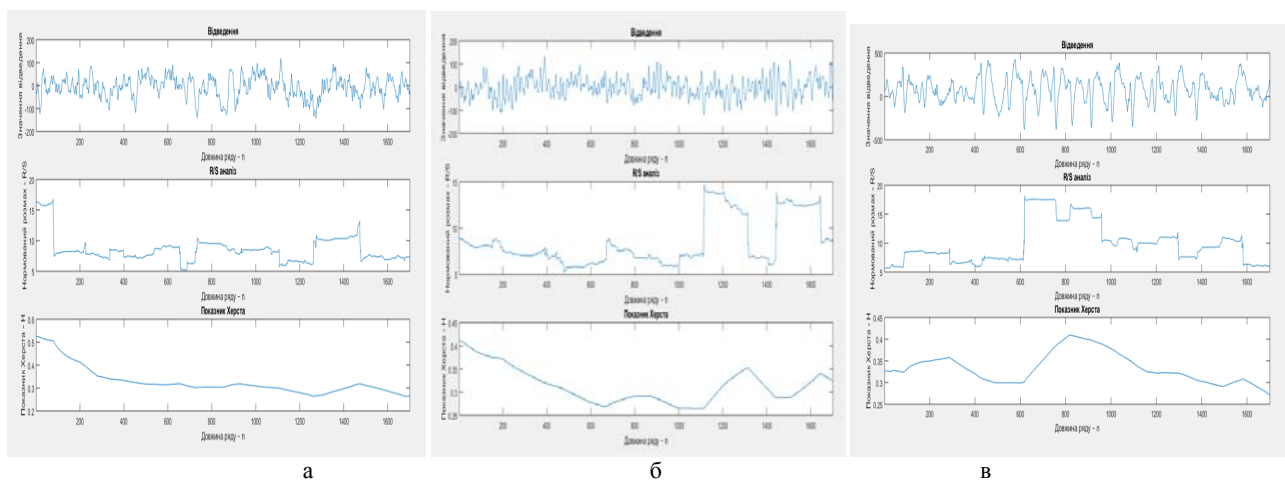


Рис. 1 – Результати R/S-аналізу: а – 10-секундний запис відведення Т3 пацієнта А при реєстрації нормальної ЕЕГ; б – 10-секундний запис відведення F4 пацієнта Б при помірній роздратованості серединних структур головного мозку під час гіпервентиляції; в – 10-секундний запис відведення F7 пацієнта В під час патологічної активності

У випадку динамічного режиму з загостренням після ділянки низькоамплітудних, достатньо складних коливань сигналу настає режим високоамплітудних, більш простих по складу коливань, які потім після певної кількості ітерацій знову змінюються ділянкою

коливань низької амплітуди. У результаті аналізу ЕЕГ для груп «норма», «вогнищеві ураження» та «системні ураження» встановлені такі значення показника Херста (табл. 1):

Таблиця 1 – Показник Херста

Функціональна проба	Норма	Системні ураження	Вогнищеві ураження
Очі відкриті	0.212...0.245	0.312...0.345	0.412...0.445
Очі закриті	0.225...0.234	0.325...0.334	0.344...0.434
Гіпервентиляція	0.216...0.228	0.346...0.358	0.356...0.428
Фотостимуляція	0.208...0.213	0.348...0.367	0.358...0.432

За даними табл. 1 можна сказати, що:

- для нормальної активності характерне зосередження значення показника Херста близько $H \sim 0,25$;
- при помірній роздратованості серединних структур головного мозку характерне підвищення значення показника Херста до $H \sim 0,37$;
- для патологічної активності характерне підвищення значення показника Херста до $H \sim 0,44$.

Для умовно здорових ділянок ЕЕГ людини значення показника Херста нижче, що говорить про більшу ступінь хаотичності сигналу для мозку за нормальної активності. При цьому найбільш високі значення показник приймає в тих областях мозку, де більш виражені системні порушення. Також високі

значення спостерігались за зорової активності, фотостимуляції, гіпервентиляції, а мінімальні – при функціональній пробі «закриті очі».

Також для відображення динамічної поведінки багатомірної системи, потрібно створити фазовий портрет системи (аттрактор). Аттрактор створюється шляхом обробки кожної залежної змінної системи від часу у вигляді вектора. Геометричні властивості аттракторів представляють інформацію про глобальний стан системи.

З отриманих даних бачимо (рис. 2), що фазовий портрет має хаотичний характер у стані спокою, він не містить впорядкованостей, як під час патології.

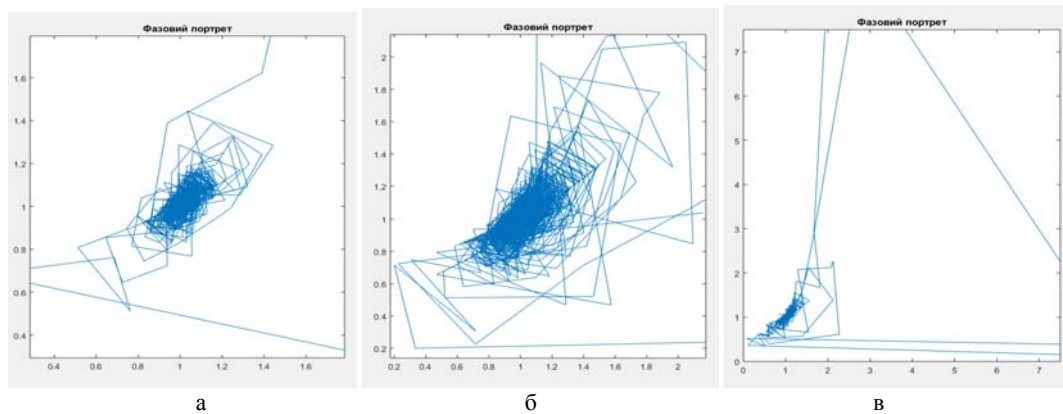


Рис. 2 – Фазовий портрет: а – у стані спокою; б – при епілептичному нападі; в – при системних ураженнях

Аттрактор відображає значну регулярність записів ЕЕГ пацієнтів під час епілептичного нападу, ніж в ЕЕГ здорових людей, а також свідчить про те, що нейрофізіологічна «епілептична» система, яка утворюється при епілепсії, стає менш складною та ще більше спрощується під час нападу (абсансу).

На основі результатів роботи програмного продукту можна робити попередні висновки щодо прогнозування патологічних активностей на ЕЕГ.

Обговорення результатів дослідження динамічних особливостей нейронної мережі головного мозку. Проведений аналіз дозволив визначити середні значення показника Херста. Виходячи з отриманих результатів, можна вважати, що предиктором нападу може бути постійне збільшення синхронізації ЕЕГ, яке можна спостерігати за збільшенням значення показника Херста перед нападом.

Дослідження різних типів сигналів показали, що чим складніший аттрактор системи, тим людина знаходиться в більш спокійнішому і здоровішому стані, а на ЕЕГ реєструється нормальна мозкова активність. Для патології характерна впорядкованість та наявність додаткових петель аттрактора.

Висновки. ЕЕГ відображає поведінку складної динамічної системи з хаотичним характером сигналів, тому застосування лінійних методів аналізу ЕЕГ є малоефективним. Під час реєстрації патологічної активності на ЕЕГ відмічається зниження складності сигналу, що призводить до зниження хаосу в сигналі. Тому для оцінки таких змін застосовуються методи

нелінійної динаміки та теорія хаосу. Спрогнозований початок епілептичного нападу, його тривалість та закінчення дадуть змогу лікарям контролювати форму захворювання.

Увага до проблеми завчасного визначення епілептичних нападів обґрунтовано істотною кількістю пацієнтів, що страждають неконтрольованою формою захворювання, яка нерідко супроводжується моторними судомами і втратою свідомості.

Таким чином, аналізуючи електроенцефалограму методами нелінійної динаміки, зокрема, обчислюючи показник Херста та будуючи фазові портрети системи, ми можемо говорити про системні процеси, які відбуваються в головному мозку, та прогнозувати своєчасне виявлення епілептичних нападів.

Подальше дослідження особливостей взаємної динаміки ЕЕГ-сигналів, а також ефектів частотно-фазової синхронізації, як прояви певних співвідношень між характерними частотами і фазами збуджень у функціонуванні мозку як цілісної системи, виглядає вельми перспективним. Пошук діагностичних ознак психічних розладів на основі виявлення змін в характері динаміки як окремих ЕЕГ, так і перехресних кореляцій між сигналами різних комбінацій електродів, сприятимуть розробці принципів діагностики, в тому числі попереджувальної, ряду психічних відхилень.

Список літератури:

1. Білошицька, О. К. Використання методів нелінійної динаміки та клітинно-автоматного моделювання для дослідження динамічних особливостей нейронної мережі головного мозку [Текст] / О. К. Білошицька // Проблема інформаційних технологій. – 2015. – № 1 (17). – С. 173–180.

2. Меклер, А. А. Программный комплекс для анализа электроэнцефалограмм методами теории динамического хаоса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А. А. Меклер. – Санкт-Петербург, 2006. – 168 с.
 3. Аристов, А. В. Фрактальный анализ электрической активности головного мозга при генерализованной эпилепсии [Текст]: дис. ... канд. биол. наук / А. В. Аристов. – Москва, 2010. – 156 с.
 4. Tsoutsouras, V. Simulation of healthy and epileptiform brain activity using cellular automata [Text] / V. Tsoutsouras, G. Ch. Sirakoulis, G. P. Pavlos, A. C. Iliopoulos // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2012. – Vol. 22, No. 9. – P. 23–36. doi: [10.1142/s021812741250229x](https://doi.org/10.1142/s021812741250229x)
 5. Acedo, L. A cellular automaton model for collective neural dynamics [Text] / L. Acedo // Mathematical and Computer Modelling. – 2009. – № 50 (5-6). – P. 717–725. doi: [10.1016/j.mcm.2008.12.018](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.12.018)
 6. Гнездицкий, В. В. Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга) [Текст] / В. В. Гнездицкий. – Москва: «МЕДпресс-информ», 2004. – 624 с.
 7. Mirowski, P. Classification of patterns of EEG synchronization for seizure prediction [Text] / P. Mirowski, D. Madhavan, Y. LeCun, R. Kuzniecky // Clinical Neurophysiology. – 2009. – № 120 (11). – P. 1927–1940. doi: [10.1016/j.clinph.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.09.002)
 8. Майоров, О. Ю. Исследование биоэлектрической активности мозга с позиций многомерного линейного и нелинейного анализа ЭЭГ [Текст] / О. Ю. Майоров, В. Н. Фенченко // Клиническая информатика и телемедицина. – 2008. – Т. 4, № 5. – С. 12–20.
 9. Белошицкая, О. К. Исследование поведения нейронной сети головного мозга при различных патологиях с помощью методов нелинейной динамики [Текст]: мат. 17-й Межд. научно-техн. конф. / О. К. Белошицкая // Системный анализ и информационные технологии, 2015. – С. 48–49.
 10. Доля, В. К. Вплив інформаційного навантаження на параметри основної діяльності водіїв (збуджувальні процеси) [Текст] / В. К. Доля, І. П. Енглезі, І. А. Афанасьєва // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – № 1/2 (49). – С. 65–68. – Режим доступу: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1887/1782>
 11. Nicolaou, N. Detection of epileptic electroencephalogram based on Permutation Entropy and Support Vector Machines [Text] / N. Nicolaou, J. Georgiou // Expert Systems with Applications. – 2012. – № 39 (1). – P. 202–209. doi: [10.1016/j.eswa.2011.07.008](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.008)
 12. Малинецкий, Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики [Текст] / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потопов. – Москва, 2002. – 360 с.
1. Biloshytska, O. K. (2015). Vykorystannia metodiv nelineinoy dynamiky ta klitynno-avtomatnoho modeliuвання dlia doslidzhennia dynamichnykh osoblyvosti neuronnoy mrezhki holovnoho mozku. Problemy informatsiynykh tekhnolohii, 1 (17), 173–180.
 2. Mekler, A. A. (2006). Programmyj kompleks dlja analiza jelektroencefalogramm metodami teorii dinamicheskogo haosa. Saint Petersburg, 168.
 3. Aristov, A. V. (2010). Fraktal'nyj analiz jelektricheskoy aktivnosti golovnoho mozga pri generalizovannoy jepilepsii. Moscow, 156.
 4. Tsoutsouras, V., Sirakoulis, G. Ch., Pavlos, G. P. Iliopoulos, A. C. (2012). Simulation of healthy and epileptiform brain activity using cellular automata. International Journal of Bifurcation and Chaos, 22 (9), 23–36. doi: [10.1142/s021812741250229x](https://doi.org/10.1142/s021812741250229x)
 5. Acedo, L. (2009). A cellular automaton model for collective neural dynamics. Mathematical and Computer Modelling, 50 (5-6), 717–725. doi: [10.1016/j.mcm.2008.12.018](https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.12.018)
 6. Gnezdickij, V. V. (2004). Obratnaja zadacha JeJeG i klinicheskaja jelektroencefalografija (kartirovanie i lokalizacija istochnikov jelektricheskoy aktivnosti mozga). Moscow: «MEDpress-inform», 624.
 7. Mirowski, P., Madhavan, D., LeCun, Y., Kuzniecky, R. (2009). Classification of patterns of EEG synchronization for seizure prediction. Clinical Neurophysiology, 120 (11), 1927–1940. doi: [10.1016/j.clinph.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.09.002)
 8. Majorov, O. Ju., Fenchenko, V. N. (2008). Issledovanie bioelektricheskoy aktivnosti mozga s pozicij mnogorazmernogo linejnogo i nelinejnogo analiza JeJeG. Klinicheskaja informatika i telemedicina, 4 (5) 12–20.
 9. Beloshickaja, O. K. (2015). Issledovanie povedenija neuronnoj seti golovnoho mozga pri razlichnyh patologijah s pomoshh'ju metodov nelinejnoy dinamiki. Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologi, 48–49.
 10. Dolia, V. K., Enhlezi, I. P., Afanasieva, I. A. (2011). Vplyv informatsiynoho navantazhennia na parametry osnovnoi diialnosti vodiiv (zbudzhualni protsesy). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (2 (49)), 65–68. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1887/1782>
 11. Nicolaou, N., Georgiou, J. (2012). Detection of epileptic electroencephalogram based on Permutation Entropy and Support Vector Machines. Expert Systems with Applications, 39 (1), 202–209. doi: [10.1016/j.eswa.2011.07.008](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.008)
 12. Malineckij, G. G., Potapov, A. B. (2002). Sovremennye problemy nelinejnoy dinamiki. Moscow, 360.

Надійшла (received) 30.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Нелінійна динаміка як інструмент прогнозування патологічних змін на електроенцефалограмі/ О. К. Білошицька// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.79–83. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Нелинейная динамика как инструмент прогнозирования патологических изменений на электроэнцефалограмме/ О. К. Белошицкая// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.79–83. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Nonlinear Dynamics as Instruments for Prediction of Pathological Changes in the Electroencephalogram/ О. Biloshytska//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.79–83. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Білошицька Оксана Костянтинівна – асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», асистент кафедри біомедичної інженерії; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: o.biloshytska@kpi.ua.

Белошицкая Оксана Константиновна – асистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ассистент кафедры биомедицинской инженерии; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: o.biloshytska@kpi.ua.

Biloshytska Oksana – assistant, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», assistant of department of Biomedical Engineering; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056

УДК 005.591.6:364.69:640.412(477.74)

Л. А. ТІТОМИР, О. І. ДАНИЛОВА

ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ СОЦІАЛЬНИХ ІННОВАЦІЙ В ГОТЕЛЯХ ОДЕСИ І ОБЛАСТІ

Досліджено досвід впровадження соціальних інновацій в готельному бізнесі з метою підвищення конкурентоспроможності підприємств та розглянуті перспективи розширення спектру послуг для людей із особливими потребами. Проаналізовано досвід готелів м. Одеси та області щодо ведення соціально-відповідального бізнесу та надання готельних послуг маломобільним групам населення. Обґрунтовано необхідність впровадження соціальних інновацій на готельних підприємствах з метою охоплення такого сегменту потенційних споживачів, як люди з обмеженими можливостями та необхідність державної підтримки соціальних інновацій.

Ключові слова: готелі, соціальні інновації, якість, люди з особливими потребами, конкурентоспроможність, сфера послуг, споживачі

Исследован опыт внедрения социальных инноваций в гостиничном бизнесе с целью повышения конкурентоспособности предприятий. Рассмотрены перспективы расширения спектра услуг для людей с ограниченными возможностями. Проанализирован опыт отелей г. Одессы и области относительно ведения социально-ответственного бизнеса и предоставления гостиничных услуг маломобильным группам населения. Обоснована необходимость внедрения социальных инноваций на гостиничных предприятиях с целью охвата такого сегмента потенциальных потребителей, как люди с ограниченными возможностями, и необходимость государственной поддержки социальных инноваций.

Ключевые слова: гостиницы, социальные инновации, качество, люди с ограниченными возможностями, конкурентоспособность, сфера услуг, потребители

Implementation experience of social innovations in the hotel business was investigated with the aim of increasing the competitiveness of enterprises. Prospects for expanding the range of services for people with disabilities were explored. The experience of hotels in Odessa and the Odessa region on conducting socially responsible business and providing hotel services to low-mobility groups of the population has been analyzed. The need to introduce social innovations in hotel enterprises was substantiated in order to reach such a segment of potential consumers as people with disabilities, as well as the necessity of state support for social innovations. As a result of the analysis of implementation of social innovations in 15 enterprises of the hotel business in Odessa and the Odessa region, it is possible to note the introduction of a number of necessary services that improve the quality of service and contribute to the improvement of the comfort of guests with special needs. All considered enterprises have the signs of adapted conditions for the stay of a low-mobility category of guests, while the spectrum and variety of services does not depend on the availability of "stars".

The article emphasizes that innovations in the hotel business cannot be reduced to the use of progressive information technologies and the introduction of services. It should include a whole range of innovations that relate to the sphere of management, starting with the management of quality, finance, personnel and ending with the elaboration of long-term development strategies. At the same time, without government support, neither hotel management nor staff can fully realize the available potential. The experience of introducing of social innovations in hotels in Odessa and Odessa region confirms this. Marketing promotion of the idea of service socialization will contribute to the fact that domestic hotel enterprises will become more accessible and attractive for a new segment of potential customers.

Keywords: hotels, social innovations, quality, people with the special necessities, competitiveness, service business, consumers

Вступ. Сучасний ринок готельних послуг знаходиться в постійній динаміці, відповідаючи на потреби клієнтів постійно змінюється, оскільки інтенсифікація розвитку цього сектора економіки в умовах глобалізації призводить до збільшення конкуренції. Відповідно, для стабілізації своїх позицій готельним підприємствам необхідно максимально використовувати інноваційні тенденції при виборі конкурентних переваг. Зважаючи на те, що класифікація («зірковість») готелю значною мірою залежить від якості надання послуг, інновації швидше розвиваються саме в цьому напрямку. Все це обумовлює актуальність досліджень щодо розробки та впровадження соціальних інновацій в готельному бізнесі [1–3]. Оскільки сервісне обслуговування максимально орієнтоване на забезпечення соціальних потреб людини, що відповідає сучасним стратегіям соціалізації та відповідальності бізнесу багатьох країн світу, впровадження саме соціальних інновацій на додачу до структурних, стає основною складовою при наданні якісних послуг на підприємствах готельного господарства.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. В сучасних умовах господарювання однією з конкурентних переваг для підприємств готельного господарства може бути досягнення 100 % «індексу задоволеності клієнта» або безвідмовності сервісного обслуговування для широкого сегмента споживачів. Одним з варіантів розширення цільового ринку може бути вихід на споживачів абсолютно не охоплених певним сервісом або обмежених в ньому.

До такого сегменту споживачів можна віднести людей з обмеженими можливостями або маломобільні групи населення. Саме визначення потреб таких потенційних клієнтів та інноваційні тенденції в організації їх обслуговування, як елемент соціалізації послуг провідних підприємств готельного господарства, стане основним завданням даного дослідження. Крім того, у сфері туризму для осіб з обмеженими фізичними можливостями проходять процеси активної інституціоналізації. Про це свідчить виникнення міжнародної туристської організації SATH, яка проводить щорічні 3 конгреси, випускає щомісячний журнал, співробітничає з урядами окремих держав. Спеціалізовані туристські ринки для осіб з особливими потребами на сьогодні – це найперше державна санаторно-курортна зона. 16 грудня 2009 року Верховна Рада ухвалила Закон України «Про ратифікацію Конвенції про права інвалідів і Факультативного протоколу до неї» [4]. Конвенція про права інвалідів передбачає, що держави-учасниці зобов'язуються забезпечувати та заохочувати повну реалізацію всіх прав людини й основоположних свобод всіма особами з особливими потребами/інвалідністю без будь-якої дискримінації за ознакою інвалідності. Із цією метою держави-учасниці зобов'язуються: вживати всіх належних заходів для усунення будь-яких проявів дискримінації щодо осіб з особливими потребами/інвалідністю, а також сприяти наявності й використанню нових технологій, зокрема інформаційно-комунікаційних технологій, засобів, що полегшують

мобільність, обладнання та допоміжних технологій, зручних для осіб з обмеженими можливостями, приділяючи першочергову увагу недорогим технологіям.

За даними Всесвітньої організації з охорони здоров'я, кількість людей із вадами здоров'я постійно збільшується, з урахуванням глобальних світових тенденцій в однієї людини з десяти є одне або кілька функціональних порушень, які стають причиною інвалідності [5]. Глобальна кількість людей із обмеженими можливостями зростає у зв'язку із старінням населення і швидким поширенням хронічних хвороб.

Соціальні інновації є сучасним трендом, який підхопили підприємства готельного господарства, отримуючи можливість задовольнити максимальну кількість потенційних клієнтів, включаючи такий сегмент споживачів, як люди з інвалідністю та інші маломобільні групи населення.

Підприємства готельного господарства за державними стандартами повинні мати хоча б один номер, пристосований для людей з особливими потребами. При цьому передбачено ряд вимог щодо забезпечення доступності сервісного середовища для людей з інвалідністю на стадії проектних робіт (ДБН, ДСТУ), соціальних зобов'язань, які покладаються на бізнес структури в цілому, і безпосередньо на готельні підприємства. Так, у готелі потрібно створити умови, щоб забезпечити життя, здоров'я туристів, зберегти їхнє майно та захистити навколишнє середовище згідно з ДСТУ 4268 та розділу 5 ДСТУ 4269:2003. Проектуючи нові та реконструюючи наявні готелі, треба передбачати устаткування для задоволення потреб інвалідів та інших маломобільних груп населення згідно з вимогами ДБН В 2.2-9 та розділу 6 ДСТУ 4269:2003. Останнім часом у готельному бізнесі є тенденція у боротьбі між готелями переважно за іноземних і заможних вітчизняних туристів. В той же час, за рівнем надання якісних послуг вітчизняні готелі поступаються іноземним і не мають того досвіду при впровадженні інновацій і при проведенні маркетингових заходів, як готельні мережі. Повною мірою задовольнити попит на найбагатших туристів можуть міні-готелі, яких в Україні не вистачає, та тризіркові готелі, які можуть надати невеликі, але хороші кімнати з непоганим сервісом не тільки вітчизняному, а й іноземному туристу. Сегмент ринку, що об'єднує достатньо великі групи населення із скромними доходами поки ще майже не зачіпається. Більш того, не вирішеною є проблема чіткого законодавчого визначення місця готельного бізнесу в туристичній сфері, його відомчого підпорядкування. На законодавчому рівні необхідно обумовити правові, економічні та організаційні аспекти створення і розвитку конкурентного середовища на ринку сфери гостинності. Крім того, необхідно заохочувати ті підприємства сфери гостинності, що впроваджують соціальні інновації не тільки внаслідок необхідності дотримання вимог ДСТУ, але й для підвищення якості обслуговування і розширення контингенту клієнтів. Саме аналіз проблем із впровадженням соціальних інновацій та можливі шляхи їх вирішення є однією із можливостей покращення надання якісних послуг, розширення можливості адаптації людей із особливими потребами та покращення комфортності їх життя. Зважаючи на те,

що люди з інвалідністю (до 12 % населення країни), особи з тимчасовим порушенням здоров'я (до 1,5 %), люди похилого віку (понад 40 %), вагітні жінки (приблизно 1 %), діти дошкільного віку (більше 2 млн.), особи з дитячими колясками (до 1 %) складають достатньо значний контингент, залучення цієї групи населення до більш активного користування послугами готелів та туристичного бізнесу є актуальним і це необхідно враховувати при розробці стратегії управління готельними підприємствами.

Метою роботи є узагальнення досвіду підприємств готельно-ресторанного бізнесу м. Одеси та області у відповідності до сучасних тенденцій світової соціалізації та нових вимог до сервісного обслуговування людей з інвалідністю та інших маломобільних груп населення, як не охопленого повним спектром послуг сегмента споживачів.

У процесі дослідження використовувалися загальнонаукові методи аналізу, синтезу, абстракції, порівняння, економіко-статистичні методи збору та обробки інформації

Обговорення дослідження стану впровадження соціальних інновацій в готельно-ресторанному бізнесі. Соціально-відповідальне ведення бізнесу надає ряд переваг готельним підприємствам, які враховують в своїх стратегіях потреби всіх верств населення, а саме: збільшення обсягів реалізації та зміцнення позиції на ринку, формування високого рівня репутації серед клієнтів, можливість отримати стратегічних вигод від соціальних інвестицій. Все це може стати ключовою компетенцією готельних підприємств в умовах жорсткої конкурентної боротьби. Готелі м. Одеси і області відрізняються один від одного, але в кожному, навіть в готелях без зірок, є номери, пристосовані для гостей з особливими потребами. Необхідно зауважити, що в м. Одеса і області є санаторно-курортні комплекси, які вже давно непогано пристосовані для відпочинку і реабілітації людей з особливими потребами. В той же час, особливо в «високий сезон», в багатьох готелях Одеси надаються послуги гостям з особливими потребами, які є найбільш актуальними для сімей, що хочуть відпочити всі разом, але не всім членам родини необхідна санаторно-курортна реабілітація.

Для розвитку соціальних інновацій у готельних підприємствах застосовується закордонний досвід та власні напрацювання з практичного впровадження соціально-інноваційної діяльності, а саме надання розширеного спектру послуг для людей з особливими потребами, для літніх людей та інших категорій мало мобільних груп клієнтів. До таких послуг можна віднести:

можливість звертання в будь-який час доби за допомогою до медичного персоналу;

збалансоване, складене на основі рекомендацій дієтолога і індивідуальних смакових переваг харчування;

комфортні, максимально безпечні умови проживання, серед яких наявність поручнів в місцях загального користування, тривожних кнопок в кімнатах, спеціальних ліжок, багатофункціональних пристроїв для немобільних людей, спеціальних засобів для переміщення в просторі тих, хто остаточно не втратив здатності пересуватися;

індивідуальний підхід до кожного постояльця, що дозволяє йому відчувати себе потрібними незалежно від ступеня своєї самостійності;

атмосфера затишку і турботи, спілкування, різноманітні програми та умови для цікавого проведення дозвілля;

можливість вибору програми перебування відповідно до медичних і соціальних потреб літньої людини, а також його рідних;

можливість позбутися відчуття залежності та безпорадності;

проживання в комфортних умовах курортної зони.

Наявність вище перелічених послуг за пунктами представлена в табл. 1 і якість надання оцінена за 5-ти бальною шкалою. Як видно із наведеної таблиці, результати виявилися неоднозначними – деякі готелі пропонують тільки самий мінімум зручностей для інвалідів, тоді як інші забезпечували більший комфорт. Турбота про людей в бізнес-готелях «Continental», «Palace Del Mar», «Бристоль» (5 зірок), SPA-готелі «Londonskaya» (4

зірки) відповідає світовим стандартам. Не відстають від них і готелі, які в останні 3-5 років пройшли капітальну реконструкцію. На теперішній час в Одесі налічується більше 25 готелів категорії 3 зірки, проте далеко не усі вони є досить відомими, при цьому кожен має свої особливості, що дозволяють віднести їх саме до цієї категорії. На найбільшу увагу заслуговують ті готелі, які завдяки зусиллям адміністрації, персоналу в останні роки активно впроваджують соціальні інновації, наприклад, «Вікторія» і «Валентина», «Промінада». Усі названі готелі поліпшили комфортність місць розміщення гостей і умови харчування після реконструкції. «Вікторія» і «Валентина» спочатку були побудовані як готелі для прийому гостей в курортній зоні Одеси, тому їх реконструкція не вимагала значного вкладення коштів, швидше необхідно була вивірена стратегія розвитку. Одним із пунктів цієї стратегії і стало покращення якості обслуговування із індивідуалізованим підходом до гостей (табл. 1).

Таблиця 1 – Наявність спектру послуг для людей з особливими потребами

Назва готелю	№ пункту із спектру послуг							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Континенталь	4	5	5	5	4	5	4	5
Палас Дель Мар	5	5	5	5	4	5	4	5
Бристоль	5	5	5	5	5	5	5	5
Лондонская	5	5	5	5	5	5	5	5
Гагарін	4	5	5	5	4	4	4	4
Пальміра	4	5	4	5	4	4	4	4
Вікторія	3	4	3	4	3	4	3	4
Валентина	2	4	3	3	3	4	3	4
Промінада	3	4	3	4	3	3	3	4
Атлантік	2	3	3	3	3	3	3	4
Аркадія	3	3	3	4	3	3	3	4
Одеса	3	4	3	4	3	4	3	4
Фіеста	3	4	3	3	3	4	4	4
Водний світ	3	4	4	4	3	4	4	4
Русь	4	4	4	4	3	4	4	4

Турбота про гостей з особливими потребами у перелічених готелях починається вже з території, що прилягає до готелів – наявні зручні під'їзні шляхи, які не захащені зайвими будовами та кіосками, вхід до готелю пристосований до потреб інвалідів та інших маломобільних груп населення – мають пандус шириною до 2-х м (в різних готелях від 1,80 до 1,90 – 2, м). Служба приймання має можливість швидкого обслуговування особи, що рухається на візку – вестибюльні зони достатньо просторі, двері все широкі – до 2 м, щоб вільно можна було пересуватися. В готелях 2, 3 зірки і навіть без зірок, наявні пандуси та додаткові перила всередині для комфортного пересування. Як правило, номери для людей з особливими потребами розташовані на 1 поверсі, а в готелі «Вікторія», де такий номер наявний на 2-му поверсі (ближче до місця харчування) для підняття і заїзду коляски крім пандусів працює грузовий ліфт.

Служба приймання відразу сповіщає про можливість надання додаткових послуг («рум-сервіс»), який за бажанням клієнта можна включити відразу до рахунку («Вікторія», «Атлантік», «Аркадія», «Одеса» м. Одеса, міні-готелі «Фіеста», «Водний світ», готель-

но-ресторанний комплекс «Русь» Одеська обл., м. Білгород-Дністровський). Якщо гість захоче харчуватися у загальній залі – наявні столи, що можна відкоригувати під потреби клієнта – зменшити або збільшити висоту. Коридори, якими буде пересуватися людина з використанням додаткових засобів мають достатню ширину і двері також зручні для проїзду. Хоча треба відмітити, що лише на перших поверхах на дверях наявні фотоелементи і вони розсувають при наближенні гостей. Більшість же дверей мають конструкції, коли гостям необхідно самим їх відкрити, але треба зауважити, що майже всі двері у готелях легко відкриваються в обидві сторони і розташування ручок на них достатньо комфортне. У загальнодоступній частині цих готелів більшість туалетів (на 1-му та 2-му поверхах) пристосовані до потреб інвалідів – мають більш широкі двері, додаткові перила всередині, у тому числі, хоча б одну кабінку з більш широкими дверима та перила всередині для зручності пересування.

У загальних приміщеннях (вестибюль, холи, приміщення для харчування тощо) є достатньо місця для осіб, що рухаються на візку. В спеціальних номе-

рах готелів не тільки розширені двері (в 1,5 рази), але й сам номер має більшу площу, розташування меблів дозволяє вільно пересуватися всередині. В номерах наявні додаткові «тривожні кнопки», ліжка тільки подвійні та для зручності на 10 см вище звичайних – щоб легше було пересунути на візок або з візка. Інші меблі (столи, стільці, в окремих номерах – крісла) також пристосовані для особливих потреб, тобто мають інші параметри у порівнянні із стандартними, наприклад, для зручності писання столики можуть бути нижче або із змінною висотою, яка відразу при заселенні виставляється у відповідності до побажань гостя. Рукомийники розташовані нижче, двері до ванної кімнати достатньо широкі та всередині вона обладнана спеціальними перилами, щоб легко можна було пересунути із візка до спеціальної ванни із можливістю комфортно сидіти та корегувати потоки води.

Всі готелі надають можливість вільного доступу до мережі інтернет, тобто, гість відразу відчуває себе у звичному просторі із можливістю спілкування.

Для комфортного перебування гостей часто необхідні різні дрібні додаткові послуги – від надання послуг дрібного ремонту, чистки та прання одягу до послуг перукарні або додаткових послуг сра-салонів. При цьому найважливішою є безпека клієнтів [6, 7]. Безпека в готелі – явище глобальне, багатоаспектне. Вона розпочинається з підбору гіпоалергенних матеріалів і косметичних засобів і закінчується заходами захисту від обставин форс-мажору, до яких можливо віднести в першу чергу стихійні лиха. Пожежі, теракти, масові отруєння, загибель гостей на небезпечних атракціонах - усі ці трагедії траплялися в готелях, причому кількість їх не зменшується. Практика показала, що уберегти людей від наслідків надзвичайних подій вдається далеко не завжди: число жертв серед мандрівників рік від року росте. Саме тому важливим є дотримання правил безпеки в готелях, особливо це стосується людей із особливими потребами. У усіх готелях наявні покажчиків евакуаційних виходів на кожному поверсі, причому розташовані таким чином, щоб їх добре побачила і людина на візку. Протипожежні вимоги в деяких готелях більш детальніші (наприклад, в готелях 5 зірок передбачено не тільки використання в інтер'єрах важкозаймистих матеріалів, але й можливість займання від, наприклад, кинutoї недбало сигарети). І, безумовно, в усіх готелях є спеціальні місця для паління. В сучасних готелях 5 зірок існують системи виявлення пожежі, сповіщення і управління евакуацією людей при пожежі, колективного захисту, протидимного захисту, засобу індивідуального захисту людей від небезпечних чинників пожежі. В готелях м. Одеси і області наявні первинні засоби пожежогасінні у будівлях, спорудах і будовах, а автоматичні установки пожежогасінні наявні лише в окремих 5-зіркових готелях. Тобто, до повного технічного оснащення готелям України ще далеко, але необхідні звичайні заходи виконуються. В дизайні готелів використовують безпечні матеріали, крім того, в усіх готелях наявні програми енергозбереження, тобто все обладнання достатньо сучасне і, якщо і не дуже дороге, але вимогам безпеки відповідає.

Для гостей дуже важливо не тільки почувати себе безпечно і комфортно, але й добре виглядати. В готелях «Вікторія», «Аркадія», «Одеса», «Водний світ», «Русь» наявні салони краси до яких мають можливість завітати і гості, що відносяться до категорії маломобільних. В усіх цих готелях зручно дістатися до салонів краси або до масажних чи сра-салонів на візках, а висококваліфікований персонал має досвід із роботи з різними групами клієнтів. В той же час, допомога кваліфікованого (запрошеного) психолога легко доступна лише в готелях 4- та 5 зірок. В готелях 3 зірки необхідно ще при замовленні номера попередити про необхідність такої послуги і навіть тоді готелі не можуть гарантувати її якісне надання, оскільки професійних психологів, що здатні погодитися на таку роботу небагато.

В готелях «Континенталь», «Лондонская», «Бристоль», «Вікторія», «Аркадія», «Одеса», ГРК «Русь» наявний трансфер, що значною мірою полегшує для гостей не тільки можливість дістатися до готелю та виїхати із нього, але й є можливість пересування по місту із замовленими водіями або у супроводі екскурсовода. Крім того, туристичні агентства, які співпрацюють із усіма готелями надають послуги з розважальних програм та екскурсій, у тому числі, із урахуванням особливих потреб мало мобільних клієнтів, до яких застосовується індивідуальний підхід. Для тих, хто звик до активного способу життя навіть у візку і проживають в готелях «Вікторія», «Аркадія», «Одеса», «Пальміра», «Гагарін», «Палас Дель Мар» є можливість прогулянок «траєюю здоров'я», яка завдовжки більше 6 км і зв'язує пляжі Ланжерон і Аркадія. До послуг гостей крім пляжів Одеси та у випадку несприятливих погодних умов – басейни. Єдиний в Одесі сра-готель із морською водою «Немо» надає такі послуги, як купання з дельфінами, що останнім часом стало дуже популярно в практиці реабілітації. В готелях «Бристоль», «Гагарін», «Континенталь» можна замовити послугу іп-потерапії. Завдяки кінному клубу «Стетсон» таку послугу можливо замовити і в інших готелях, але це вже можливість для більш платіжеспроможних клієнтів. Необхідно відмітити, що така проста послуга, як оренда інвалідних колясок в усіх готелях для туристів не доступна, а вона значно полегшила б життя багатьом клієнтам.

Найважливішим критерієм, що здатний покращити надання послуг все ж таки залишається відбір персоналу. Дуже актуальним є формування, з одного боку, такої команди виконавців, рівень компетентності яких дасть можливість забезпечити ефективне виконання інноваційних проектів, а з іншої – раціональний розподіл людських ресурсів з метою ефективної реалізації портфеля проектів у рамках інноваційного підприємства або організації [8]. Працівники всіх готелів м. Одеси та області, є, як правило, спеціалістами в сфері надання послуг, тим більше, що значна частина готелів, які були розглянуті в матеріалах статті є базовими підприємствами для практики та працевлаштування випускників ОНАХТ, тому все добре знають основні правила, що необхідні при спілкуванні із людьми із обмеженими можливостями, причому це стосується як термінології, так і корект-

ного поводження. Важливо відмітити, що неформальне спілкування і стосунки з літніми людьми та іншими категоріями гостей, що вимагають підвищеної уваги, мають бути засновані на деяких правилах і знаннях: передусім треба звертати увагу на особу людини, не акцентуючись на його фізичних недоліках; необхідно підтримувати можливості і уміння, а не обмеження; при спілкуванні треба уникати термінів «інвалід», «каліка», краще сказати «людина з обмеженими можливостями, проблемами здоров'я» і так далі; важливо не виявляти надмірної уваги до таких осіб і не оточувати її гіперопікою; тим більше, якщо це дитина з обмеженими можливостями; коректно треба підпирати термінологію, наприклад, «людина, позбавлена або яка втратила мову»; про тих, хто пересувається за допомогою механічних засобів треба говорити: «використовує крісло-коляску, пересувається за допомогою крісла-коляски» тощо. Функціональні обмеження, які заважають людині ходити, чути, говорити, не є причиною його недієздатності; істинну причину складають бар'єри довкілля і суспільства. Персонал готелю і студентів навчають, що гості повинні відчувати себе комфортно. Поставивши себе на місце гостя, завжди можна оцінити, наскільки комфортно клієнт себе почуває, і чого не вистачає. Так, під час проведення практики, за можливості, студенти здійснюють рольові ігри: вибагливий клієнт або клієнт із обмеженими можливостями – рецепція, менеджер, покоївка тощо. Після цього здійснюється обмін думками, як саме найкращим чином виходити із ситуації, не спричиняючи ні конфлікту, ні незручностей [8, 9].

Без державної підтримки самі власники готелів не зможуть вирішити проблему впровадження соціальних інновацій. Люди з обмеженими можливостями, як правило, не можуть дозволити собі туристичний відпочинок, тому необхідна державна програма з соціального туризму, яка буде здійснюватися за рахунок субсидій держави, тим більше, що пільгових верств населення, які раніше могли користуватися оздоровленням за рахунок профспілки внаслідок відсутності коштів стало набагато менше. Необхідно, щоб серед коштів, що виділяються державою на соціальні потреби, була передбачена і активна реабілітація людей з обмеженими можливостями, тобто важливо законодавчо закріпити можливість соціального туризму, в якому передбачений лікувально-оздоровчий туризм, туризм для ветеранів, інвалідів, молоді, міжнародний обмін по лінії соціального туризму. В Україні наявна непогана законодавча база в сфері захисту прав осіб з інвалідністю [1,10], але відсутність фінансування та невисокий рівень доходів громадян, особливо із інвалідністю не дає можливості розвитку цієї сфери. В той же час, сприятливі умови, що можуть бути створені державою, призведуть до активізації громадської і трудової діяльності всіх верств населення, у тому числі, маломобільних, підвищенню достатку і потреб у різного роду сервісному обслуговуванні (у тому числі готельний, ресторанний сервіс, туристичні послуги).

Висновки. Проведений аналіз функціонування п'ятнадцяти готельних підприємств м. Одеси і області

дозволяє з оптимізмом говорити про впровадження ряду необхідних послуг, що дозволяють підвищити якість обслуговування, що сприяють поліпшенню комфорту гостей. Всі готелі, що були розглянуті у статті, мають ознаки адаптованих для людей із особливими потребами, при цьому спектр і різноманітність послуг не залежить від наявності «зірок».

Інноваційний підхід в готельному бізнесі не може зводитися лише до використання прогресивних інформаційних технологій і випуску нових послуг, але і повинен включати цілий комплекс нововведень, що зачіпають усі сфери в області управління (управління якістю, фінансами, персоналом). В той же час, самі готелі, без державної підтримки не зможуть реалізувати свій потенціал, що і підтверджує досвід впровадження соціальних інновацій в готелях м. Одеси і області. Маркетингове просування ідеї соціалізації сервісного обслуговування є запорукою того, що вітчизняні готельні підприємства стануть більш доступними і привабливими для нового сегменту потенційних клієнтів.

Список літератури:

1. Реформування системи надання адміністративних послуг органами виконавчої влади та органами місцевого самоврядування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dy.nayka.com.ua>
2. *Котлер, Ф.* Гостеприимство. Туризм [Текст] / *Ф. Котлер, Дж. Боуэн, Дж. Мейкенз.* – Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 1045 с.
3. *Кожухівська, Р. Б.* Використання міжнародного досвіду впровадження інновацій у сферу готельного бізнесу [Текст] / *Р. Б. Кожухівська,* // Вісник Донецького національного університету. Серія Економіка і право. – 2015. – № 1. – С. 160–164.
4. Про ратифікацію Конвенції про права інвалідів і Факультативного протоколу до неї [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1767-17>
5. Всемирный доклад об инвалидности [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/report/ru/
6. *Сидоров, О. В.* Оцінка фізичних факторів середовища в салонах краси [Текст] / *О. В. Сидоров, Я. Ю. Богомазюк, А. В. Майданець* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». – 2015. – № 36 (1145). – С. 101–104
7. *Шостак, Е. И.* Формирование команд исполнителей высокотехнологических проектов на инновационных предприятиях с использованием экспертного оценивания сценариев [Текст] / *Е. И. Шостак* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Механіко-технологіческие системы и комплексы». – 2015. – № 36 (1145). – С. 57–63.
8. Інтеграційні та інноваційні напрямки розвитку індустрії гостинності / [Текст]. – Одеса: Фенікс, 2016. – 159 с.
9. *Тітомир, Л. А.* Інновації в культурі і сервісі обслуговування в готельному господарстві [Текст] / *Л. А. Тітомир* // Наукові праці ОНАХТ. – 2015. – № 48. – С. 166–171.
10. Методологічні засади та емпірика функціонування й розвитку секторальних суб'єктів фінансової інфраструктури [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua>
11. *Дишкантюк, О. В.* Формування інфраструктурного забезпечення сфери гостинності [Текст] / *О. В. Дишкантюк* // Виклики часу. – 2016. – № 7 (357). – С. 25–28.

Bibliography (transliterated):

1. Reformuvannya systemy nadannya administratyvnykh posluh orhanam vykonavchoi vlady ta orhanam mistsevoho samovriaduvannya. Available at: <http://www.dy.nayka.com.ua>
2. Kotler, F., Boujen, Dzh., Mejkenz, Dzh. (2007). Gostepriimstvo. Turizm. Moscow: JuNITI-DANA, 1045.
3. Kozhukhivska, R. B. (2015). Vykorystannia mizhnarodnoho dosvidu vprovadzhenia innovatsii u sferu hotelnoho biznesu.

- Visnyk Donets'koho natsionalnoho universytetu. Seriya Ekonomika i pravo, 1, 160–164.
4. Pro ratyfikatsiiu Konventsii pro prava invalidiv i Fakultatyvnoho protokolu do nei. Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1767-17>
 5. Vsemimyj doklad ob invalidnosti. Elektronnyi resurs. Available at: http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/report/ru/
 6. Sydorov, O. V., Bohomaziuk, Ia. Iu., Maidanets, A. V. (2015). Otsinka fizychnykh faktoriv seredovyshcha v salonakh krasny. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: «Mekhaniko-tehnologichni systemy ta komplekсы», 36 (1145), 101–104
 7. Shostak, E. I. (2015). Formirovaniye komand ispolnitelej vysokotekhnologicheskikh proektov na innovatsionnykh predpriyatiyakh s ispol'zovaniem jekspertnogo ocenivaniya scenariyev. Visnyk NTU «HPI». Seriya: «Mekhaniko-tehnologicheskije sistemy i komplekсы», 36 (1145), 57–63.
 8. Intehratsiini ta innovatsiini napriamky rozvytku industrii hostynnosti: (2016). Odesa: Feniks, 159.
 9. Titomyr, L. A. (2015). Innovatsii v kulturi i servisi obsluhovuvannya v hotelnomu hospodarstvi. Naukovi pratsi ONAKhT, 48, 166–171.
 10. Metodolohichni zasady ta empiirika funktsionuvannya i rozvytku sektoralnykh sub'iektiv finansovoi infrastruktury. Available at: <http://www.economy.nayka.com.ua>
 11. Dyshkantiuk, O. V. (2016). Formuvannya infrastrukturnoho zabezpechennia sfery hostynnosti. Vyklyky chasu, 7 (357), 25–28.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Досвід впровадження соціальних інновацій в готелях Одеси і області/ Л. А. Тітомир, О. І. Данилова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.84–89. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Опыт внедрения социальных инноваций в отелях Одессы и области/ Л. А. Титомир, Е. И. Данилова// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.84–89. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Implementation experience of social innovations in hotels of Odessa and Odessa region/ L. Titomir, O. Danylova //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.84–89 . – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тітомир Людмила Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри готельно-ресторанного бізнесу, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039, e-mail: latitomir@mail.ru.

Данилова Олена Іванівна – кандидат хімічних наук, начальник відділу нормативно-технічного забезпечення та метрології, ст. викладач кафедри готельно-ресторанного бізнесу, Одеська національна академія харчових технологій, ВНТЗтаМ, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039, e-mail: olgaivdan@mail.ru.

Тітомир Людмила Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри отельно-ресторанного бізнесу, Одеська національна академія харчових технологій; ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039, e-mail: latitomir@mail.ru.

Данилова Елена Ивановна – кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры отельно-ресторанного бизнеса, Одесская национальная академия пищевых технологий, отдел нормативно-технического обеспечения и метрологии; ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039 e-mail: olgaivdan@mail.ru.

Titomir Lyudmila – PhD, associate professor of department of hotel-restaurant business, Odessa National Academy of Food Technologies; Kanatna str., 112, Odesa, Ukraine, 65039; e-mail: latitomir@mail.ru

Danylova Olena – PhD, senior Lecturer of department of hotel-restaurant business, Odessa National Academy of Food Technologies; Kanatna str., 112, Odesa, Ukraine, 65039; e-mail: olgaivdan@mail.ru.

УДК 621.307.13

*М. О. МАРКІН, О. М. МАРКІНА, С. М. КУЩОВИЙ, К. О. БУТЕНКО***КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ЗОНДІВ ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ**

В роботі описано принцип побудови інформаційно-вимірювальної системи, яка основана на базі оптичного мікроскопу й передавальної камери типу Novus NVC-130BH а також її налаштувань, визначення характеристик та їх робочих діапазонів. Експериментальні дослідження визначення геометричних розмірів та дефектів зондів атомно-силового мікроскопу NanoEducator (виробник NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) інформаційно-вимірювальною системою показали, що розмір дефектів у виготовлених зондах становить 1 мкм.

Ключові слова: контроль, інформаційно-вимірювальна система, геометричні розміри, атомно-силова мікроскопія, зонд атомно-силового мікроскопа, контраст, штрихова міра, дефект

В работе описан принцип построения информационно-измерительной системы, которая основана на базе оптического микроскопа и передающей камеры типа Novus NVC-130BH а также ее настройки, определения характеристик и их рабочих диапазонов. Экспериментальные исследования определения геометрических размеров и дефектов зондов атомно-силового микроскопа NanoEducator (производитель NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) информационно-измерительной системой показали, что размер дефектов в изготовленных зондах составляет 1 мкм.

Ключевые слова: контроль, информационно-измерительная система, геометрические размеры, атомно-силовая микроскопия, зонд атомно-силового микроскопа, контраст, штриховая мера, дефект

Each type of microscopic investigation is inherent exceptional features sensing element that interacts with the surface of the measurement object. For example, atomic force microscopy inherits individual geometric features of the probes, limiting maximum dimensional resolution. Feature probe for atomic force microscopy is mainly determined by the radius of curvature, geometric dimensions, so to eliminate the effect of measurement error should be used as sharper and thinner probe.

This paper describes the principle of information-measuring system, which is based at the optical microscope and transmission camera type Novus NVC-130BH. It was determined the operating range of signal lighting system characteristics, established experimentally. Determined modulation transfer function that is associated with the quality of the frontiers probe atomic force microscope. It produced probes for atomic force microscope by electrochemical etching of a wolfram wire in a medium of sodium hydroxide. Experimental researches determining the geometric dimensions and defects probe of atomic force microscope NanoEducator (producer NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) by information-measuring system is revealed that the size of defects in the produced probes is 1 micron.

Keywords: control, information-measuring system, geometrical sizes, atomic force microscopy, the probe atomic force microscope, contrast, dashed measure, defect

Вступ. Більш детальне пізнання структурних зв'язків, клітинного складу аж до відокремлення атомних одиниць об'єкту дослідження є унікальною, однак реальною можливістю, при дослідженні об'єктів з застосуванням атомної силової, флуоресцентної, тунельної й скануючої мікроскопії. Реалізація кожного з видів мікроскопічного дослідження потребує спеціалізованого технічного й інженерного забезпечення, що утворює унікальний симбіоз процесу вимірювання й дослідження геометричних розмірів та особливостей клітинного зв'язку об'єктів контролю. Кожному виду мікроскопічного дослідження притаманні виняткові особливості чутливого елемента, який взаємодіє з поверхнею об'єкту вимірювання. Наприклад, атомно-силова й скануюча тунельна мікроскопія відрізняються за методом взаємодії зонду з поверхнею об'єкту, тому кожному з цих видів мікроскопії властиві індивідуальні геометричні особливості зондів, що обмежують граничну просторову роздільну здатність. Особливість зонду атомно-силової мікроскопії визначається в основному радіусом заокруглення [1, 2]. А от в скануючій тунельній мікроскопії зонд відіграє роль провідника і його геометричні розміри й конфігурація можуть бути різноманітні, однак для усунення впливу похибки вимірювання необхідно застосувати якомога гостріший й тонший зонд. Такі особливості конфігурації зондів атомної мікроскопії пов'язані з його утриманням за рахунок силової взаємодії між зразком і вістряем зонду. Однак, через занадто тонкий зонд, сили взаємодії мають незначні показники, тому сигнали швидко згасають не доходячи по п'єзодатчика, в наслідок чого система не відстежує захват зворотного зв'язку й не формує зображення. Для забезпечення високої точності відстеження поверхні

об'єкту, необхідно застосовувати такі показники конфігурації зонду, щоб інформативний сигнал передавався з мінімальними втратами. Тому збільшують кут заточування зонду до таких значень, щоб забезпечити надійну реєстрацію захвату зворотного зв'язку. Однак, при занадто великому куті заточування зонду, збільшується вплив форми на зображення, в наслідок чого погіршуються результати сканування й відповідно збільшується похибка вимірювання геометричних розмірів об'єктів дослідження [3]. З чого можна зробити висновок, що контроль за геометричними розмірами зонду атомно-силової мікроскопії є важливим і необхідним дослідженням.

Звісно вибір оптимальних розмірів й куту заточування зонду було виконано на етапі його виготовлення, однак, під час сканування поверхні об'єктів дослідження виникає порушення цілісності поверхні зонду й утворення дефектів. В даній роботі наведено результати експериментальних досліджень зондів до атомно-силового мікроскопу NanoEducator (виробник NT-MDT Spectrum Instruments Ltd) (Ірландія), який зображено на рис. 1.



Рис. 1 – Зображення атомно-силового мікроскопу NanoEducator

© М. О. Маркін, О. М. Маркіна, С. М. Кущовий, К. О. Бутенко. 2016

Це пов'язано з особливостями хімічного складу металів, з яких їх виготовлено, від чого також залежить термін їх експлуатації. Оскільки не завжди існує можливість застосовувати зонди, що виготовлені з металів з додаванням хімічних сполук, що збільшують міцність й стійкість від крихкості, існує необхідність мати простий й доступний засіб контролю цілісності поверхні зонду. Пропонуємо для виконання такої задачі простий й доступний засіб вимірювання, як інформаційно-вимірювальна система (ІВС).

Експериментальні дослідження. Інформаційно-вимірювальна система для визначення геометричних розмірів об'єктів побудовано на основі сукупності оптичних, електричних та обчислювальних засобів, за допомогою яких інформація про структуру, стан та властивості об'єкту, що міститься в його випромінюванні, перетворюється в вимірювальний сигнал.

Загальна методика роботи інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометрич-

них розмірів полягає в формуванні зображення об'єкту, перетворенні його в цифровий код та застосуванні алгоритмів обробки, що забезпечують необхідну точність визначення параметрів зображення. Зображення об'єкту утворюються розподілом власного випромінювання, відбитого та того, що пройшло через середовище. Зазначимо цифрове зображення інформаційно-вимірювальної системи як сукупність відліків сигналу з прив'язкою до координат мішені світло-електричного перетворювача, де значення відліків сигналів характеризують освітленість пікселів, а їх координати визначають геометричні розміри цифрового зображення об'єкту. В основі даної задачі лежить формування відліків з їх координатною прив'язкою до геометричних розмірів об'єкту. Узагальнену структурну схему інформаційно-вимірювальної системи для визначення геометричних розмірів наведено на рис. 2.

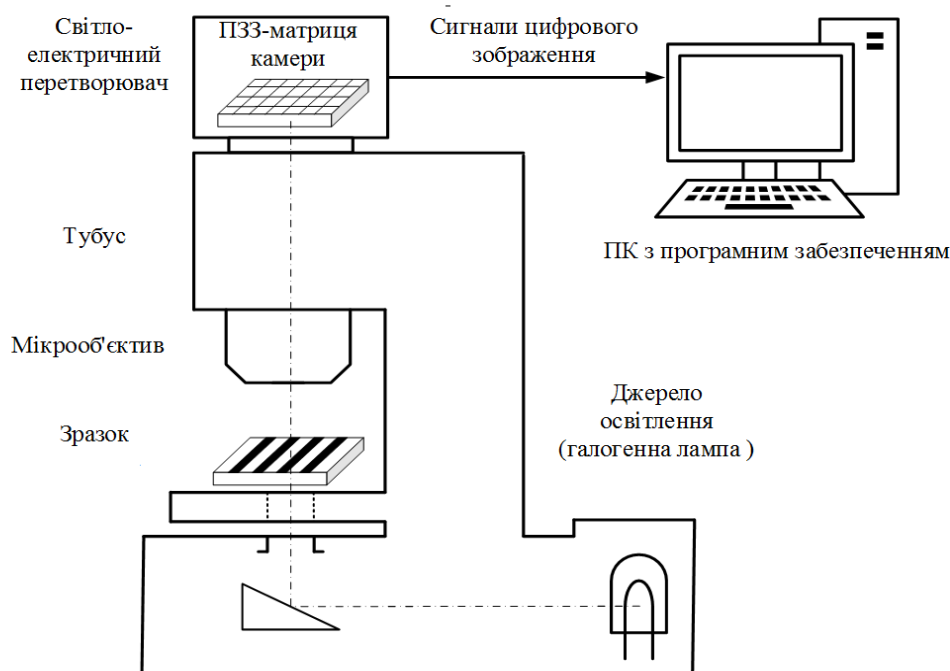


Рис. 2 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення геометричних розмірів зондів АСМ

Інформаційно-вимірювальні системи викликають особливу зацікавленість як технічний засіб з потенційно високою роздільною здатністю, що має значні перспективи щодо зменшення похибок вимірювання лінійних розмірів. Дослідження роздільної здатності вимірювальної системи виконують завдяки оцінюванню контрасту зображення з функцією передачі модуляції [2]. При кількісному визначенні контрасту можливе використання різних співвідношень екстремальних значень освітленості E_{\max} і E_{\min} , наприклад E_{\max}/E_{\min} , E_{\min}/E_{\max} , $(E_{\max} - E_{\min})/E_{\max}$. Вважаємо, що найбільш доцільно визначати контраст за формулою $(E_{\max} - E_{\min})/(E_{\max} + E_{\min})$. При такому співвідношенні контраст кількісно співпадає з функцією передачі модуляції в теорії сигналів, тобто $K = \Delta E/E_0$ (ΔE – перевищення основного значення освітленості над середнім; E_0 – середнє значення освітленості).

Зазначимо, що перед початком експериментальних досліджень вимірювання геометричних розмірів будь-якого об'єкту необхідно провести налаштування вимірювальної системи. По-перше, визначити світлосигнальну характеристику, за якою визначається діапазон робочих сигналів властивих саме цій системі. Експериментальні дослідження по визначенню світлосигнальної характеристики дозволили встановити, що діапазон робочих сигналів становить 30...120 у. о. По-друге необхідно визначити функцію передачі модуляції властиву вимірювальної системі. Адже функція передачі модуляції пов'язана з якістю визначення границь об'єкту дослідження, а саме з контрастом. Зображенню з максимальним контрастом властива висока роздільна здатність, а саме цей показник дозволяє детально вивчити особливості конструкції й форму об'єкту дослідження [4]. Зауважимо, що жодна з поширених в світовій практиці мір щодо визначення контрасту не може задовольнити всіх поставлених технічних вимог (рис. 3).

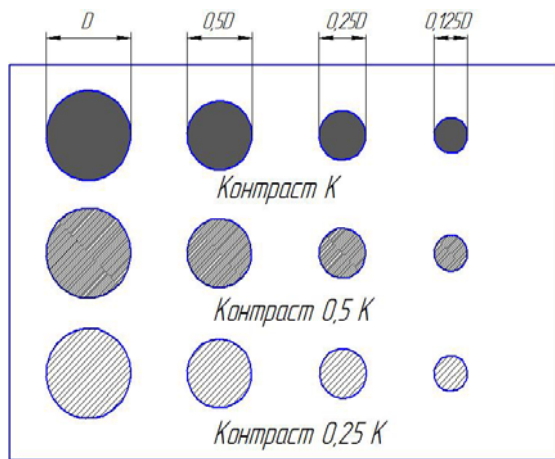


Рис. 3 – Міра для визначення контрасту [4]

Зауважимо, найголовнішими серед цих вимог є забезпечення відповідного діапазону просторових частот, невеликий крок дискретизації та зручність в експлуатації. Від типу мір залежать результати вимірювань. В практиці найчастіше використовують штрихові міри (рис. 4). При експериментальних дослідженнях калібрування інформаційно-вимірювальної системи проводили з застосуванням комплексу штрихових мір ГОСТ 15114-78.

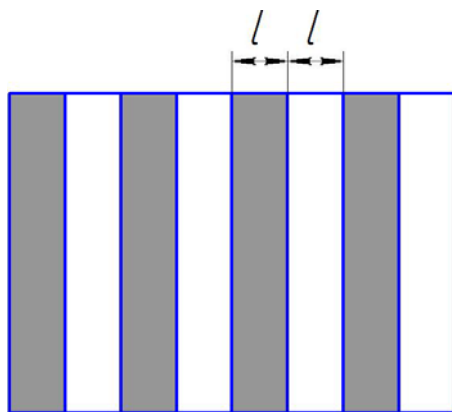


Рис. 4 – Зовнішній вигляд штрихової міри (ГОСТ 15114-78)

Штрихова міра з шириною смуги l розрізняється при заданому значенні контрасту, але це не значить, що за таких умов буде розрізнятися і окремий елемент з характерним розміром l . Тому для дослідження роздільної здатності запропоновано використовувати міру зображену на рис. 2. Вона складається з круглих об'єктів, діаметри яких зменшуються по горизонталі, наприклад, у математичній прогресії із знаменником n , а контраст змінюється за таким же законом по вертикалі. Для кожного значення контрасту буде своя просторово-частотна характеристика, яка і визначатиме роздільну здатність, про що й було сказано раніше. Зокрема, потрібно удосконалювати підходи відповідно до поставлених технічних вимог при кількісному аналізі контрасту зображення об'єкту вимірювання [4, 5].

Освітлення об'єкту інформаційно-вимірювальною системою забезпечує рівномірний і

достатній розподіл світла на поверхні зонду, що розміщується на предметному столику оптичного мікроскопу та надає можливість його переміщення п'єзоелектричним двигуном з кроком 2 мкм в перпендикулярних напрямках щодо оптичної осі мікрооб'єктиву. Мікрооб'єктив формує збільшене зображення на ПЗЗ-матриці відеокамери. Формування вимірювального сигналу відбувається в такій послідовності. Від джерела освітлення (галогенної лампи) з яскравістю $L(\lambda)$ на об'єкт вимірювання надходить енергетичний потік Φ . Після його проходження крізь об'єкт, отримуємо потік $\Phi'(x, y, \lambda)$, що несе інформацію про кожну координату його вимірювальної площини. Інформативний потік Φ' проходить через світлофільтр, на виході з якого отримуємо інформативний потік $\Phi'(x, y, \lambda_1)$, що надходить до об'єктиву ІВС. Одночасно з цим здійснюється формування функції розподілу освітленості матриці $E(\lambda_1)$, яка перетворюється у масив зарядів пікселів $q(\lambda_1)$, формує масив струму $i(\lambda_1)$ в кожному пікселі, утворює матрицю струмів, що надходить до резистору ПЗЗ-матриці і перетворюється у напругу $U(\lambda_1)$. Зазначені перетворення в ПЗЗ-матриці формують аналоговий сигнал, що надходить до плати вводу відеосигналу до персонального комп'ютеру, де він з аналогового перетворюється у цифровий сигнал, пропорційний значенню вхідного вимірювального сигналу [6–8].

Монітор відтворює збільшене зображення мікрооб'єкту на екрані. До характеристик ІВС слід також віднести ефективне лінійне збільшення та роздільну здатність в площині мікрооб'єкту. Збільшення ІВС визначається відношенням розміру зображення предмету на екрані монітора l_m (мм) до розміру самого предмету l_n (мм).

Для обробки зображень зонду було використано програмне забезпечення "OwlEye", інтерфейс якого складається з 5 вікон. Вікно "ПЕРЕГЛЯД" відображає отримане з телевізійної камери зображення в реальному масштабі. Вікно "ВИМІРЮВАННЯ" відображає попередньо оброблене зображення, а також вимірювальні маркери "точка" та "лінія". Вікно "КЕРУВАННЯ" має елементи керування, які стосуються первинної обробки зображення, параметрів його вводу і передачі для подальшого обчислення, а також координати та режим відображення маркерів. Вікно "РЕЗУЛЬТАТИ" відображає виміряні значення сигналів, а також елементи керування для здійснення геометричних обчислень. Вікно "РОЗПОДІЛ" в графічному вигляді відображає розподіл отриманих або обчислених даних у просторі вздовж маркеру "лінія". Використовується для побудови графіків сигналів геометричних розмірів та відношень [8–10].

Результати та обговорення. Проведено дослідження геометричних параметрів вольфрамових зондів АСМ за допомогою ІВС, що дозволила сформувати зображення випромінювання зондів та з допомогою ПЗ "OwlEye" оцінити геометричні розміри дефектів (рис. 5, а, б).

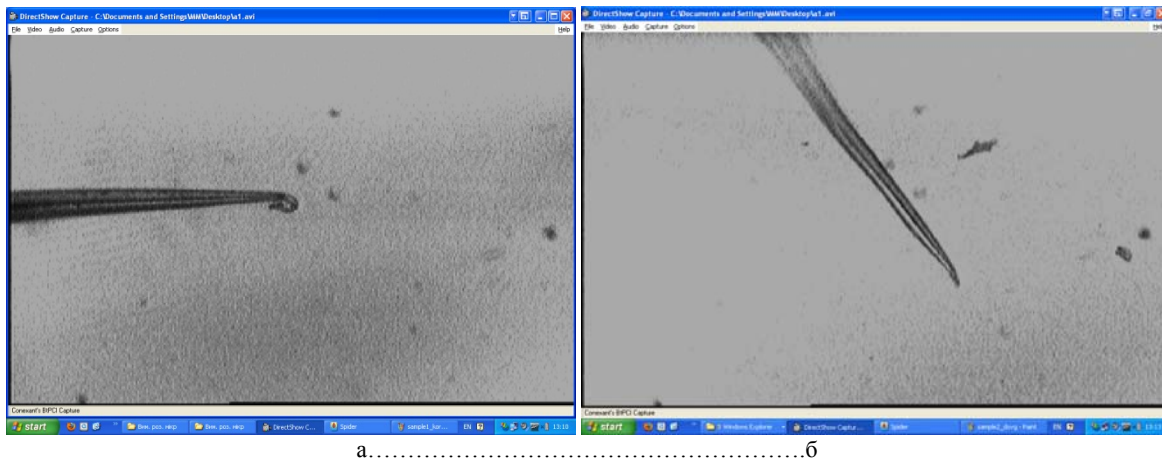


Рис. 5 – Зображення зондів АСМ, які отримані з допомогою ІВС: а – зонд з дефектом; б – зонд без дефекту

Розмір дефекту зонду АСМ становить 3 мкм (рис. 5, а) та не є придатним до застосування в АСМ, а для (рис. 5, б) дефекти знаходяться в допустимих межах 1 мкм, що прописані в технічних вимогах до АСМ 0,5...2 мкм.

Висновки. Основними конструктивними особливостями при побудові інформаційно-виміральної системи для вимірювання геометричних розмірів дефектів зонду АСМ є:

1. Побудова інформаційно-виміральної системи для визначення геометричних розмірів дефектів зонду АСМ, з застосуванням оптичного мікроскопу, передавальної камери типу Novus NVC-130BH та спеціалізованого програмного забезпечення розробленого під конкретну задачу вимірювання.

2. Визначення робочого діапазону сигналів системи за світлосигнальною характеристикою, що встановлюється експериментальним шляхом.

3. Визначення функції передачі модуляції, що пов'язана з якістю визначення границь зонду АСМ.

4. Вимірювання геометричних розмірів дефектів зондів АСМ дало наступні результати по-перше, розмір дефекту зонду АСМ для зразку № 1 становить 3 мкм і він є непридатним для застосування атомно-силовою мікроскопією. По-друге, розмір дефекту зонду АСМ для зразку № 2 становить 1 мкм, що є допустимим за технічними вимогами до АСМ.

Список літератури:

1. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] / В. Л. Миронов. – Нижний Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
2. Giessibl, F. J. Advances in Atomic Force Microscopy [Text] / F. J. Giessibl / Reviews of Modern Physics. – 2003. – No. 75 (3). – P. 949–983. doi: [10.1103/revmodphys.75.949](https://doi.org/10.1103/revmodphys.75.949)
3. Eibl, R. H. Atomic Force Microscopy Measurements of Protein-Ligand Interactions on Living Cells [Text] / R. H. Eibl, V. T. Moy / Protein-Ligand Interactions. – 2005. – P. 439–450. doi: [10.1385/1-59259-912-5.439](https://doi.org/10.1385/1-59259-912-5.439)
4. Маркін, М. О. Особливості визначення контрасту при формуванні зображення телевізійною інформаційно-виміральною системою [Електронний ресурс] / М. О. Маркін, С. М. Кущовий // ФИЗИКА/2. Оптика – 2015 – Режим доступу: http://www.rusnauka.com/22_APSN_2015/Phisica/7_196388.doc.htm
5. Маркін, М. О. Визначення геометричних розмірів мікрооб'єктів за допомогою телевізійних вимірвальних систем [Текст] / М. О. Маркін, О. М. Маркіна, Ю. А. Агінський /

- Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія Приладобудування. – 2013. – № 46. – С. 64–70
6. Маркіна, О. М. Вплив поверхні об'єкта на вимірювання геометричних розмірів цифровою оптичною мікроскопією [Текст] / О. М. Маркіна, О. І. Сингаївська, В. П. Маслов, Н. В. Качур // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/5 (72). – С. 59–64. doi: [10.15587/2313-8416.2014.31948](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.31948)
 7. Маркіна, О. Н. Исследование особенностей использования галогенных ламп JC в телевизионной измерительной системе [Текст] / О. Н. Маркіна // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 5. – С. 6–8.
 8. Маркін, М. О. Оцінка похибки вимірювання геометричних параметрів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірвальних систем [Текст] / М. О. Маркін, О. М. Маркіна // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2009. – № 38. – С. 102–106.
 9. Пат. № 95615, UA. Спосіб визначення геометричних розмірів мікромасштабних прозорих об'єктів. МПК G01N 15/10 [Текст] / Маркіна О. М., Качур Н. В., Маслов В. П.; заявники Маркіна О. М., Качур Н. В., Маслов В. П. – № u 2014 08497, заявл. 25.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. – 4 с.
 10. Порев, В. А. Імовірнісний підхід до визначення роздільної здатності телевізійних засобів контролю [Текст] / В. А. Порев, Г. В. Порев, Р. І. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2002. – № 8. – С. 40–43.

Bibliography (transliterated):

1. Mironov, V. L. (2004). Osnovy skanirujushhej zondovoj mikroskopii. Nizhnij Novgorod: Institut fiziki mikrostruktur, 110.
2. Giessibl, F. J. (2003). Advances in atomic force microscopy. Reviews of Modern Physics, 75 (3), 949–983. doi: [10.1103/revmodphys.75.949](https://doi.org/10.1103/revmodphys.75.949)
3. Eibl, R. H., Moy, V. T. (2005). Atomic Force Microscopy Measurements of Protein-Ligand Interactions on Living Cells. Protein-Ligand Interactions, 439–450. doi: [10.1385/1-59259-912-5.439](https://doi.org/10.1385/1-59259-912-5.439)
4. Markin, M. O., Kushchovyi, S. M. (2015). Osoblyvosti vyznachennia kontrastu pry formuvanni zobrazhennia televiziinoiu informatsiino-vymirualnoiu systemoiu. FYZYKA/2. Optyka, Available at: http://www.rusnauka.com/22_APSN_2015/Phisica/7_196388.doc.htm
5. Markin, M. O., Markina, O. M., Ahinskyi, Iu. A. (2013). Vyznachennia heometrychnykh rozmiriv mikroob'iektiv za dopomohoiu televiziinykh vymirivalnykh system. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seria Pryladobuduvannia, 46, 64–70.
6. Markina, O. M., Synhaivska, O. I., Maslov, V. P., Kachur, N. V. (2014). Vplyv poverkhni ob'iehta na vymiruvannia heometrychnykh rozmiriv tsyfrovoi optychnoi mikroskopii. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (5 (72)), 59–64. doi: [10.15587/2313-8416.2014.31948](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2014.31948)
7. Markina, O. N. (2015). Issledovanie osobennostey ispol'zovaniya galogennykh lamp JC v televizionnoy izmeritel'noy sisteme. Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii, 5, 6–8.

8. Markin, M. O., Markina, O. M. (2009). Otsinka pokhybky vumirivannia heometrychnykh parametrov za dopomohou televiziinykh informatsiino-vumirivvalnykh system. Visnyk NTUU "KPI". Seriya prykladobuduvannia, 38, 102–106.
9. Markina, O. M., Kachur, N. V., Maslov, V. P. (2014). Pat. No. 95615, UA. Sposib vyznachennia heometrychnykh rozmiriv mikromasshtabnykh prozorykh ob'ektiv. MPK G01N 15/10. № u 2014 08497; declared: 25.07.2014; published: 25.12.2014, Bul. No. 24, 4.
10. Poriev, V. A., Poriev, H. V., Kisil, R. I. (2002). Imovimosnyi pidkhd do vyznachennia rozdilnoi zdatnosti televiziinykh zasobiv kontroliu. Metody ta pryklady kontroliu yakosti, 8, 40–43.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Контроль геометричних розмірів зондів для атомно-силової мікроскопії інформаційно-виміральною системою/ М. О. Маркін, О. М. Маркіна, С. М. Кущовий, К. О. Бутенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С90–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Контроль геометрических размеров зондов для атомно-силовой микроскопии информационно-измерительной системой/ М. А. Маркин, О. Н. Маркина, С. М. Кущовый, Е. А. Бутенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.90–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Control of geometric sizes atomic force microscopy probe for information-measuring system/ М. О. Markin, O.M. Markina, S. M. Kushchovyi, K. O. Butenko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.90–94. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Маркін Максим Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; доцент кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: m.markin@kpi.ua.

Маркіна Ольга Миколаївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; асистент кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: o.markina@kpi.ua.

Кущовий Сергій Миколайович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; аспірант кафедри наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Бутенко Катерина Олександрівна – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; аспірант кафедри біоінформатики; пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056; e-mail: katrin.butenko@gmail.com.

Маркин Максим Александрович – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; доцент кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: m.markin@kpi.ua.

Маркина Ольга Николаевна – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; асистент кафедры научных, аналитических и экологических приборов и систем; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: o.markina@kpi.ua.

Кущовый Сергей Николаевич – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; аспірант кафедри научных, аналитических и экологических приборов и систем; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Бутенко Екатерина Александровна – аспирант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; аспірант кафедри биоинформатики; пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056; e-mail: katrin.butenko@gmail.com.

Markin Maksym – PhD, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; associate professor of scientific, analytical and ecological devices and systems; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: m.markin@kpi.ua.

Markina Olha – PhD, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; Assistant Department of Scientific, analytical and ecological devices and systems; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: o.markina@kpi.ua.

Kushchovyi Serhii – graduate student, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; graduate student of scientific, analytical and ecological devices and systems; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: kuschoviysergey@gmail.com.

Butenko Kateryna – graduate student, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky"; graduate student of Department of Bioinformatics; Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056; e-mail: katrin.butenko@gmail.com.

УДК 656.212:681.3

Н. В. МОСКАЛЕЦ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ДОСТУПА

Розглядаються питання побудови методики для якісної і кількісної оцінювання впливу суми дестабілізуючих факторів, що приймають участь у технології просторово-часового доступу при використанні адаптивної антенної решітки на основі залежності показника відношення сигнал/завада+шум (ВСЗШ) від рівня взаємодії направляючого вектора корисного сигналу і векторів напрямку завадових сигналів. Отримана кількісна оцінка зниження відносного нормалізованого показника (ВСЗШ) від коефіцієнта просторової кореляції. Проведено аналіз граничних значень коефіцієнта просторової кореляції. Показані умови впливу коефіцієнта просторової кореляції на швидкість збіжності процесу адаптації алгоритмів управління ААР.

Ключові слова: просторово-часовий доступ, адаптивна антенна решітка, кореляція, вагові коефіцієнти, просторово-часова обробка.

Рассматриваются вопросы построения методики для качественной и количественной оценки влияния суммы дестабилизирующих факторов, участвующих в технологии пространственно-временного доступа с использованием адаптивной антенной решетки на основе зависимости показателя отношения сигнал/помеха+шум от уровня взаимодействия направляющего вектора полезного сигнала и направляющих векторов помеховых сигналов. Получена количественная оценка снижения относительного нормализованного показателя ОСПШ от коэффициента пространственной корреляции. Проведен анализ граничных значений коэффициента пространственной корреляции. Показаны условия влияния коэффициента пространственной корреляции на скорость сходимости процесса адаптации алгоритмов управления ААР.

Ключевые слова: пространственно-временной доступ, адаптивная антенная решетка, корреляция, весовые коэффициенты, пространственно-временная обработка.

The article analyzes the impact of restrictions on the effectiveness of space-time processing techniques in the antenna array during the implementation of space-time access methods. The method of qualitative and quantitative assessing the impact of the sum of the destabilizing factors in the form of restrictions affecting the signal to interference + noise ratio (SINR) is proposed on the basis of calculating the spatial coherence factor (SCF), which represents the value of the scalar product of the vectors of the desired signal and interference signal space.

The estimation of the upper and lower SINR values has been performed using spatial coherence factor in the assumption that the level of the interference signal interfering an SS at the entrance of AAA is significantly greater than the thermal noise power. The estimate of normalized index SINR reduction has been obtained regarding SCF.

The conditions of the influence of the SCF on the rate of convergence of the adaptation process of the control algorithms of the AAA are shown and the analysis of the boundary values of the SCF is carried out, as a result of which the basic approaches to the construction of the AAA have been developed:

The presented of estimating influence implementation methods restricted spatial-time access based on the analysis of AAA characteristics using a SCF is proposed to implement in the presence of two or more interferences.

Keywords: space-time access, adaptive antenna array, correlation, weights, space-time processing.

Введение. В связи с острым дефицитом радиочастотного спектра для обеспечения все расширяющейся популярности мобильных систем (МС), возникла необходимость активного использования пространственно-временных (ПВ) параметров сигналов. К числу активных методов такого использования следует отнести адаптивные методы пространственно-временной обработки (ПВОС) принятых сигналов. Наиболее простой, очевидной реализацией метода организации пространственно-временного доступа (ПВД) может быть использование на базовой станции адаптивной антенной решетки (ААР), реализующей механизм синтеза многолучевой диаграммы направленности в заданных направлениях. В пределах каждого из лепестков ДН можно осуществлять прием сигналов АС, локализованных в выделенном пространстве. Данная схема может быть, реализована с помощью адаптивной антенной решетки.

Задача пространственно-временного доступа (ПВД) с использованием алгоритмов адаптивных антенных решеток (ААР) сводится по сути к пространственной селекции сигналов каждой из абонентских станций (АС) на фоне других АС и прочих излучений, интерпретируемых как помехи приему сигналов данной станции. Важным достоинством данных методов ПВД является то, что все прочие существующие методы многостанционного частотно-временного доступа могут работать независимо от ПВД. Это позволяет задачу синтеза методов ПВД и их анализа проводить независимо от других методов. Более того, применение методов ПВД может осуществляться уже на

существующей базе и на существующих технологиях беспроводных сетей.

Вместе с тем, при реализации ПВД существуют ограничения, связанные в основном с характеристиками ААР и реализуемости алгоритмов адаптивной ПВОС синтезированных по различным критериям. Характеристики ААР зависят не только от алгоритма управления, но и от параметров собственно антенной решетки: числа антенных элементов (АЭ), характеристик направленности (ХН) и поляризационных характеристик АЭ, взаимного влияния АЭ, конфигурации решетки и др. При этом все эти факторы в различной степени приводят к снижению реально достижимого отношения сигнал/ помеха+шум (ОСПШ), а некоторые могут вызывать также и уменьшение скорости сходимости процесса адаптации.

В данной постановке актуальными для исследований остаются вопросы анализа различных воздействующих ограничивающих факторов характеристик ПВОС и оценка её эффективности с учетом рассматриваемых ограничений.

Анализ литературных данных. Большое количество научных работ по адаптивным антенным решеткам посвящены вопросам конструирования [1], оценке параметров взаимной связи между антенными элементами решетки [2], проблемам влияния конструктивных особенностей антенн на пропускную способность [3], разработке алгоритмов обработки сигнала для адаптивного формирования диаграммы направленности [4] и оценки направления прихода сигнала [5].

© Н. В. Москалец. 2016

Наряду, с часто рассматриваемыми в литературе ограничениями обусловленными взаимным влиянием антенных элементов и параметрами антенных устройств, в задачах пространственно-временного доступа представляет интерес анализ эффективности характеристик ААР с учетом ряда ограничений связанных с:

- влиянием начальных условий;
- характеристиками алгоритмов обработки сигналов (МСКО, МОСП);
- условиями многолучевости и рассеяния сигналов;
- степенью пространственной когерентности помех (нормированного коэффициента пространственной корреляции);
- учетом реальной ширины спектра принимаемых сигналов;
- дискретностью управления весовыми коэффициентами пространственного фильтра ААР (квантование весовых коэффициентов) и др.

Все перечисленные факторы снижают эффективность пространственной фильтрации сигналов абонентских станций (АС) в мобильной сети и представляют определенный интерес для детального анализа характеристик ПВД.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка вопросов методики оценки качественного и количественного влияния суммы дестабилизирующих факторов, участвующих в технологии ПВД сводящаяся к зависимости показателя ОСПШ от уровня взаимодействия направляющего вектора полезного сигнала и направляющих векторов помеховых сигналов.

Для выполнения поставленной цели осуществляется решение следующих задач:

- 1) проведение оценки снижения коэффициента пространственной корреляции (КПК), представляющего по сути значение скалярного произведения векторов полезного сигнала и пространству помеховых сигналов;
- 2) оценка степени снижения относительного показателя ОСПШ пропорционально КПК.

Материалы и методы для анализа характеристик ААР с использованием коэффициента пространственной корреляции. Вектор полезного сигнала пришедшего по основному лучу формируемый в ААР:

$$\vec{X}_c(t) = a(t)e^{-j(\omega_0 t + \varphi(t))} \vec{D}_c, \quad (1)$$

где \vec{D}_c – вектор волнового фронта полезного сигнала.

Аналогичным образом выразим вектор V -ой помехи в виде:

$$\vec{X}_{nv}(t) = a_v(t)e^{-j(\omega_0 t + \varphi_v(t))} \vec{D}_{nv}, \quad (2)$$

Будем полагать отсутствие когерентности между полезным сигналом и помехой.

Корреляционную матрицу входных сигналов можно записать в виде [6]:

$$R_{xx} = \sigma_{ui}^2 I + P_c \vec{D}_c^* \vec{D}_c + \sum_{\gamma=1}^L P_\gamma \vec{D}_{n\gamma}^* \vec{D}_{n\gamma}, \quad (3)$$

где σ_{ui}^2 – мощность теплового шума в полосе сигнала; P_c – мощность полезного сигнала; P_γ – мощность V -ой помехи от соседней АС.

Представим фазовые набег Z_i и Z_{nvi} соответственно в виде

$$z_i = \vec{k}_c \cdot \vec{r}_i, \quad (4)$$

$$z_{nvi} = \vec{k}_{nv} \cdot \vec{r}_i^*, \quad (5)$$

где \vec{k}_c – вектор волнового фронта сигнала, \vec{r}_i – вектор координат i -го АЭ.

При использовании критерия минимального среднего квадратического отклонения (МСКО) оптимальное значение вектора весовых коэффициентов (ВВК) будет определяться выражением [6, 7]:

$$\vec{W}_{opt} = R_{xx}^{-1} \vec{R}_{xc}, \quad (6)$$

а для выходного ОСПШ справедливо выражение [8]:

$$\rho = P_c D_c R_{nn}^{-1} \vec{D}_c^* \quad (7)$$

Очевидно, что поскольку масштабирование ВВК не изменяет значение ОСПШ, то выражение (7) справедливо и для критерия максимума отношения сигнал-помеха (МОСП). Поэтому для уменьшения выкладок ограничимся рассмотрением критерия МСКО.

В случае воздействия 1-го сигнала мешающей АС (одной помехи) для оптимального значения ВВК справедливо выражение [7, 8]:

$$\vec{W}_{opt} = k \left\{ \vec{D}_c - \frac{P_1 \vec{D}_c^* \vec{D}_1}{\sigma_{ui}^2 + P_1 \vec{D}_1^* \vec{D}_1} \cdot \vec{D}_1 \right\} \quad (8)$$

где k – скалярный коэффициент.

Используя обозначение $\vec{D}_i^* \vec{D}_j = \delta_{ij}$, получим

$$\vec{W}_{opt} = \gamma \left\{ \vec{D}_c - \frac{P_1 \delta_{c1}}{\sigma_{ui}^2 + P_1 \delta_{11}} \vec{D}_1 \right\} \quad (9)$$

Выражение для выходного ОСПШ, с учетом выражений (7) и (9), выглядит следующим образом:

$$\rho = \frac{P_c \delta_{cc}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - \frac{P_1 |\delta_{c1}|^2}{(\sigma_{ui}^2 + P_1 \delta_{11}) \delta_{cc}} \right\} \quad (10)$$

Величина δ_{c1} представляет собой скалярное произведение векторов \vec{D}_c и \vec{D}_1 . Абсолютное значение величины δ_{c1} можно представить соотношением:

$$|\delta_{c1}| = |\vec{D}_1| |\vec{D}_c| \cos \xi = \sqrt{\delta_{11}} \sqrt{\delta_{cc}} \cos \xi, \quad (11)$$

где ξ – обобщенный угол между \vec{D}_c и \vec{D}_1 в комплексном векторном пространстве;

$$|\vec{D}_1| = \sqrt{\vec{D}_1^+ \vec{D}_1} = \sqrt{\delta_{11}};$$

$$|\vec{D}_c| = \sqrt{\vec{D}_c^+ \vec{D}_c} = \sqrt{\delta_{cc}}.$$

Введем обозначение нормированного коэффициента пространственной корреляции (КПК) между направляющими векторами сигнала D_c и помехи D_n .

Очевидно КПК однозначно определяется через $\cos \xi$:

$$\gamma_{ij} = \frac{\vec{D}_i \vec{D}_j}{|\vec{D}_i| |\vec{D}_j|} = \frac{\delta_{ij}}{\sqrt{\delta_{ij}} \sqrt{\delta_{jj}}}, \quad (12)$$

где $i, j = c = 1, 2, \dots, n$.

Тогда выражение для ОСПШ на входе можно представить в виде

$$\rho = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - \frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2 + P_{n\Sigma}} |\gamma_{1c}|^2 \right\}, \quad (13)$$

где

$$P_{\Sigma c} = P_c \sum_{i=1}^m |A_c^i|^2 \quad (14)$$

$$P_{n\Sigma} = P_1 \sum_{i=1}^m |A_{n1}^i|^2 \quad (15)$$

где A_c^i и A_{n1}^i – определяются соответственно выражениями:

$$A_c^i = \vec{E}_i(\theta, \Psi_c) \vec{e}_c; \quad (16)$$

$$A_{n1}^i = \vec{E}_i(\theta_v, \Psi_v) \vec{e}_v, \quad (17)$$

где $\vec{E}_i(\theta, \Psi_c)$ – векторная характеристика направленности i -го АЭ по напряженности электрического поля; \vec{e}_c – единичный вектор поляризации входящей волны.

Проведем оценку нижнего и верхнего значения ОСПШ используя выражения (13). Очевидно, что максимальное значение ОСПШ имеет вид

$$\rho_{\max} = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2}. \quad (18)$$

Когда помеха подавлена до нуля и КПК $\gamma_{1c} = 0$ будет достигнуто максимальное значение ОСПШ. Максимальное ОСПШ не зависит от местоположения АЭ и источника помех, а определяется ХН АЭ и поляризацией полезного сигнала, как это можно видеть из выражения (18). При этих условиях оптимальный ВВК имеет вид

$$\vec{W}_{opt} = n \vec{D}_c^+ \quad (19)$$

Следовательно, если АЭ идентичны и одинаково ориентированы, т.е. все A_c^i одинаковы, то на выходах всех АЭ полезный сигнал находится в фазе и когерентно суммируется, как в обычной фазированной антенной решетке (ФАР). Когда же A_c^i различны, ОСПШ снижается несмотря на то что полезный сигнал по прежнему будет когерентно суммироваться. Различие значений A_c^i может оказаться результатом воздействий окружающей обстановки (мачты, крыши и др.).

Для оценки нижнего значения ОСПШ будем полагать, что уровень сигнала помехи, т.е. мешающей АС на входе ААР значительно больше мощности теплового шума

$$P_{n\Sigma} \gg \sigma_{ui}^2, \quad (20)$$

тогда выражение (13) упрощается и принимает вид

$$\rho = \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - |\gamma_{1c}|^2 \right\}, \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что ОСПШ на выходе ААР зависит только от ρ_{\max} и $|\gamma_{1c}|$ и не зависит от мощности помех.

При этом нижнее значение ОСПШ определяется выражением (21). Используя выражения (18), (21) получим

$$\frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \left\{ 1 - |\gamma_{1c}|^2 \right\} < \rho \leq \frac{P_{\Sigma c}}{\sigma_{ui}^2} \quad (22)$$

Результаты исследования нормированного показателя эффективности ОСПШ от КПК. Зависимости нормализованного значения ОСПШ от $|\gamma_{1c}|$ показаны на рис. 1. Нормализованное значение ОСПШ

$$\rho_n = \frac{\rho}{\rho_{\max}} \quad \text{изменяется в пределах } [1 - |\gamma_{1c}|^2].$$

Как следует из анализа зависимостей представленных на рис. 1 в общем случае при малых значениях

$\frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2}$ ОСПШ приближается к верхней границе, а при

больших значениях $\frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2}$ – к нижней.

Вместе с тем при $|\gamma_{1c}| \ll 1$, независимо от значения

$\frac{P_{n\Sigma}}{\sigma_{ui}^2}$ ОСПШ всегда приближается к верхней границе. Из этого следует, что уменьшая значение

КПК $|\gamma_{1c}|$ можно значительно улучшить характеристики ААР в установленном режиме.

Рассмотренный подход к оценке характеристик ААР на основе использования КПК можно использовать при наличии двух и более помех [7]. В этих условиях в качестве КПК выступает обобщенный

угол между \vec{D}_c и гиперплоскостью, образованной векторами $\vec{D}_{n1}, \vec{D}_{n2}, \dots, \vec{D}_{nn}$.

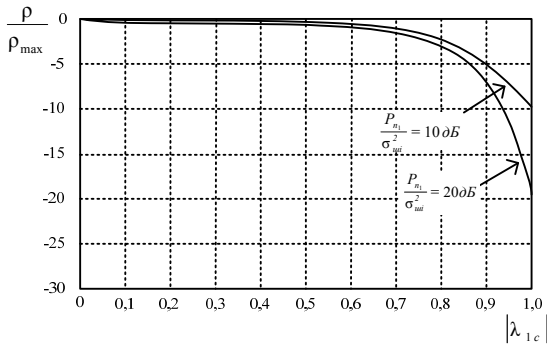


Рис. 1 – График снижения зависимости ОСПШ от коэффициента пространственной корреляции

Следует отметить, что в общем случае КПК зависят от следующих факторов:

- угла прихода полезного сигнала и помехи;
- ориентации и расположение АЭ в решетке;
- характеристики направленности АЭ;
- поляризации полезного сигнала и помех.

Для уменьшения КПК, при конструировании АР, необходимо должным образом подбирать конфигурацию решетки, тип и ориентацию АЭ. Важно отметить, что КПК оказывают влияние не только на выходное ОСПШ, но в ряде случаев и на скорость сходимости процесса адаптации алгоритмов управления ААР, синхронизируемых на основе градиентного метода [9]. Это вызвано тем, что скорость сходимости алгоритмов основанных на градиентном методе зависит от обусловленности корреляционной матрицы входных сигналов. Обусловленность же корреляционной матрицы в свою очередь зависит от КПК.

В случае когда на вход N -элементной ААР воздействуют полезный сигнал и одна мощная помеха можно показать, что собственные значения корреляционной матрицы могут быть определены [8]:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sigma_{wi}^2 + \frac{1}{2}(P_{\Sigma c} + P_{\Sigma n}) + \frac{1}{2}\sqrt{(P_{\Sigma c} - P_{\Sigma n})^2 + 4P_{\Sigma c}P_{\Sigma n}|\gamma_{1c}|^2} \\ \beta_2 &= \sigma_{wi}^2 + \frac{1}{2}(P_{\Sigma c} + P_{\Sigma n}) - \frac{1}{2}\sqrt{(P_{\Sigma c} - P_{\Sigma n})^2 + 4P_{\Sigma c}P_{\Sigma n}|\gamma_{1c}|^2} \\ \beta_i &= \sigma_{wi}^2, i = 3, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Тогда, если $|\gamma_{1c}| = 1$ имеем

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sigma_{wi}^2 + P_{\Sigma c} + P_{\Sigma n} \\ \beta_2 &= \sigma_{wi}^2 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Вместе с тем, когда $|\gamma_{1c}| = 0$ получим

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sigma_{wi}^2 + P_{\Sigma n} \\ \beta_2 &= \sigma_{wi}^2 + P_c \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Следовательно, что когда $P_c \gg \sigma_{wi}^2$ скорость сходимости процесса адаптации при $|\gamma_{1c}| = 0$ оказывается существенно выше, чем при $|\gamma_{1c}| = 1$, при выполнении равенства

$$\vec{D}_1 = s\vec{D}_c, \quad (24)$$

где s – комплексный скаляр.

В свою очередь (24) удовлетворяется при выполнении следующих условий [8]:

$$\left. \begin{aligned} |A_c^i| &= s_1 |A_{n1}^i|, \\ \left(\arctg\left(\frac{\text{Im}\{A_c^i\}}{\text{Re}\{A_c^i\}}\right) - \arctg\left(\frac{\text{Im}\{A_{n1}^i\}}{\text{Re}\{A_{n1}^i\}}\right) - (\bar{k}_c - \bar{k}_{n1})r_i \right) &= 2\pi s_2 \\ i &= 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где s_1 и s_2 – вещественные константы.

Из анализа представленных условий (25) следует:

1. Для всех АЭ отношения между коэффициентами усиления сигнала и помехи должно быть одинаково.

2. Разность фаз между сигналом и помехой, а также фазовые различия между A_c^i и A_{n1}^i , обусловленные местоположением элемента, должна быть постоянной с точностью до 2π (требование о плоскости фазового фронта полезного сигнала и помех).

Обсуждение результатов исследования. Когда $|\gamma_{1c}| = 1$ описываемая ситуация представляется в виде ААР состоящей использования в ААР двух изотропных и невзаимодействующих АЭ, разнесенных в пространстве на $d = \frac{\lambda_c}{2}$ с углами прихода сигнала и помехи относительно нормали к линии расположения АЭ соответственно $\theta_c = -90^\circ$, $\theta_n = 90^\circ$.

Будем полагать также, что поляризация электромагнитных волн сигнала и помехи одинакова. ААР может или максимизировать или подавлять помехи, но вместе с тем не может достигать этого одновременно.

При $|\gamma_{1c}| = 0$, когда межэлементное расстояния $d = \frac{\lambda_c}{4}$, решетка способна одновременно максимизировать полезный сигнал и полностью подавлять помеху.

Если не выполняются условия (25) нетрудно показать, что при $d = \frac{\lambda_c}{2}$ $|\gamma_{1c}| = 0,8$ и в данном случае ААР может полностью подавить помеху и частично полезный сигнал. За счет использования разнотипных АЭ, так и за счет различной ориентации идентичных элементов могут быть получены различные характери-

стики направленности АЭ. В случае априорно точной известной информации об углах прихода сигналов и помех ААР можно было бы построить таким образом, чтобы практически исключить случай $|\gamma_{ic}|=1$. Вместе с тем такой информации нет и при построении решетки необходимо стремиться к ситуации, когда $|\gamma_{ic}|=1$, $i=1,2,\dots,N$ были бы достаточно небольшими для широкого сектора углов прихода помех.

Проанализировав данные варианты сценариев можно предложить следующие подходы к построению ААР:

- использование нерегулярного размещения АЭ в решетке (неэквидистантные решетки);
- использование АЭ с различной ХН;
- использование различной ориентации идентичных АЭ.

Первый подход дает возможность ААР осуществлять поляризационно-временную обработку сигналов, т.е. различать сигналы и помехи по их поляризации.

Последние два подхода неизбежно уменьшат потенциально достижимое ОСПШ, но вместе с тем, данное уменьшение максимального ОСПШ является вполне допустимым, поскольку это значительно снижает вероятность ситуаций, при которых $|\gamma_{ic}|=1$.

Выводы

1. Эффективность методов ПВД непосредственно определяется качеством алгоритмов пространственно-временной обработки. Факторами влияния является: процедуры управления ВВК, число и свойства АЭ, конфигурация антенной решетки, наличие взаимных влияний между АЭ и влияния окружающих предметов (мачты, крыши и др.), многолучевость принимаемых сигналов. Число мешающих сигналов других АС при обработке данной АС, широкополосность самих информационных сигналов и др. Все указанные факторы в различной степени негативно влияют на качество ПВД. Ряд из этих дестабилизирующих факторов следует учитывать при анализе, влияния других удается минимизировать за счет различных компенсационных методов.

2. Разработана методика оценки качественного и количественного влияния суммы дестабилизирующих факторов, участвующих в технологии ПВД сводящаяся к зависимости показателя ОСПШ от уровня взаимодействия направляющего вектора полезного сигнала и направляющих векторов помеховых сигналов. В идеальной обстановке вектор полезного сигнала ортогонален пространству помеховых сигналов. В реальности эта ортогональность нарушается. Количественно это нарушение выражается в снижении коэффициента пространственной корреляции, представляющего по сути значение скалярного произведения указанных векторов, и относительный показатель ОСПШ, который снижается пропорционально КПК.

3. Имеется ряд дестабилизирующих факторов поддающиеся контролю и которые относительно просто можно учесть при проектировании мобильной системы с ПВД. К числу таких относятся:

- выбор межэлементного расстояния АЭ следует устанавливать $d = \lambda/2$, что исключает появление интерференционных решеточных нулей;
- во всех АЭ следует выбирать идентичные характеристики;
- разность фаз между векторами сигнала и помех должна быть постоянной (требования о плоскости фазового фронта полезного сигнала и помех).

Список литературы:

1. Bellofiore, S. Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1. Overview and antenna design [Text] / S. Bellofiore, C. A. Balanis, J. Foutz, A. S. Spanias // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2002. – № 44 (3). – P. 145–154. doi: [10.1109/map.2002.1039395](https://doi.org/10.1109/map.2002.1039395)
2. Hult, T. The Effect of Mutual Coupling on a High Altitude Platform Diversity System Using Compact Antenna Arrays [Text] / T. Hult, A. Mohammed // International Journal of Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 2010. – P. 1–7. doi: [10.1155/2010/492915](https://doi.org/10.1155/2010/492915)
3. Bellofiore, S. Smart-antenna system for mobile communication networks. Part 2. Beamforming and network throughput [Text] / S. Bellofiore, J. Foutz, C. A. Balanis, A. S. Spanias, // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2002. – № 44 (4). – P. 106–114. doi: [10.1109/map.2002.1043158](https://doi.org/10.1109/map.2002.1043158)
4. Arce, A. Design of Beam-Forming Networks for Multibeam Antenna Arrays Using Coherently Radiating Periodic Structures [Text] / A. Arce, D. H. Covarrubias, M. A. Panduro, L. A. Garza // Journal of Applied Research and Technology. – 2012. – Vol. 10, № 1. – P. 48–56.
5. Zeng, W. J. Direction-of-arrival estimation based on spatial-temporal statistics without knowing the source number [Text] / W. J. Zeng, X. L. Li, H. C. So // Signal Processing. – 2013. – Vol. 93. – № 12. – P. 3479–3486. doi: [10.1016/j.sigpro.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.05.017)
6. Монзинго, Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию [Текст] / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – Москва: Радио и связь, 1986. – 448 с.
7. Марчук, Л. А. Пространственно-временная обработка сигналов в линиях радиосвязи [Текст] / Л. А. Марчук. – Ленинград: ВАС, 1991. – 136 с.
8. Lin, H. C. Correction to “Spatial Correlations in Adaptive Arrays.” [Text] / H. C. Lin // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1982. – Vol. 30, № 6. – P. 1268–1268. doi: [10.1109/tap.1982.1142929](https://doi.org/10.1109/tap.1982.1142929)
9. Popovskij, V. Control and Adaptation in Telecommunication Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, [Text] / V. Popovskij, A. Barkalov, L. Titarenko. – Springer Berlin Heidelberg, 2011. – 173 p. doi: [10.1007/978-3-642-20614-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20614-6)
10. Kosterev, M. Development of fuzzy statistical method of optimal resource allocation among technical departments of an electric utility company [Text] / M. Kosterev, V. Litvinov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 3/4 (81). – P. 20–27. doi: [10.15587/1729-4061.2016.70522](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70522)

Bibliography (transliterated):

1. Bellofiore, S., Balanis, C. A., Foutz, J., Spanias, A. S. (2002). Smart-antenna systems for mobile communication networks. Part 1. Overview and antenna design. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 44 (3), 145–154. doi: [10.1109/map.2002.1039395](https://doi.org/10.1109/map.2002.1039395)
2. Hult, T., Mohammed, A. (2010). The Effect of Mutual Coupling on a High Altitude Platform Diversity System Using Compact Antenna Arrays. International Journal of Antennas and Propagation, 2010, 1–7. doi: [10.1155/2010/492915](https://doi.org/10.1155/2010/492915)
3. Bellofiore, S., Foutz, J., Balanis, C. A., Spanias, A. S. (2002). Smart-antenna system for mobile communication networks. Part 2. Beamforming and network throughput. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 44 (4), 106–114. doi: [10.1109/map.2002.1043158](https://doi.org/10.1109/map.2002.1043158)
4. Arce, A., Covarrubias, D. H., Panduro, M. A., Garza, L. A. (2012). Design of Beam-Forming Networks for Multibeam Antenna Arrays Using Coherently Radiating Periodic Structures. Journal of Applied Research and Technology, 10 (1), 48–56.
5. Zeng, W. J., Li, X. L., So, H. C. (2013). Direction-of-arrival estimation based on spatial-temporal statistics without knowing the source number. Signal Processing, 93 (12), 3479–3486. doi: [10.1016/j.sigpro.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.05.017)

6. Monzingo, R. A., Miller, T. U. (1986). *Adaptivnye antennnye reshetki. Vvedenie v teoriju*. Moskva: Radio i svjaz', 44
7. Marchuk, L. A. (1991). *Prostranstvenno-vremennaja obrabotka signalov v linijah radiosvjazi*. Leningrad: VAS, 136.
8. Lin, H. C. (1982). Correction to "Spatial Correlations in Adaptive Arrays." *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30 (6), 1268–1268. doi: [10.1109/tap.1982.1142929](https://doi.org/10.1109/tap.1982.1142929)
9. Popovskij, V., Barkalov, A., Titarenko, L. (2011). Control and Adaptation in Telecommunication Systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, 173. doi: [10.1007/978-3-642-20614-6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20614-6)
10. Kosterev, M., Litvinov, V. (2016). Development of fuzzy statistical method of optimal resource allocation among technical departments of an electric utility company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(4(81)), 20–27. doi: [10.15587/1729-4061.2016.70522](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.70522)

Надійшла (received) 10.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз впливу обмежень при реалізації методів просторово-часового доступу/ М. В. Москалець// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.95–100. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Анализ влияния ограничений при реализации методов пространственно-временного доступа/ Н. В. Москалец// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.95–100. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Analysis of influence implementation methods restricted spatial-time access/ M. V. Moskalets// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 50 (1222). – P.95–100. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Москалець Микола Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії, пр-т Науки, 14, м Харків, Україна, 61166; е-пошта: moskalets1@yandex.ua

Москалец Николай Вадимович – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии, пр-т Науки, 14, г. Харьков, Украина, 61166; e-mail: moskalets1@yandex.ua

Moskalets Mykola Vadymovych – candidate of technical sciences, associate professor, Kharkov National University of Radioelectronics, associate professor of the department of infocommunication engineering, avenue of Science, 14, Kharkov, Ukraine, 61166; e-mail: moskalets1@yandex.ua

УДК 004.891.3

О. Є. ІЛАРІОНОВ, Н. М. ІЛАРІОНОВА, П. М. СОРОКА

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ СВДЧЕНЬ У АДАПТИВНИХ КУРСАХ КОРПОРАТИВНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Розглянуто перспективи застосування окремих математичних інструментів для адаптації курсів у корпоративних системах дистанційного навчання. Ідентифіковано особливості корпоративних систем дистанційного навчання – характеристики осіб, що навчаються, характеристики навчальних курсів та показники ефективності. Показано, що адаптація дистанційних курсів у таких системах повинна відбуватися передусім на основі аналізу компетенцій. Компетенції визначаються в результаті тестування та аналізу результатів тесту за допомогою теорії свідчень Демпстера-Шафера. Подальша адаптація курсів відбувається за допомогою моделі генерації контенту на основі компетенцій.

Ключові слова: теорія Демпстера-Шафера, навчальний профіль, адаптивні моделі, корпоративне дистанційне навчання, компетенції.

Рассмотрено перспективы использования отдельных математических инструментов для адаптации курсов в корпоративных системах дистанционного образования. Идентифицированы особенности корпоративных систем дистанционного образования – характеристики учащихся, характеристики учебных курсов и показатели эффективности. Показано, что адаптация дистанционных курсов в таких системах должна происходить прежде всего на основе анализа компетенций. Компетенции определяются в результате тестирования и анализа результатов теста при помощи теории свидетельств Демпстера-Шафера. Последующая адаптация курсов происходит при помощи модели генерации контента на основе компетенций.

Ключевые слова: теория Демпстера-Шафера, учебный профиль, адаптивные модели, корпоративное дистанционное образование, компетенции.

Perspectives to use some mathematical instruments to adapt e-learning courses in corporate area are considered. Analysis of corporate e-learning systems showed that the level of prior knowledge, skills, and abilities (competencies) of learners is one of the most important criteria effectiveness of education and should serve as a basis for courses customization. Pretest can be conducted using multiple choice questions where there is a relationship between questions and concepts, and this relationship has weights. The evidences obtained from pretest are combined using Dempster's combination rule to find the real level of competences of the learner. These values are used as an input in competency-based content generation model. The approach offered by the authors is not free of the drawbacks. First, any tests are associated with errors and mistakes. Also, there is a need of fuzzification of intervals obtained from evidence combinations. Content generation model requires a lot of learning objects that together with input profile might lead to issues with finding the optimal decision. Also, teachers should invest a lot of efforts to create appropriate test questions and learning objects.

Keywords: Dempster-Shafer theory, learning profile, adaptive models, corporate e-learning, competencies.

© О. Є. Іларіонов, Н. М. Іларіонова, П. М. Сорока. 2016

Вступ. На сьогодні існує значна кількість наукових праць, присвячених проблемі адаптації навчального матеріалу до навчального профілю осіб, що навчаються [1]. Особливо актуальним це питання стало у сфері дистанційного навчання, як відповідь на один із признаних недоліків цього виду навчання, що полягає у відсутності безпосереднього контакту із викладачем і, відповідно, можливості оперативної змінювати контент, його подачу, та взаємодію між різними учасниками навчального процесу у залежності від потреб слухачів.

Серед систем дистанційного навчання окреме місце займають корпоративні системи, до яких ставляться досить жорсткі умови щодо їх ефективності. Тому дистанційні курси повинні якомога повно адаптуватися під специфічні швидкозмінні потреби як компанії, так і осіб, що навчаються. Адже цільовою аудиторією корпоративних систем дистанційного навчання є дорослі особи з дуже різними потребами та характеристиками, найбільш вагомими з яких є попередній досвід і знання (компетентності, що формуються з різних предметних областей), навчальні цілі, стилі навчання (які класифікуються у відповідності до різних педагогічних теорій), мотивація, когнітивні характеристики та ін. [1]. Персоналізація дистанційного навчання передбачає визначення цих потреб та характеристик і подальшу адаптацію контенту (його типу і форми подачі), навігації та взаємодії [2]. При цьому виникає проблема занадто великої кількості комбінацій характеристик і, відповідно педагогічних сценаріїв [2].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Особи, що навчаються дистанційно, поряд із загальноновизнаними перевагами та недоліками такого виду навчання, часто зазначають також низьку гнучкість, відсутність персоналізації та пристосування до їх потреб [3]. Тому все більшого поширення набувають адаптивні системи, під якими розуміють автономні інтерактивні системи, що пристосовують свою поведінку та функціональність до змін середовища. У дистанційному навчанні, адаптивні системи навчання змінюються у відповідь на зміни інтересів, знань та цілей осіб, що навчаються [4]. Перелік критеріїв, за якими може відбуватися адаптація, є досить широким: мета отримання інформації; рівень знань особи, що навчається; цілі навчання; яким засобом передачі інформації надаються переваги; стиль навчання, що визначається за різними моделями (модель Колба, модель Хані-Мамфорда, модель Фельдера-Сільвермана, модель Ла Гарандері [1], модель Майерс-Брігс [5] та ін.); групова динаміка; рівень мотивації; стиль навігації; когнітивні характеристики; педагогічні підходи та ін. Одне із останніх досліджень [6] показало, що навчальні стилі вважаються більш важливим критерієм адаптації навчальних курсів, ніж попередні знання.

Адаптація навчального середовища передбачає чітку організацію та детальний опис процесів у рамках трьох моделей: моделі предмету вивчення; моделі особи, що навчається; та моделі адаптації, у тому числі адаптації передачі контенту та взаємодії з особою, що навчається [7]. При цьому адаптація навчального процесу може бути розділена на чотири елементи [8]: адаптивний контент, адаптивна подача контенту, ада-

птивна навігація, та адаптивна взаємодія. Ефективність адаптивної навчальної системи значною мірою визначається тим, яка методологія використана для збору та аналізу інформації, що стосується навчальних цілей та характеристик осіб, що навчаються, а також наскільки добре ця інформація оброблена і формує адаптивну та інтелектуальну навчальну систему. Основні технології адаптації досліджені в [4], до них відносяться: машинне навчання та м'які обчислення, семантика та онтологія, гібридні технології, програмні додатки, та інші інноваційні технології. Значного поширення здобули такі технології штучного інтелекту як нечітка логіка, Байєсові мережі, нейронні мережі, та приховані Марковські моделі [9]. Ці технології застосовуються з метою детектування та зменшення проблем у осіб, що навчаються (наприклад, при взаємодії з навчальною системою учні втомлюються, розсіюється увага тощо); встановлення навчальних стилів; подання контенту; змін у навігації по сайту, тощо [4].

При цьому переважна більшість досліджень проводилася для осіб, що навчаються на бакалаврських програмах, тому перелік критеріїв адаптації підходить передусім для цих студентів. Робіт, присвячених моделюванню дистанційного навчального середовища для дорослих слухачів не так багато. Серед них слід відмітити працю [10], в якій запропоновано таксономію характеристик дорослих осіб, що навчаються: персональні характеристики, когнітивні характеристики, соціальні характеристики, попередні знання та досвід, персональні риси характеру, в тому числі стиль навчання, та емоційний стан. При цьому попередні знання та досвід (отримані у результаті професійної діяльності, життєвого досвіду, та формального навчання) є одним із найважливіших критеріїв для побудови ефективних адаптивних корпоративних систем навчання. Саме тому існує потреба у ідентифікації основних характерних особливостей корпоративних систем навчання, що, в свою чергу, визначають вимоги до характеристик адаптації, та обґрунтуванні і розробці ефективних, доступних та швидких інструментів адаптації.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є обґрунтування та розробка моделі застосування окремих математичних інструментів для адаптації курсів у корпоративних системах дистанційного навчання. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні завдання: ідентифікувати основні характерні особливості корпоративних систем навчання; сформулювати вимоги до адаптації корпоративних систем навчання; обґрунтувати вибір математичних інструментів для адаптації курсів; створити модель адаптації на основі обраного математичного інструменту.

Дослідження можливості застосування теорії свідчень у адаптивних курсах корпоративних систем дистанційного навчання. Корпоративне дистанційне навчання розвивається надзвичайно швидкими темпами. Ця тенденція спостерігається не лише за кордоном, а і в Україні. Так, за прогнозами компанії Technavio, у 2020 році світовий ринок корпоративного дистанційного навчання становитиме понад 31 млрд. дол. США завдяки середньорічному зростанню у понад 11% [11]. Підприємства, як великі, так і малі, розглядають дистанційне навчання як ефективне рішення

бюджетних обмежень і потреби підвищення продуктивності, адже зміна середовища ведення бізнесу та розвиток технологій сприяють запровадженню дистанційного навчання на заміну традиційним методам навчання. З іншого боку, все більше працівників усвідомлюють необхідність самоосвіти. Корпоративні системи дистанційного навчання відрізняються, передусім, за наступними ознаками (рис. 1):

1. Навчаються дорослі люди з дуже різними попередніми знаннями, мотивацією, досвідом. Компетенції (які ми визначаємо як сукупність навичок, знань, завдань та результатів навчання [12], що проявляються у реальній або близькій до реальної ситуації) таких

осіб дуже важко перевірити за допомогою звичайних тестів, адже ці компетенції сформовані у результаті дії значної кількості різноманітних факторів – робочого досвіду, життєвого досвіду та формального навчання. Для досягнення дорослими студентами так званого навчального потоку (стан зосередження, повного залучення і націленості на успіх [13]) та навчальних результатів найбільш важливими факторами є те, наскільки корисними вважаються знання / навички, які будуть отримані в результаті навчання та легкість використання системи [14]. Крім того, модель дорослих учнів повинна враховувати значну кількість критеріїв, про які вже йшла мова вище.



Рис. 1 – Характерні особливості корпоративних систем дистанційного навчання

2. Навчальні курси дуже практично орієнтовані, спрямовані на відпрацювання конкретних компетенцій, короткотермінові, мають вузьку предметну область та ін.

3. Показники ефективності системи – вклад результатів навчання у досягнення компанією стратегічних цілей, підвищення продуктивності, час, що витрачається на проходження курсу, окупність вкладень та ін.

Саме тому дистанційні курси у корпоративних системах дистанційного навчання повинні враховувати компетентнісний підхід та ефективно адаптуватися до потреб цільової аудиторії.

Підхід до побудови адаптивної системи дистанційного навчання на основі компетенцій та засобів штучного інтелекту запропоновано у роботі [15] – модель генерування контенту на основі компетенцій. Ця модель передбачає, що весь навчальний матеріал зберігається у вигляді навчальних об'єктів, що пов'язані з компетенціями, при цьому розрізняються вхідні та вихідні компетенції. Модель дозволяє за заданими наборами вхідних та вихідних компетенцій здійснити автоматичний відбір навчальних об'єктів і організувати їх у вигляді деревовидної структури, адаптованої під кожну особу, що навчається. Вхідний профіль особи, що навчається, будується на основі аналізу наявних компетенцій. Враховуючи значну кількість факторів, що впливають на побудову моделі особи, що навчається на корпоративних дистанційних курсах, виникає необхідність також і в пошуку ефективного способу зменшення кількості можливих навчальних профілів і необхідних педагогічних сценарі-

їв. До таких методів відноситься анкетування для визначення психологічних характеристик і стилю навчання та попереднє тестування для визначення наявних знань (компетенцій). Як уже зазначалося вище, для корпоративних дистанційних курсів саме наявні компетенції є одним із основних критеріїв, на основі якого доцільно здійснювати адаптацію курсів. На практиці, це відбувається або за допомогою співбесіди (яка часто дає дуже великий відсоток розбіжностей між оцінками різних експертів [10]), або за допомогою тестування з визначенням мінімального відсотку набраних балів. Так, автори в [16] пропонують проводити первинне тестування для визначення рівня знань у користувача за даною темою. При цьому відбувається поділ тем на дві множини – теми, які користувач не знає взагалі і теми, які користувач або знає достатньо, або повністю для того, щоб вивчати наступні теми. Але жоден з описаних вище підходів до попереднього тестування не відображає повну картину володіння компетенціями, адже ні загальна кількість балів, ні рівень знань окремих тем (які містять різні одиниці предметних областей) не показує, які саме одиниці предметних областей знає особа і наскільки добре вона володіє цими компетенціями.

На сьогодні оцінювання результатів тестування проводиться за допомогою різноманітних математичних апаратів, серед яких найбільше поширення мають інструменти класичної моделі та моделі прихованих факторів (Item Response Theory), що використовує модель Г. Раша та моделі Бірнбаума [17]. В класичній теорії результати тестування залежать від складності

завдань, а складність завдань – від вибірки осіб, що тестуються. У методах моделі прихованих факторів підсумковий бал визначається як результат сукупної взаємодії прихованих параметрів, а саме істинного рівня підготовки осіб і складності завдань. Сучасна теорія прихованих факторів основана на теорії латентно-структурного аналізу – одного з основних методів, застосовуючи який можна визначити латентну ознаку, тобто визначити рівень здібностей особи на основі розроблених тестових завдань, різних за рівнем складності, що визначається емпіричним шляхом в ході тестування. При цьому вважається, що відповіді особи не залежать одна від одної, а ймовірність того, що при проходженні тесту особа дасть конкретну послідовність відповідей, дорівнює добутку ймовірностей відповідей на окремі запитання [17]. Також виходять з того, що знання одновимірні (один тест – один фактор – тест на інтелект) і два класи латентних параметрів,

від яких залежить ймовірність правильної відповіді на тестове завдання, – рівень підготовки особи і рівень складності завдання [17]. Але при цьому не враховуються перехресні знання (компетенції), які формуються з різних предметних областей, що є характерним для дорослих учнів.

Тому для побудови адекватних тестових питань та аналізу їх результатів можна застосувати теорію Демпстера-Шафера [18], яка дозволяє визначити ймовірність події (рівень знань) з урахуванням ступеню довіри, комбінуючи окремі докази (правильність відповідей на різні тестові запитання, які з різною вагою перевіряють знання різних одиниць предметної області). Тестові завдання вхідного тесту формулюються таким чином, щоб експерт (викладач) мав можливість пов'язати зміст питань з декількома одиницями предметних областей (поняттями, концепціями) за допомогою вагових коефіцієнтів [2] (рис. 2).

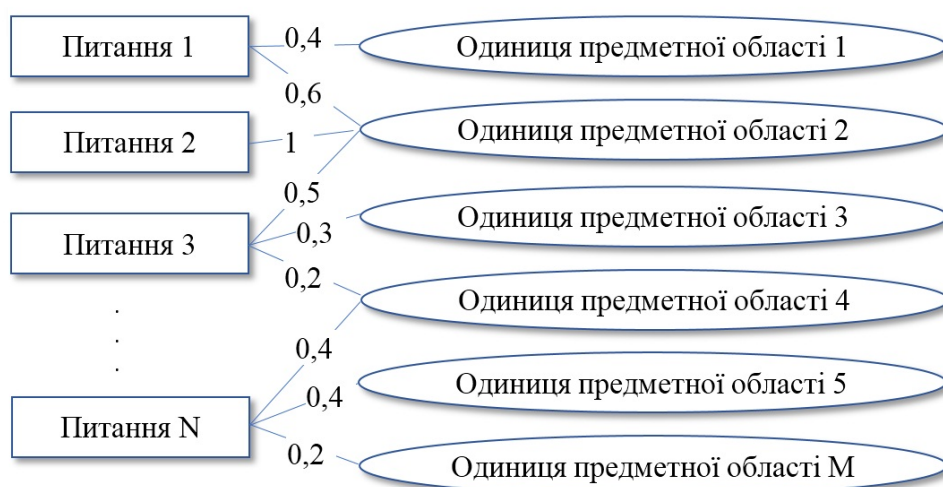


Рис. 2 – Відношення між питаннями попереднього тесту

Студент повинен використати знання різних концепцій (одиниць предметних областей) для того, щоб правильно відповісти на тестове питання. Кожна відповідь на питання дозволяє згрупувати знання особи, що навчається, у три групи – низький, середній та високий рівень.

Процес розробки моделі адаптації передбачає [2]:

1) збір фактів – свідчень про поточні знання окремих концепцій. Ці дані використовуються у якості індикаторів знань студентів з визначеною мірою довіри;

2) комбінація інформації (фактів) – результати, отримані з попереднього тестування, комбінуються згідно з правилом Демпстера. При цьому отримуються найбільш правдоподібні висновки і формуються інтервали довіри для визначення рівня невизначеності висновків;

3) створення моделі особи, що навчається – когнітивна модель студента використовує отримані висновки як початкові значення для адаптації.

Результати дослідження можливості застосування теорії свідчень у адаптивних курсах корпоративних систем дистанційного навчання. Аналіз

особливостей корпоративних систем дистанційного навчання показав, що рівень попередніх знань, вмінь і навичок осіб, що навчаються, є одним із найважливіших параметрів, які визначають ефективність подальшого навчання і служать критерієм персоніфікації курсів. Для перевірки початкового рівня володіння компетенціями доцільно застосовувати тестування, в якому окремі питання пов'язані з декількома одиницями предметних областей за допомогою вагових коефіцієнтів. Маючи зріз поточних знань (з визначеною мірою довіри), за допомогою комбінаційного правила Демпстера отримуються результати (рівень знань), які заслуговують найбільшій довіри. Також розраховуються інтервали довіри для визначення міри невизначеності висновків.

Одержані за допомогою теорії свідчень Демпстера-Шафера рівні володіння компетенціями стають достатньо достовірною основою для порівняння їх з навчальними цілями і визначення навчальних об'єктів та послідовності їх навчання (рис. 3). Порядок подачі матеріалу визначається рішенням класичної задачі задоволення обмежень за допомогою рою часток [15]

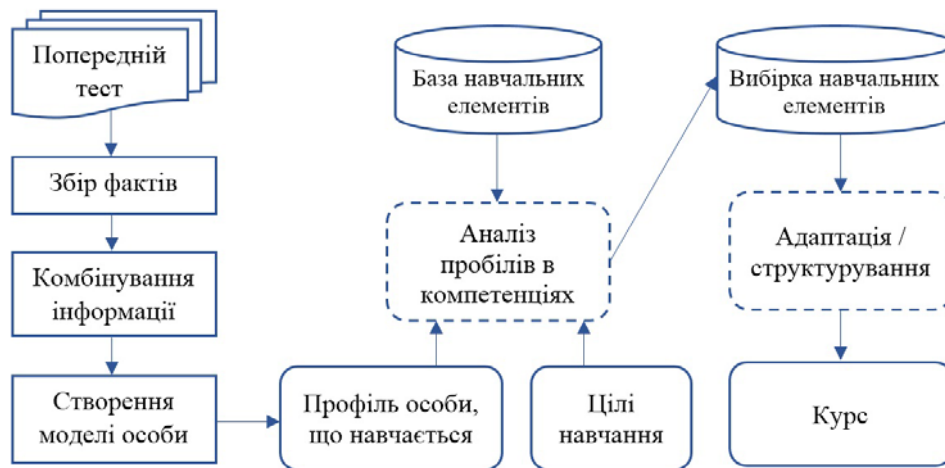


Рис. 3 – Адаптивна модель генерації контенту на основі компетенцій

Обговорення результатів дослідження можливості застосування теорії свідчень у адаптивних курсах корпоративних систем дистанційного навчання. Запропонований підхід до адаптації курсів у корпоративних системах дистанційного навчання на основі теорії свідчень Демпстера-Шефера дозволяє швидко та ефективно пристосовувати контент до одного із основних критеріїв, що відрізняють дорослих осіб, що навчаються – до їхнього рівня вхідних компетенцій. Одержані результати стають основою моделі адаптації на основі компетенцій. До недоліків запропонованого підходу слід віднести наступні. По-перше, результати будь-якого комп'ютерного тестування містять помилки і похибки, особливо якщо мова йде про тестування компетенцій, у тому числі вищих рівнів (за Блумом) навчальних цілей. Крім того, використання методу рою часток для пошуку оптимального порядку подачі навчального матеріалу може не мати математичного рішення. Збільшення загальної кількості навчальних елементів, тестових завдань та ін. також має як позитивні (збільшується довіра до отриманих результатів та зменшується невизначеність) і негативні (ускладнення пошуку рішення системою та збільшення навантаження на викладачів при підготовці навчальних матеріалів) для запропонованої моделі наслідки. У подальшому доцільно розглянути можливості застосування інших інструментів штучного інтелекту (наприклад, нечіткі множини другого типу) для аналізу результатів тестування та провести експериментальні дослідження ефективності запропонованого підходу до адаптації.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що при побудові ефективних систем корпоративного дистанційного навчання доцільно застосовувати адаптацію курсів, що базується на попередніх знаннях, вміннях та навичках особи, що навчається. Це дозволяє максимально врахувати попередній досвід та компетенції, які відносяться до різних предметних галузей.

Проведення попереднього тестування та аналіз результатів за допомогою інструментів теорії Демпстера-Шафера дозволяє сформулювати показник навчального профілю цих осіб – рівень попередніх знань, – з урахуванням рівня знань окремих одиниць предметної області

і використати цей профіль для адаптації контенту під поточний рівень володіння компетенціями. Подальша адаптація повинна враховувати як потенційні помилки та похибки у визначенні початкового рівня знань, так і інші характеристики навчального профілю осіб, що навчаються.

Список літератури:

1. *Essalmi F.* A fully personalization strategy of e-learning scenarios [Text] / *F. Essalmi, L. Ayed, M. Jemni, S. Graf* // Computers in Human Behavior. – 2010. – № 26 (4). – P. 581–591. doi: [10.1016/j.chb.2009.12.010](https://doi.org/10.1016/j.chb.2009.12.010)
2. *Esichaikul V.* Student modelling in adaptive e-learning systems [Текст] / *V. Esichaikul, S. Lamnoi, C. Bechter* // Knowledge management and e-learning: An international journal. – 2011. – Vol 3. – N. 3. – P.342-355
3. *Mahajan R.* Web usage mining for building an adaptive e-learning site: a case study [Текст] / *R. Mahajan, J. S. Sodhi, V. Mahajan* // International journal of e-education, e-business, e-management and e-learning. – 2014. – № 4 (4). – P. 283–291. doi: [10.7763/ijeeec.2014.v4.343](https://doi.org/10.7763/ijeeec.2014.v4.343)
4. *Kardan, A.* Adaptive systems: a content analysis on technical side for e-learning environments [Текст] / *A. Kardan, M. Aziz, M. Shahpasand* // Artificial intelligence review. – 2015. – № 44(3). – P. 365–391. doi: [10.1007/s10462-015-9430-1](https://doi.org/10.1007/s10462-015-9430-1)
5. *Halawa M.* Personalized e-learning recommendation model based on psychological type and learning style models [Текст] / *M. Halawa, E. Hamed, M. Shehab* // IEEE Seventh international conference on intelligent computing and information systems. – 2015. – P. 577–583. doi: [10.1109/intelcis.2015.7397281](https://doi.org/10.1109/intelcis.2015.7397281)
6. *Thalman, S.* Adaptation criteria for the personalized delivery of learning materials: a multi-stage empirical investigation [Текст] / *S. Thalman* // Australian journal of education technology. – 2014. – № 30 (1). – P. 45–60. doi: [10.14742/ajet.235](https://doi.org/10.14742/ajet.235)
7. *Truong H.* Integrating learning styles and adaptive e-learning system: current developments, problems and opportunities [Текст] / *H. Truong* // Computers in human behavior. – 2016. – № 55. – 1185–1193. doi: [10.1016/j.chb.2015.02.014](https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.02.014)
8. *Modritscher F.* Enhancement of SCORM to support adaptive e-learning within the scope of the research project AdeLE [Текст] / *F. Modritscher, C. Gult, B. Garsia, H. Maurer* // Proceedings of World Conference on E-Learning. – 2004. – P. 2499–2505. Available at: <http://bernstein.iicm.tugraz.at:8080/about/Homepages/cguetl/publications/2004/Modritscher%20et%20al.%202004%20-%20ELEARN.pdf>
9. *Almohammadi K.* User-centric adaptive learning system based on interval type-2 fuzzy logic for massively crowded e-learning platforms [Текст] / *K. Almohammadi, H. Hagrass, D. Alhazzaawi, G. Aldabbagh* // Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research. – 2016. – Vol. 6, No. 2. – P.81–101
10. *Abyaa A.* Towards an adult learner model in an online learning environment [Текст] / *A. Abyaa, M. K. Idrissi, S. Bennani* // IEEE

- 15th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training. – 2016. – P. 1–6.
11. E-learning market trends and forecast 2017-2021 [Electronic resource] / DOCEBO. – Available at: <https://www.docebo.com/elearning-market-trends-report-2017-2021/>
 12. IMS Reusable Definition of Competency or Educational Objective - Best Practice and Implementation Guide Version 1.0 Final Specification [Electronic resource] / IMS Global Learning Consortium. – 2002. Available at: https://www.imsglobal.org/competencies/rdceov1p0/imsrdceo_bestv1p0.html
 13. Csikszentmihalyi M. Flow: the psychology of optimal experience [Текст] / M. Csikszentmihalyi. – New York : Harperperennial. – 1990. – 320 p.
 14. Joo, Y. J. A model for predicting learning flow and achievement in corporate e-learning [Текст] / Y. J. Joo, K. Y. Lim, S. M. Kim // Journal of Educational Technology & Society. – 2012. – № 15 (1). – P. 313–335. Available at: <https://search.proquest.com/docview/1287024892?accountid=131940>
 15. Marcos L. Competency-based Learning Object Sequencing using Particle Swarms [Electronic resource] / L. Marcos, C. Pages, J. J. Martinez, J. A. Gutierrez. // Tools in Artificial Intelligence. – Available at: https://www.intechopen.com/books/tools_in_artificial_intelligence/competency-based_learning_object_sequencing_using_particle_swarms. doi: 10.5772/6091
 16. Несміян Ю. Ю. Про підхід до створення моделі користувача в адаптивній системі навчання [Текст] / Ю. Ю. Несміян, М. С. Шырокопетлева // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/2 (46). – С. 60–63 Режим доступу: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2931/2734>
 17. Мазорчук М. С. Методы и модели анализа качества тестовых заданий и моделирование компьютерного адаптивного тестирования в системах дистанционного обучения [Текст] / М. С. Мазорчук, В. С. Добряк, П. С. Емельянов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2016. – № 73. – С. 103–117
 18. Люгер Д. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем [Текст] / Д. Ф. Люгер. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
- Bibliography (transliterated):**
1. Essalmi, F., Ayed, L. J. B., Jemni, M., Kinshuk, Graf, S. (2010). A fully personalization strategy of E-learning scenarios. Computers in Human Behavior, 26 (4), 581–591. doi: 10.1016/j.chb.2009.12.010
 2. Esichaikul, V., Lamnoi, S., & Bechter, C. (2011). Student modelling in adaptive e-learning systems. Knowledge management and e-learning: An international journal, 3(3), 342–355
 3. Mahajan, R. (2014). Web Usage Mining for Building an Adaptive e-Learning Site: A Case Study. International Journal of e-Education, e-Business, e-Management and e-Learning, 4 (4), 283–291. doi: 10.7763/ijeeeee.2014.v4.343
 4. Kardan, A. A., Aziz, M., Shahpasand, M. (2015). Adaptive systems: a content analysis on technical side for e-learning environments. Artificial Intelligence Review, 44 (3), 365–391. doi: 10.1007/s10462-015-9430-1
 5. Halawa, M. S., Hamed, E. M. R., Shehab, M. E. (2015). Personalized E-learning recommendation model based on psychological type and learning style models. 2015 IEEE Seventh International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS). 577–583. doi: 10.1109/intelcis.2015.7397281
 6. Thalmann, S. (2014). Adaptation criteria for the personalised delivery of learning materials: A multi-stage empirical investigation. Australasian Journal of Educational Technology, 30 (1), 45–60. doi: 10.14742/ajet.235
 7. Truong, H. M. (2016). Integrating learning styles and adaptive e-learning system: Current developments, problems and opportunities. Computers in Human Behavior, 55, 1185–1193. doi: 10.1016/j.chb.2015.02.014
 8. Modritscher, F. Gult, C., Garsia, B., Maurer, Y. (2004). Enhancement of SCORM to support adaptive e-learning within the scope of the research project AdeLE. Proceedings of World Conference on E-Learning, 2499–2505. Available at: <http://bernstein.iicm.tugraz.at:8080/about/Homepages/cguetl/publications/2004/Moedritscher%20et%20al.%202004%20-%20ELEARN.pdf>
 9. Almohammadi K., Hagraas H., Alghazzaawi, D., Aldabbagh, G. (2016). User-centric adaptive learning system based on interval type-2 fuzzy logic for massively crowded e-learning platforms. Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, 6 (2), 81–101.
 10. Abyaa, A., Idrissi, M. K., Bennani, S. (2016). Towards an adult learner model in an online learning environment. IEEE 15th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training, 1–6. doi: 10.1109/ithet.2016.7760735
 11. E-learning market trends and forecast 2017-2021. (2016). DOCEBO. Available at: <https://www.docebo.com/elearning-market-trends-report-2017-2021/>
 12. IMS Reusable Definition of Competency or Educational Objective - Best Practice and Implementation Guide Version 1.0 Final Specification. (2002). IMS Global Learning Consortium. Available at: https://www.imsglobal.org/competencies/rdceov1p0/imsrdceo_bestv1p0.html
 13. Csikszentmihalyi, M. (1990). Flow: the psychology of optimal experience. New York : Harperperennial
 14. Joo, Y. J., Lim, K. Y., Kim, S. M. (2012). A model for predicting learning flow and achievement in corporate e-learning. Journal of Educational Technology & Society, 15 (1), 313–335. Available at: <https://search.proquest.com/docview/1287024892?accountid=131940>
 15. Marcos, L., Pages, C., Martinez, J. J. Gutierrez, J. A. (2008). Competency-based Learning Object Sequencing using Particle Swarms. Tools in Artificial Intelligence. Available at: https://www.intechopen.com/books/tools_in_artificial_intelligence/competency-based_learning_object_sequencing_using_particle_swarms. doi: 10.5772/6091
 16. Nesmiian, Yu.Yu., & Shyrokopetlieva M.S. (2010). Pro pidkhdid do stvorennia modeli korystuvacha v adaptivnii systemi navchannia. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 4 (2 (46)), 60–63. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2931/2734>
 17. Mazorchuk, M. S., Dobriak, V. S., Emelianov, P. S. (2016). Metody i modeli analiza kachestva testovykh zadaniy i modelirovanie kompiuternoho adaptivnogo testirovaniia v systemakh dystantsyonnoho obucheniia. Otkrytye informatsyonnye i kompiuternye integrirovannye tekhnolohii, 73, 103–117
 18. Liuger D. F. (2003). Iskusstvennii intellekt. Stratehii i metody resheniya slozhnykh problem, Moscow: Izdatelskiy dom «Viliams», 864.

Надійшла (received) 03.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Застосування теорії свідчень у адаптивних курсах корпоративних систем дистанційного навчання/ О. Є. Іларіонов, Н. М. Іларіонова, П. М. Сорока// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.100–106. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Использование теории свидетельств в адаптивных курсах корпоративных систем дистанционного образования/ О. Е. Иларионов, Н. Н. Иларионова, П. Н. Сорока// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.100–106. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-5459.

Evidence theory in adaptive corporate e-learning systems/ O. Ilarionov, N. Ilarionova, P. Soroka//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.100–106. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Іларіонов Олег Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри «Інтелектуальних та інформаційних систем»; вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; e-mail: oilarionov@gmail.com.

Іларіонова Ніна Миколаївна – кандидат економічних наук, доцент, Вищий навчальний заклад «Університет економіки та права «КРОК», доцент кафедри «Міжнародних економічних відносин»; вул. Лагерна 30-32, м. Київ, Україна, 03113; e-mail: ilarionovanm@gmail.com.

Сорока Петро Миколайович – кандидат фізико-математичних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри інтелектуальних та інформаційних систем; вул. Володимирська, 60, Київ, 01601; e-mail: p_soroka@ukr.net.

Іларіонов Олег Євгеньевич – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри «Інтелектуальних та інформаційних систем»; ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033; e-mail: oilarionov@gmail.com.

Іларіонова Ніна Николаєвна – кандидат економічних наук, доцент, Вищеє учебное заведение «Університет економіки та права «КРОК», доцент кафедри «Міжнародних економічних відносин»; ул. Лагерная, 30-32, г. Киев, Украина, 03113; e-mail: ilarionovanm@gmail.com.

Сорока Петр Николаевич – кандидат фізико-математичних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри інтелектуальних та інформаційних систем; ул. Владимирская, 60, Киев, Украина, 01601; e-mail: p_soroka@ukr.net.

Ilarionov Oleg – PhD, associate professor, Kyiv National University named after Taras Shevchenko; Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01601; e-mail: oilarionov@gmail.com.

Ilarionova Nina – PhD, associate professor, KROK University; Lagerna str., 30-32, Kyiv, Ukraine, 03113; e-mail: ilarionovanm@gmail.com.

Soroka Petro – PhD, associate professor, Taras Shevchenko national university of Kyiv, Volodymyrska str., 60, Kyiv, Ukraine, 01601; e-mail: p_soroka@ukr.net.

УДК 338+519.2+658

П. М. СОРОКА, О. Є. ІЛАРІОНОВ

ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЕРЕВА РІШЕНЬ

Розглядається моделювання задачі вибору рішень в умовах невизначеності за допомогою дерева рішень. Описана суть дерева рішень. Наведено етапи, які у загальному випадку припускає процес прийняття управлінських рішень за допомогою дерева рішень. Вказано переваги та недоліки методу дерева рішень. У статті за допомогою дерева рішень розв’язані такі задачі: задача вибору менеджером з маркетингу рішення приймати чи не приймати нову етикетку; задача вибору підприємством постачальника виробів; задача прийняття керівництвом підприємства стратегічного рішення щодо створення для випуску нової продукції великого підприємства, малого підприємства чи продати патент.

Ключові слова: прийняття рішень в умовах невизначеності, дерево рішень, маркетинг, виробничий менеджмент, стратегічний менеджмент.

Рассматривается моделирование задачи выбора решений в условиях неопределенности с помощью дерева решений. Приведены этапы, которые в общем случае допускает процесс принятия управленческих решений с помощью дерева решений. Указано на преимущества и недостатки метода дерева решений. В работе с помощью дерева решений решены следующие задачи: задача выбора менеджером с маркетинга решения принимать или не принимать новую этикетку; задача выбора предприятием поставщика изделий; задача принятия руководством предприятия стратегического решения о создании для выпуска новой продукции большого предприятия, малого предприятия или продать патент.

Ключевые слова: принятие решений в условиях неопределенности, дерево решений, маркетинг, производственный менеджмент, стратегический менеджмент.

The simulation of problem of chooses decision under uncertainty using decision tree is considered. Phases are given which are permitted in general a process of decision support with help of decision tree. It is indicated on advantages and shortcomings of method decision tree. In article with help of decision tree such tasks are solved: the task of choose by marketing manager of decision to take or no to take a new tag; the task of choose by enterprise of supplier of factory-made goods; the task of taking by management of enterprise of strategic decision about creation for issue a new product a big business, small business or to sale a patent. It was conducted the analysis of decision every tasks. On the grounds of this analysis it was draw conclusions in the end of decision every tasks.

Keywords: decision making under uncertainty, decision tree, marketing, production management, strategic management.

© П. М. Сорока, О. Є. Іларіонов. 2016

Вступ. Особа, що приймає рішення (ОПР), досить часто повинна приймати рішення в умовах невизначеності. З метою зниження невизначеності при прийнятті рішень використовується статистична теорія прийняття рішень, яка припускає побудову дерева рішень задачі і використання його для вибору оптимального рішення.

Корисність означає ступінь задоволення, яке отримує суб'єкт від споживання товару або виконання якої-небудь дії. З точки зору особи, що приймає рішення, корисність управлінського рішення полягає у виборі найбільш адекватного зовнішнім і внутрішнім умовам розвитку підприємства рішення. Статистична теорія прийняття рішень пропонує способи аналізу таких проблем і допомагає ОПР зробити раціональний вибір. Будь-яка проблема прийняття рішень в умовах невизначеності має такі дві характеристики:

- ОПР повинна робити вибір або, можливо, послідовність виборів із декількох альтернативних варіантів дії;

- вибір веде до певного результату, але ОПР не в змозі точно передбачити цей результат, оскільки він залежить від непередбачуваної події або послідовності подій, а також і від самого вибору.

Постановка проблеми. Для вирішення проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності використовують моделювання задачі вибору рішень за допомогою дерева рішень. Цей метод вибору рішень передбачає графічну побудову варіантів рішень. Гілкам дерева ставлять у відповідність суб'єктивні та об'єктивні оцінки можливих подій. Рухаючись вздовж побудованих гілок оцінюють кожен шлях, як правило на основі теорії ймовірностей, і з усіх можливих оцінок вибирають найбільш прийнятний варіант дій. При цьому кількісну оцінку одержує кожен варіант.

Дерево рішень є найзручнішим способом подання такої серії альтернатив з наступним вибором найбільш прийнятних. Воно дає змогу розділити велику складну проблему на серію дрібніших проблем.

Дерево рішень є графічним підходом до аналізу рішень в умовах невизначеності. Воно представляє задачу раціонального рішення як послідовності альтернатив, кожна із яких відображається розгалуженням дерева. Виділяють два типи розгалужень дерева рішень: гілка рішення і гілка події. Гілка рішення – це розгалуження, яке відображає альтернативу, де рішення приймає ОПР. Звичайно гілку рішень графічно зображають у вигляді невеликого квадрату. Гілка події – це розгалуження, яке відповідає альтернативі, де шанс вибирає результат, тобто зовнішні фактори визначають, яка з можливих випадкових подій відбудеться. Гілку подій графічно зображають у вигляді ламаної прямої. Кожна гілка подій представляє можливий результат, а число p_i , що асоціюється з кожною гілкою, являє собою ймовірність, з якою дана подія відбувається. Отже, дерево рішень – це графічне зображення послідовності рішень і станів середовища з вказівкою відповідних ймовірностей і виграшів для будь-яких комбінацій альтернатив і станів середовища.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є розв'язання задач прийняття рішень в умовах невизначеності за допомогою дерева рішень.

Завданням дослідження є розв'язання за допомогою дерева рішень таких задач, а саме задачі вибору менеджером з маркетингу рішення приймати чи не приймати нову етикетку; задачі вибору підприємством постачальника виробів; задачі прийняття керівництвом підприємства стратегічного рішення щодо створення для випуску нової продукції великого підприємства, малого підприємства чи продати патент.

Матеріали та методи дослідження. Процес прийняття управлінських рішень за допомогою дерева рішень у загальному випадку припускає виконання п'яти етапів:

Етап 1. Формулювання завдання. Насамперед необхідно відкинути всі фактори, що не стосуються проблеми, а серед багатьох тих, що залишилися, виділити суттєві і несуттєві. Це дасть можливість привести опис завдання прийняття управлінського рішення у форму, що піддається аналізу.

Слід виконати такі основні процедури:

- визначити можливості збору інформації для експериментування і реальних дій;

- скласти перелік подій, що з певною ймовірністю можуть відбутися;

- установити тимчасовий порядок розташування подій, у наслідках яких міститься корисна і доступна інформація, і тих послідовних дій, які можна розпочати.

Етап 2. Побудова дерева рішень.

Етап 3. Оцінка ймовірностей станів середовища, тобто зіставлення шансів виникнення кожної конкретної події. Слід зазначити, що названі ймовірності визначаються або на підставі наявної статистики, або експертним шляхом.

Етап 4. Встановлення виграшів (чи програшів – як виграшів зі знаком мінус) для кожної можливої комбінації альтернатив (дій) і станів середовища.

Етап 5. Розв'язання задач.

Зазначимо, що цей метод має ряд істотних недоліків:

- він досить трудомісткий;

- у дереві рішень враховуються тільки ті дії, які має намір виконати підприємець, і тільки ті наслідки, що, на його думку, мають місце, при цьому не враховуються багатофакторність системи і вплив зовнішнього середовища на діяльність підприємницької фірми.

До переваг дерева рішень можна віднести те, що за допомогою цього методу є можливість оцінити різні шляхи і обрати найменш ризикований.

Результати дослідження та їх обговорення і аналіз. Використаємо дерево рішень для розв'язання задач маркетингу, виробничого та стратегічного менеджменту.

Задача 1. Менеджер з маркетингу повинен прийняти одне із двох рішень: приймати чи не приймати нову етикетку для продукту, який виробляється фірмою. Тобто в даному випадку вибір здійснюється між двома альтернативами: приймати нову етикетку для продукту чи залишити стару. Менеджер не знає достовірно, чи є нова етикетка в дійсності кращою від старої. Якщо нова етикетка є кращою старої, то фірма збільшить прибуток на 800 тис. грн., а якщо ні, то фірма втратить 500 тис. грн. Припустимо також, що менеджер вважає, що у випадку, якщо фірма прийме нову етикетку, то з ймовірністю 0,5 нова ети-

кетка виявиться кращою старої і з ймовірністю 0,5 нова етикетка виявиться гіршою. Яке рішення і чому повинен прийняти менеджер з маркетингу?

Розв'язання. На рис. 1 представлено дерево рішень для цієї задачі.

У лівій частині діаграми зображена вилка рішення, у якій менеджеру з маркетингу необхідно зробити вибір – приймати нову етикетку або залишити стару. Ця вилка рішення зображена прямокутником. Якщо менеджер вибирає нижню гілку, що відповідає збере-

женню старої етикетки, то результат відомий: фірма не одержить додаткового прибутку, але й не понесе збитків. Отже, нульовий додатковий прибуток відображений наприкінці цієї гілки. Якщо вибрана верхня гілка вилки рішення, то ми приходимо до вилки шансу, що відповідає двом альтернативам – нова етикетка краща старої і фірма одержить додатковий прибуток у розмірі 800 000 грн., а якщо нова етикетка виявиться гірша старої, то фірма понесе збитки в розмірі 500 000 грн.

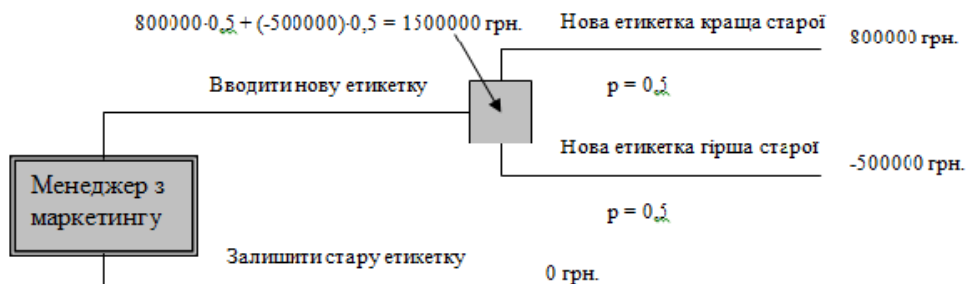


Рис. 1. – Дерево рішень для задачі з маркетингу

Побудувавши таке дерево рішень, можна легко визначити ту гілку, що вибере менеджер з маркетингу, щоб максимізувати очікуваний додатковий прибуток. Задача розв'язується методом оберненої індукції, починаючи з правого кінця дерева рішень. На першому етапі обчислюється очікуваний прибуток у вилці шансу. Оскільки з ймовірністю 0,5 шанс вибере гілку, що веде до прибутку 800 000 грн., а з ймовірністю, рівною 0,5, шанс може вибрати гілку, що веде до збитку в розмірі 500 000 грн., то очікуваний прибуток у вилці шансу, що обчислюється за формулою математичного сподівання, дорівнює

$$800\ 000 \cdot 0,5 + (-500\ 000) \cdot 0,5 = 150\ 000\ \text{грн.}$$

Цей результат визначає вартість даного шансу. Рухаючись далі вліво по дереву рішень, відзначимо, що менеджер з маркетингу має можливість вибору між двома альтернативами, чи гілками, одна з яких веде до додаткового середнього очікуваного прибутку в розмірі 150 000 грн., а інша веде до нульового додаткового прибутку. Якщо менеджер з маркетингу хоче максимізувати очікуваний прибуток, то він вибере першу гілку. Іншими словами, він прийме рішення вводити нову етикетку.

Задача 2. Підприємство одержує вироби від двох постачальників А і В. Якість виробів подано у табл. 1.

Таблиця 1– Ймовірність настання і%-го браку для постачальників А і В

Процент браку, %	Ймовірність для постачальника	
	А	В
1	0,5	0,3
2	0,2	0,3
3	0,15	0,2
4	0,1	0,1
5	0,05	0,1

Повні витрати на усунення браку одного виробу становлять 100 грн. Вироби надходять партіями по 10000 шт. Оскільки якість виробів у постачальника В гірша, він уступає всю партію на 1000 грн. дешевше. Побудувати дерево рішень і на його основі зробити висновок щодо вибору постачальника.

Розв'язання. На рис. 2 представлено дерево рішень для цієї задачі. У цій задачі ОПР є підприємство. Обчислимо витрати на усунення 1%-го браку з ймовірністю 0,5 від постачальника А:

$$10000 \cdot 1\% \cdot 0,5 \cdot 100 = 5000\ \text{грн.}$$

Аналогічно обчислимо витрати на усунення браку для інших 4 гілок постачальника А:

$$10000 \cdot 2\% \cdot 0,2 \cdot 100 = 4000\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 3\% \cdot 0,15 \cdot 100 = 4500\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 4\% \cdot 0,1 \cdot 100 = 4000\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 5\% \cdot 0,05 \cdot 100 = 2500\ \text{грн.}$$

та для 5 гілок постачальника В:

$$10000 \cdot 1\% \cdot 0,3 \cdot 100 = 3000\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 2\% \cdot 0,3 \cdot 100 = 6000\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 3\% \cdot 0,2 \cdot 100 = 6000\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 4\% \cdot 0,1 \cdot 100 = 4000\ \text{грн.}$$

$$10000 \cdot 5\% \cdot 0,1 \cdot 100 = 5000\ \text{грн.}$$

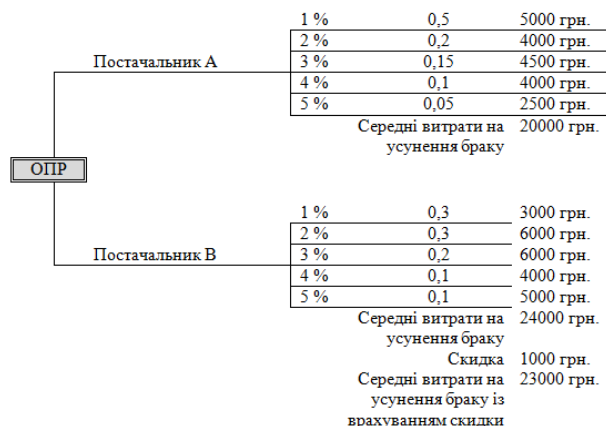


Рис. 2. – Дерево рішень для задачі про усунення браку

Середні витрати на усунення браку від постачальника А знаходимо як суму витрат на усунення 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %-го браку:

$$5000 \text{ грн.} + 4000 \text{ грн.} + 4500 \text{ грн.} + 4000 \text{ грн.} + 2500 \text{ грн.} = 20000 \text{ грн.}$$

Аналогічно знаходимо середні витрати на усунення браку від постачальника В:

$$3000 \text{ грн.} + 6000 \text{ грн.} + 6000 \text{ грн.} + 4000 \text{ грн.} + 5000 \text{ грн.} = 24000 \text{ грн.}$$

Із врахуванням скидки 1000 грн. середні витрати на усунення браку від постачальника В становитимуть 23000 грн.

Таким чином, підприємству доцільніше мати справу із постачальником А, так як витрати на усунення браку його виробів менші.

Задача 3. Керівництво підприємства має вирішити, створювати для випуску нової продукції велике підприємство, мале підприємство чи продати патент. Розмір виграшу, що може одержати підприємство, залежить від сприятливого чи несприятливого станів ринку, що склалися на ринку, оцінюваних рівномірно (табл. 2).

Таблиця 2 – Виграш підприємства залежно від стану ринку та від дій керівництва

Номер варіанта	Дії керівництва підприємства	Виграш підприємства в грн., залежно від стану ринку	
		Сприятливий	Несприятливий
1	Створення великого підприємства	400 000	-300 000
2	Створення малого підприємства	200 000	-50 000
3	Продаж патенту	50 000	50 000

Але наявність станів із ймовірностями 0,5 означає, швидше за все, що істинні ймовірності підприємству невідомі. Припустимо тепер, що підприємство має визначити, робити додаткове дослідження ринку чи ні. Керівництво підприємства, як і раніше, розуміє, що додаткове дослідження ринку не зможе дати точної інформації, але воно допоможе уточнити очікувані оцінки кон'юнктури ринку, змінивши тим самим значення ймовірностей. Керівництво підприємства зробило замовлення прогнозу стану ринку консалтинговій фірмі, що спеціалізується на подібному виді послуг, причому ця послуга коштує 10000 грн.

Щодо консалтингової фірми відомо, що її прогноз збувається з певними ймовірностями, які подані в табл. 3.

Таблиця 3 – Прогноз консалтингової фірми залежно від стану ринку

Прогноз	Факт	
	Сприятливий	Несприятливий
Сприятливий	0,8	0,3
Несприятливий	0,2	0,7

Тобто, коли стверджується, що ринок сприятливий, то прогноз справджується із ймовірністю 0,8 і не справджується із ймовірністю 0,2. Коли стверджується, що ринок несприятливий, то прогноз справджується із ймовірністю 0,3 і не справджується із ймовірністю 0,7.

Консалтингова фірма зробила такий висновок:

- ситуація буде сприятливою із ймовірністю 0,75;
- ситуація буде несприятливою із ймовірністю 0,25.

Потрібно вибрати оптимальний варіант дій для керівництва підприємства.

Розв'язання. На основі даних табл. 2 і 3 та інформації, вказаної в умові задачі, побудуємо дерево рішень (рис. 3). У цьому дереві рішень розвитку подій відбувається від кореня рішень – керівництва підприємства (ОПР) до гілок, а розрахунок прибутку (виграшу), навпаки, виконується від початкових станів до кінцевих.

Середній очікуваний виграш для кожного можливого варіанта дій керівництва підприємства оцінюємо як звичайне математичне сподівання

$$M(X) = \sum_{i=1}^n p_i x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i x_i,$$

де x_i – вибіркові значення випадкової величини, щодо якої здійснюються розрахунки; n_i – число повторюваних значень у вибірці; p_i – ймовірності появи відповідних значень x_i .

Ймовірності оцінюються як відношення добрих випадків до всієї кількості випадків, тобто

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^n n_i}$$

У нашій задачі, наприклад (табл. 2), середній очікуваний виграш при створенні малого підприємства дорівнює

$$\begin{aligned} M_2 &= \sum_{i=1}^2 p_i x_i = p_1 x_1 + p_2 x_2 = \\ &= 0.5 \cdot 200000 + 0.5 \cdot (-50000) = 75000 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Аналогічно знаходимо середній очікуваний виграш при створенні великого підприємства або від продажу патенту (див. верхню частину рис. 3). Звідси, середній очікуваний виграш при створенні великого підприємства дорівнює 50 тис. грн., а продаж патенту дасть також 50 тис. грн.

Таким чином, що за умов, коли керівництво підприємства не проводило додаткових досліджень ринку, можна зробити висновок, що доцільніше будувати мале підприємство, так як в даному випадку середній очікуваний виграш буде максимальним.

Коли консалтинговою фірмою стверджується, що ситуація на ринку буде сприятливою, то середній очікуваний виграш при створенні великого

підприємства буде 260 тис. грн., малого підприємства – 150 тис. грн. Від продажу патенту одержимо 50 тис. грн. Отже за таких умов доцільно створювати велике підприємство, щоб середній очікуваний вигреш був максимальним.

Коли консалтинговою фірмою стверджується, що ситуація на ринку буде несприятливою, то

створення великого підприємства буде збитковим -90 тис. грн. Середній очікуваний вигреш при створенні малого підприємства дорівнює 25 тис. грн., а продаж патенту дасть 50 тис. грн. Отже за таких умов, щоб середній очікуваний вигреш був максимальним доцільно продати патент.

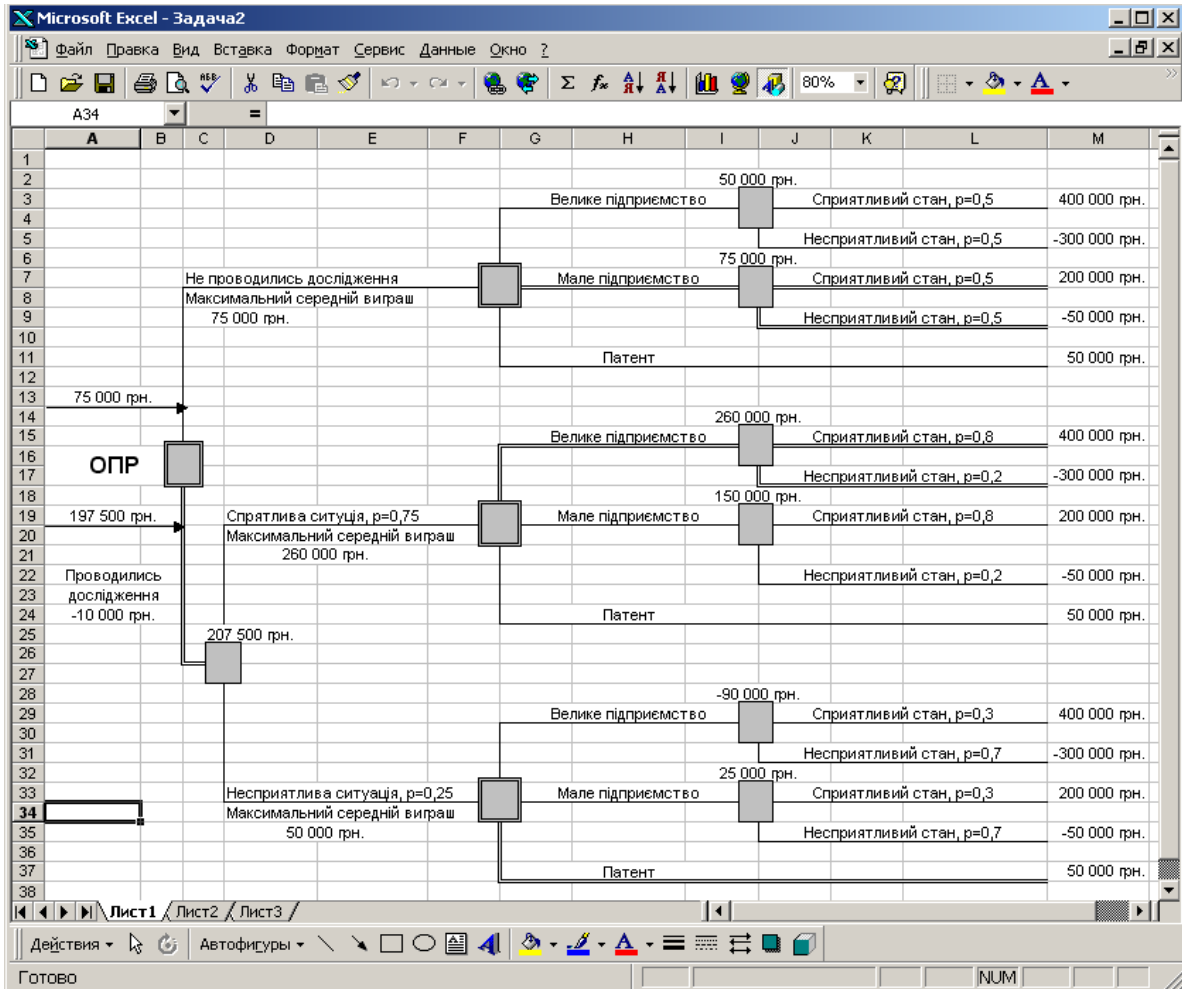


Рис. 3. – Дерево рішень задачі 3. – рішення приймає ОПР; – приймається випадково; – обране рішення

Із врахуванням висновку консалтингової фірми максимальний очікуваний середній вигреш становитиме 207500 грн. Коли з цієї суми відрахувати витрати на послуги консалтингової фірми (10000 грн.), то керівництво підприємства може розраховувати на середній очікуваний вигреш 197500 грн., що на 122500 грн. більше, ніж коли б керівництво підприємства не проводило додаткових досліджень кон'юнктури ринку.

На основі аналізу цього дерева рішень можна зробити такі висновки:

1. Доцільно проводити додаткове дослідження кон'юнктури ринку, оскільки це дає змогу істотно уточнити прийняте рішення (очікуваний максимальний вигреш буде більшим на 122500 грн.).

2. Якщо керівництво підприємства прогнозує сприятливу ситуацію (очікуваний максимальний вигреш дорівнює 260000 грн.), то доцільно будувати велике підприємство.

3. Якщо керівництво підприємства прогнозує несприятливу ситуацію (очікуваний максимальний

вигреш дорівнює 50000 грн.), то доцільно продати патент.

Висновки. В даній статті описана суть дерева рішень. Наведено етапи, які у загальному випадку припускає процес прийняття управлінських рішень за допомогою дерева рішень. Вказано переваги та недоліки методу дерева рішень. У статті за допомогою дерева рішень розв'язані такі задачі: задача вибору менеджером з маркетингу рішення приймати чи не приймати нову етикетку; задача вибору підприємством постачальника виробів; задача прийняття керівництвом підприємства стратегічного рішення щодо створення для випуску нової продукції великого підприємства, малого підприємства чи продати патент.

Список літератури:

1. *Балан, В. Г.* Прийняття управлінських рішень. Методи, моделі, терміни, поняття, категорії. Тестові завдання. Ділові ігри. [Текст]: навч. пос. / В. Г. Балан. – К.: Нічлава, 2008. – 465 с.

2. Батрик, Р. Техника принятия управленческих решений [Текст] / Р. Батрик. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 416 с.
3. Гарнаев, А. Excel, VDA, INTERNET в экономике и финансах [Текст] / А. Гарнаев. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2001. – 796 с.
4. Венцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [Текст] / Е. С. Венцель. – М.: Наука, 1980. – 208 с.
5. Карлберг, К. Бизнес-анализ с использованием Excel [Текст] / К. Карлберг. – К.: Диалектика, 1997. – 576 с.
6. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений [Текст] / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2003. – 392 с.
7. Мирзоахмедов, Ф. Математические модели и методы управления производством с учетом случайных факторов [Текст] / Ф. Мирзоахмедов. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
8. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
9. Сорока, П. М. Табличный процессор Excel [Текст] / П. М. Сорока, М. Г. Медведев. – К.: Видавництво Європейського університету, 2003. – 167 с.
10. Трахтенгерц, Э. А. Компьютерная поддержка принятия решения [Текст] / Э. А. Трахтенгерц. – Синтег, 1998. – 376 с.
11. Трахтенгерц, Э. А. Субъективность в компьютерной поддержке управленческих решений [Текст] / Э. А. Трахтенгерц. – Синтег, 2001. – 256 с.
12. Трояновский, В. М. Математическое моделирование в менеджменте [Текст]: учеб. пособ. / В. М. Трояновский. – М.: РДЛ, 2002. – 256 с.
13. Учитель, Ю. Г. Разработка управленческих решений [Текст] / Ю. Г. Учитель, А. И. Терновой, К. И. Терновой. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. – 383 с.
14. Черняк, О. І. Інтелектуальний аналіз даних [Текст]: підр. / О. І. Черняк, П. В. Захарченко. – К.: Знання, 2014. – 599 с.
15. Эддоус, М. Методы принятия решений [Текст] / М. Эддоус, Р. Стэнсфилд. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. – 590 с.

Bibliography (transliterated):

1. Balan, V. H. (2008). Pryiniattia upravlinskykh rishen. Metody, modeli, terminy, poniattia, katehorii. Testovi zavdannia. Dilovi ihry. Kyiv: Nichlava, 465.
2. Harnaev, A. (2001). Excel, VDA, INTERNET v ekonomyke y finansakh. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 796.
3. Ventsel, E. S. (1980). Yssledovanye operatsyi: zadachy, pryntsyipy, metodolohiya. Moscow: Nauka, 208.
4. Karlberh, K. (1997). Byznys-analyz s pomoshchiu Excel. Kyiv: Dyalektyka, 576.
5. Larychev, O. Y. (2003). Teoryia y metody pryniatyia reshenyi. Moscow: Lohos, 392.
6. Myrzoakhmedov, F. (1991). Matematycheskye modeli y metody upravleniya proyzvodstvom s uchetoм sluchainykh faktorov. Moscow: Nauka, 96.
7. Saati, T. (1993). Pryniatie resheniy. Metod analiza ierarхий [Текст] / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
8. Saaty, T. (1993). Pryniatyie resheniy. Metod analiza yerarkhyi. Moscow: Radyo y sviaz, 278.
9. Soroka, P. M., Medviediev, M. H. (2003). Tablychnyi protsesor Excel. Kyiv: Vydavnytstvo Yevropeiskoho universytetu, 167.
10. Trakhtenherts, E. A. (1998). Kompiuternaia podderzhka pryniatyia resheniya. Synteh, 376.
11. Trakhtenherts, E. A. (2001). Subyektivnost v kompiuternoi podderzhke upravlencheskykh resheniy. Synteh, 256.
12. Troianovskiy, V. M. (2002). Matematycheskoe modelirovanye v menedzhmente. Moscow: RDL, 256.
13. Uchytel, Yu. H. (2007). Razrabotka upravlencheskykh resheniy. Moscow: YuNYTY-DANA, 383.
14. Cherniak, O. I., Zakharchenko, P. V. (2014). Intelektualnyi analiz danykh. Kyiv: Znannia, 599.
15. Addous, M., Stensfyld, R. (1997). Metody pryniatyia resheniy. Moscow: Audyt, YuNYTY, 590.

Надійшла (received) 08.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вирішення проблем прийняття рішень в умовах невизначеності за допомогою дерева рішень/ П. М. Сорока, О. Є. Іларіонов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.106–111. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

Решение проблем принятия решений в условиях неопределенности с помощью дерева решений/ П. Н. Сорока, О. Е. Иларионов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.106–111. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-5459.

The solving of problems of decision making under uncertainty using decision tree/ P. Soroka, O. Parionov//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.106–111. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сорока Петро Миколайович, кандидат фізико-математичних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри інтелектуальних та інформаційних систем; вул. Володимирська 64/13, Київ, 01601; e-mail: p_soroka@ukr.net

Іларіонов Олег Євгенович, кандидат технічних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри інтелектуальних та інформаційних систем; вул. Володимирська 64/13, Київ, 01601; e-mail: oilarionov@gmail.com

Сорока Петр Николаевич, кандидат физико-математических наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, доцент кафедры интеллектуальных та информационных систем; ул. Владимирская 64/13, Киев, 01601; e-mail: p_soroka@ukr.net

Иларионов Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, доцент кафедры интеллектуальных та информационных систем; ул. Владимирская 64/13, Киев, 01601; e-mail: oilarionov@gmail.com

Soroka Petro – candidate of physico-mathematical sciences, associate professor, Taras Shevchenko national university of Kyiv, 64/13, Volodymyrska Street, Kyiv, 01601; e-mail: p_soroka@ukr.net

Parionov Oleg – candidate of technical sciences, associate professor, Taras Shevchenko national university of Kyiv, 64/13, Volodymyrska Street, Kyiv, 01601; e-mail: oilarionov@gmail.com

УДК 004.056

А. Г. ОКСИЮК, Я. В. ШЕСТАК, О. Д. ОГБУ

ПОСТРОЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ КАК НЕОБХОДИМОСТЬ ВЫЖИВАНИЯ

Главной целью любой системы информационной безопасности является обеспечение устойчивого функционирования объекта, предотвращение угроз его безопасности, защита законных интересов Заказчика от противоправных посягательств, недопущение хищения финансовых средств, разглашения, утраты, утечки, искажения и уничтожения служебной информации, обеспечение нормальной производственной деятельности всех подразделений объекта. Другой целью системы информационной безопасности является повышение качества предоставляемых услуг и гарантий безопасности, имущественных прав и интересов клиентов.

Ключевые слова: система информационной безопасности, информация, угроза, защита, ИТ-инфраструктура.

Головною метою будь-якої системи інформаційної безпеки є забезпечення стійкого функціонування об'єкту, відвертання загроз його безпеки, захист законних інтересів Замовника від протиправних посягань, недопущення розкрадання фінансових коштів, розголошення, втрати, витоку, спотворення і знищення службової інформації, забезпечення нормальної виробничої діяльності усіх підрозділів об'єкту. Іншою метою системи інформаційної безпеки є підвищення якості послуг, що надаються, і гарантій безпеки, майнових прав і інтересів клієнтів.

Ключові слова: система інформаційної безпеки, інформація, загроза, захист, ІТ-інфраструктура.

It is necessary to consider many factors while building a secure information infrastructure. Not all of them are obvious and it is not always possible to predict which exactly security systems it will be necessary to include to the information infrastructure. Structured information presented in this report will help us with this article. In this article, the main points of the establishing of a protected information infrastructure were considered. As statistics show, most incidents occur not occasionally since they are the results of malicious actions of the personnel or their unconscientiousness of how to execute their professional duties of for setting up the information infrastructure.

A lot of information regarding the construction of a secure information infrastructure can be obtained from various documents, such as ISO / IEC 27001, PCI DSS, ISMS, various guidelines such as internal regulations and instructions, explanations to the law of Ukraine on information security. All these documents have many different versions and interpretations. Since there is no single standard for building a secure information infrastructure, there arises a solution to combine all available protection techniques and to develop a generalized model that, when implemented, can be expected to yield acceptable results.

When analyzing the vulnerabilities article in the article, one can see that a sufficiently large amount of work should to be carried out by the IT security service, which should be even more developed than the technical specialists who serve and sustain the information infrastructure system. The main task for information security specialists is not to protect the perimeter from an external enemy and not to protect the information infrastructure from external violators, but to accompany technical specialists and check the actions of technical personnel and only after all of that, to protect the system against external enemy.

A practice shows, more than 80% of all vulnerabilities of the information infrastructure were identified during analyzing the settings of the information infrastructure and the actions of technical personnel. In one banking structure of Ukraine, after using this technique, the number of external attacks was reduced by 90 %, implementation of this technique reduced to "0" the amount of information leaks caused by bank employees. This once again underlines the importance of building a secure information infrastructure using different methods depending on the needs of the business and new directions in the development of information technologies.

Keywords: information security system, information, threat, protection, IT infrastructure.

Вступ. Уровень развития современных технологий позволяет компаниям создавать сложные корпоративные инфраструктуры, объединяющие в себе множество подсистем. Зачастую архитектура сети настолько сложна, что обеспечить ее полную защиту становится непосильной задачей даже для крупных корпораций, выделяющих солидный бюджет на защиту своих ресурсов.

Главной целью любой системы информационной безопасности является построение, такой модели безопасности при которой с одной стороны будет достигнута максимальная защита информационных ресурсов и информации от посягательств третьих лиц, потери информации вследствие действия третьих лиц, или иных воздействий, которые могут привести к не работоспособности информационной системы или потере, краже информации. С другой стороны, будет достигнута максимальная повышение качества предоставляемых услуг и гарантий безопасности имущественных прав и интересов клиентов.

Достижение заданных целей возможно в ходе решения следующих основных задач. Рассмотрим перечень основных задач, которые необходимо решить для решения задачи построения защищенной информационной инфраструктуры:

– отнесение информации к категории ограниченного доступа (служебной тайне);

– прогнозирование и своевременное выявление угроз безопасности информационным ресурсам, причин и условий, способствующих нанесению ущерба, нарушению его нормального функционирования;

– создание условий функционирования с наименьшей вероятностью реализации угроз безопасности информационным ресурсам и нанесения ущерба;

– создание механизма и условий оперативного реагирования на угрозы информационной безопасности и проявления негативных тенденций в функционировании, эффективное пресечение посягательств на ресурсы на основе правовых, организационных и технических мер и средств обеспечения безопасности;

– создание условий для максимально возможного возмещения и локализации ущерба, ослабление негативного влияния последствий нарушения информационной безопасности.

Достижение заданных целей возможно в ходе решения следующих основных задач:

– отнесение информации к категории ограниченного доступа;

– прогнозирование и своевременное выявление угроз безопасности;

– создание условий функционирования с наименьшей вероятностью реализации угроз безопасности информационным ресурсам и нанесения ущерба;

- создание механизма и условий оперативного реагирования на угрозы информационной безопасности и проявления негативных тенденций в функционировании;

- создание условий для максимально возможного возмещения и локализации ущерба, ослабление негативного влияния последствий нарушения информационной безопасности.

Задача отнесение информации к категории ограниченного доступа (служебной тайне). Согласно статьям 7–9 закона Украины О доступе к публичной информации делиться на следующие типы:

1. Конфиденциальная информация – информация, доступ к которой ограничен физическим или юридическим лицом, кроме субъектов властных полномочий, и которая может распространяться в определенном ими порядке по их желанию в соответствии с предусмотренными ими условиями. Не может быть отнесена к конфиденциальной информация.

2. Секретная информация. Секретной признается информация, содержащая государственную, профессиональную, банковскую тайну, тайну следствия и иную предусмотренную законом тайну.

Служебная информация в соответствии с требованиями Закона может относиться следующая информация:

- 1) которая содержится в документах субъектов властных полномочий, представляющих внутриведомственную служебную корреспонденцию, докладные записки, рекомендации, если они связаны с разработкой направления деятельности учреждения или осуществлением контрольных, надзорных функций органами государственной власти, процессом принятия решений и преществуют публичному обсуждению и/или принятию решений;

- 2) собранная в процессе оперативно-розыскной, контрразведывательной деятельности, в сфере обороны страны, которая не отнесена к государственной тайне.

К этим типам информации доступ необходимо ограничивать, ко всем остальным типам информации можно и не ограничивать доступ. Исходя из типа информации и функционала разрабатывается и матрица доступа к информации.

Следующий пункт-это прогнозирование и своевременное выявление угроз безопасности информационным ресурсам. Анализ и прогнозирование угроз можно проводить путем анализа существующей инфраструктуры.

Для этого можно использовать метод причинно-следственного анализа, который позволяет получить множества (совокупности) протекающих в инфраструктуре предприятия процессов и задать отношения подчиненности на этом множестве, отражающие реальную причинно-следственную структуру такого явления как обеспечение безопасности информации.

Проведя причинно-следственный анализ влияния различных факторов на уровень защищенности, с большой долей вероятности можно будет утверждать, что:

- некоторые угрозы могут быть реализованы только при определенных условиях;
- условия реализации угроз существуют и имеются косвенные факторы, влияющие на них;
- возможно, принимать решения, ведущие к

скорейшему наступлению определенных благоприятных или ненаступлению неблагоприятных событий.

Фактически результатом начального проведения причинно-следственного анализа будет модель исходной защищенности информации предприятия.

Создание условий функционирования с наименьшей вероятностью реализации угроз безопасности информационным ресурсам и нанесения ущерба включает в себя применения предыдущих двух пунктов для существующей инфраструктуры.

Один из самых, пожалуй, важных моментов, которые часто упускают из виду при проектировании и внедрении защищенной информационной инфраструктуры это конечно создание механизма и условий оперативного реагирования на угрозы информационной безопасности и проявления негативных тенденций в функционировании. Этот пункт включает в себя комплекс мер и противодействий, таких как, например, анализирование входящего и исходящего трафика, анализирование изменения вносимых в системные файлы и пользовательские файлы, изменения, вносимые в служебную информацию, передаваемую от одного узла системы к другому узлу. К этому пункту так же можно отнести и анализирование новых тенденций, как в информационной безопасности, так и новых тенденций и направлений в процессах взлома систем и отдельных узлов систем.

Отдельным пунктом необходимо выделить пункт создание условий для максимально возможного возмещения и локализации ущерба, потому как систем, которые не могут быть взломаны и нарушены, не существует, и не учитывать этого мы не можем. От нас требуется определить критические ресурсы и критические данные, определить механизмы их восстановления при физическом сбое, злонамеренном действии третьих лиц или иных негативных процессах.

Цель и задачи исследования. Одним из важнейших направлений исследований в области информационной безопасности являются работы, связанные с изучением различных аспектов обеспечения безопасности компьютерных сетей и систем. В статье рассматриваются основные направления научных изысканий в области компьютерной безопасности.

Основные этапы построения защищенной инфраструктуры. На рис. 1 можно видеть блок-схему основных этапов построения защищенной информационной инфраструктуры.



Рис. 1 – Основные этапы построения защищенной инфраструктуры

Постановка задачи собственно сама идея, что мы будем защищать, сколько мы готовы потратить на защиту, сколько целесообразно потратить на защиту.

Сбор и анализ данных включает в себя анализ бизнес-процессов, какие порождают процессы они от кого они зависят и т. д.

Внедрение системы включает в себя выбор самой системы или комплекса систем, разработка правил и внедрение в пилотный проект этих систем и правил на предприятии.

Проверка работоспособности систем и правил, возможно, доработка систем под нужды бизнес-процессов и описание всех мер и правил, а также описание систем. Определение рисков и принятие рисков, и как противовес к пониманию рисков описание действий при чрезвычайных ситуациях и описание выполняемых и не выполняемых потерях.

Запуск всего комплекса мер подразумевает запуск в продакшен всей системы, проверка как работает эта система. Как одна из проверок работоспособности системы есть периодическая проверка, например, на проникновение, так называемый Penetration test. При работе системы обязательно будет анализироваться ее работа и как следствие будет появляться улучшения, что будет в свою очередь запускать по новой процесс улучшения информационной безопасности.

Представим более детальное описание блок-схемы, а именно части схемы “Сбор и анализ данных”

Для построения эффективной и безопасной ИТ инфраструктуры необходимо понимать какие бизнес-процессы будут ее использовать и как. Для этого необходимо их описать.

Бизнес-процесс – это регулярно повторяющаяся последовательность взаимосвязанных мероприятий (операций, процедур, действий), при выполнении которых используются ресурсы внешней среды, создается ценность для потребителя и выдается ему результат.

Потребитель может быть как внешним, так и внутренним по отношению к организации. *Внешний потребитель* – это потребитель, который не входит в состав данной организации, а *внутренний* – тот потребитель, который находится в рамках данной организации.

Подробная классификация бизнес-процессов имеет следующий вид: основные процессы, сопутствующие процессы, вспомогательные процессы, обеспечивающие процессы, управляющие процессы, процессы развития.

Основными бизнес-процессами являются процессы, ориентированные на производство товара или оказание услуги, являющиеся целевыми объектами создания предприятия и обеспечивающие получение дохода.

Сопутствующие процессы – процессы, ориентированные на производство товара или оказание услуги, являющиеся результатами сопутствующей основному производству производственной деятельности и

также обеспечивающие получение дохода.

Вспомогательные бизнес-процессы – процессы, предназначенные для обеспечения выполнения основных БП и поддержания их специфических черт.

Обеспечивающие бизнес-процессы – процессы, предназначенные для жизнеобеспечения всех остальных БП и ориентированные на поддержку их универсальных черт

Бизнес-процессы управления – это процессы, охватывающие весь комплекс функций управления на уровне каждого БП и бизнес-системы в целом. Это процессы стратегического, оперативного и текущего планирования, формирования и осуществления управленческих воздействий.

Бизнес-процессы развития – это процессы совершенствования производимого товара или услуги, технологий, модификации оборудования.

На рис. 2. мы видим Схему описания процесса. Схематически ее можно разделить на 5 главных частей.



Рис. 2 – Схема описания процесса

Бизнес-процесс – устойчивая, целенаправленная совокупность взаимосвязанных видов деятельности (последовательность работ), которая по определенной технологии преобразует входы в выходы по определенным правилам с помощью определенных механизмов.

В качестве входа процесса может быть информация (документ), товарно-материальная ценность или сотрудник (обычно, это процессы отдела кадров). В качестве выхода процесса могут быть все те же элементы, что и на входе, но уже преобразованные в определенное состояние в результате выполнения процесса.

Управление процесса – как правило, информация, которая определяет правила преобразования входов в выходы. Механизм процесса – то, что преобразует вход в выходы. Механизмами, как правило, являются сотрудники (структурные подразделения) организации и техника, на которой они работают (станки, оргтехника).

В таб.1 мы можем видеть разделение информационной безопасности на два направления, причем они могут работать одна независимо от другой, но наибольшей эффективности они достигнут в синергии друг с другом, потому как будут дополнять друг друга

Таблица 1 – Направления информационной безопасности

Активная безопасность	Пассивная безопасность
<ul style="list-style-type: none"> • Антивирусная безопасность • Разграничение прав • Система сетевой безопасности • Система противодействия сетевым атакам • Система антиспам • Патч-менеджмент 	<ul style="list-style-type: none"> • Система анализа сетевого трафика • Система анализа внутренней сетевой активности • Анализатор почты • Система анализа внесения изменений в критические процессы и узловые системы

К активной безопасности можно отнести такие типы безопасности как антивирусная безопасность, разграничение прав доступа, антиспам система и т.д., активной она называется так, потому что активно воздействует на все систему в целом.

Пассивная безопасность не менее важна, чем активная. Пассивной она называется, потому что она не воздействует на систему, а только собирает данные с нее и анализирует их.

К пассивной системе можно отнести такие системы как, например система анализа сетевого трафика, анализатор почты, система сбора лог-файлов, система анализа изменения, вносимые в конфигурации и критические процессы и узлы системы.

Детальнее разберем внедрение системы разграничения прав пользователей.

Этот процесс можно разбить на несколько процессов и представить в виде блок-схемы на рис. 3:



Рис. 3 – Внедрение системы разграничения прав доступа пользователей ИС

Первый блок будет “Определение ролей пользователей и объектов ИС”. Формирование ролей призвано определить четкие и понятные для пользователей компьютерной системы правила разграничения доступа. Ролевое разграничение доступа позволяет реализовать гибкие, изменяющиеся динамически в процессе функционирования компьютерной системы правила разграничения доступа.

Второй блок “Определение правил взаимодействия объектов и ролей”. Определим правила, по которым будут взаимодействовать роли с объектами системы. В третьем блоке анализируем взаимодействие объектов и ролей ИС между собой, как это будет проходить и что для этого взаимодействия еще необходимо. В четвертом блоке описываем и формализуем информацию, полученную в процессе внедрения системы разграничения прав на основе ролей. В последнем блоке непосредственно уже вносим изменения в саму ИС.

Подробнее остановимся на ролевой модели предоставления доступа.

При использовании ролевой политики управление доступом осуществляется в две стадии:

Во-первых, для каждой роли указывается набор полномочий, представляющий набор прав доступа к объектам.

Во-вторых, каждому пользователю назначается список доступных ему ролей.

Формирование ролей призвано определить четкие и понятные правила разграничения доступа. Ролевое разграничение доступа позволяет реализовать гибкие, изменяющиеся динамически правила разграничения доступа.

Несмотря на то, что Роль является совокупностью прав доступа, ролевое управление доступом отнюдь не является частным случаем избирательного

управления доступом, так как его правила определяют порядок предоставления доступа субъектам компьютерной системы в зависимости от имеющихся (или отсутствующих) у него ролей в каждый момент времени.

Так как привилегии не назначаются пользователям непосредственно и приобретаются ими только через свою роль (или роли), управление индивидуальными правами пользователя, по сути, сводится к назначению ему ролей. Это упрощает такие операции, как добавление пользователя или смена подразделения пользователем.

Рассмотрим ролевую модель предоставления доступа, описанную на математическом языке, ролевую модель можно представить, как несколько множеств, а именно:

U- множество пользователей,

R- множество ролей,

P- множество полномочий на доступ к объектам, представленное, например, в виде матрицы прав доступа

S- множество сеансов работ пользователей с системой.

Как можно видеть $PA \times P \times R$ отображает множество полномочий на множество ролей, устанавливая для каждой роли набор присвоенных ей полномочий. $UA \times U \times R$ отображает множество пользователей на множество ролей, определяя для каждого пользователя набор доступных ему ролей.

Множество назначений пользователей есть подмножество субъектов и ролей. Правила управления доступом ролевой политики безопасности определяются следующими функциями:

$user: S \rightarrow U$ - для каждого сеанса S эта функция определяет пользователя, который осуществляет этот сеанс работы с системой.

$user(s) = uroles: S \rightarrow P(R)$ - для каждого сеанса S эта функция определяет набор ролей из множества R

которые могут быть одновременно доступны пользователю в этом сеансе.

$$\text{roles}(s) = \{ri \mid (\text{user}(s), ri) \in \text{UA}\};$$

permissions: $S \rightarrow P$ - для каждого сеанса S эта функция задает набор доступных в нем полномочий, который определяется как совокупность полномочий всех ролей, задействованных в этом сеансе: $\text{permissions}(s) = U \in \text{roles}(s) \{Pi, (Pi, r) \in PA\}$.

Математическая модель, описывающая поведение системы в условиях воздействия злоумышленного ПО. Разберем более детально, как может себя повести система при вирусном заражении. Возьмем за пример модель Прогрессивную (Подозрительный-зараженный-обнаруженный-вылеченный-топология) или сокращенно PSIDRT. Всю систему мы можем описать как сумму количества уязвимых, зараженных и вылеченных объектов.

Мы выделяем 2 этапа:

1) Только заражение объектов (модель идентична модели SI)

2) Добавление фактора лечения, при этом вылеченные узлы не заражаются повторно.

Обобщенная структура компьютерной системы может быть представлена с помощью выражения:

$$N = S(t) + I(t) + D(t) + R(t),$$

где N – общее количество объектов в системе; $S(t)$ – количество уязвимых объектов; $I(t)$ – количество зараженных объектов; $R(t)$ – количество вылеченных объектов, обладающие иммунитетом; $D(t)$ – количество объектов, в которых обнаружен вирус.

Модель характеризуется наличием четырех типов объектов управления: зараженные (I), не зараженные (S), вылеченные объекты, обладающие иммунитетом (R), и количество объектов, в которых обнаружен вирус (D).

Выводы

1. Нами были рассмотрены только основные три составляющие информационной безопасности, внедрение которых в совокупности может решить около 80 % всех проблем информационной безопасности.

2. В вопросе построения устойчивой и безопасной ИТ-инфраструктуры необходимо находить баланс между защищенностью и бизнес-ориентацией ИТ-инфраструктуры, так как чем сложнее система информационной безопасности, тем сложнее пользователю бизнес-процессов ее использовать и как следствие падает КПД бизнес-процессов.

Список литературы:

1. Котенко, И. В. Перспективные направления исследований в области компьютерной безопасности [Текст] / И. В. Котенко, Р. М. Юсупов // Защита информации. Инсайд. – 2006. – Т. 2, № 6. – С. 46–57.
2. Чипига, А. Ф. Оценка эффективности защищенности автоматизированных систем от несанкционированного доступа

- [Текст] / А. Ф. Чипига, В. С. Пелешенко // Вестник СевКавГТУ. Серия «Физико-химическая». – 2004. – №1 (8). – С. 40.
3. Мещеряков, Р. В. Основы информационной безопасности [Текст] / Р. В. Мещеряков, А. А. Шелупанов, Е. Б. Белов, В. П. Лось. – М.: Горячая линия–Телеком, 2006. – 544 с.
4. Шварцман, В. О. Количественная оценка защищенности информации и сетей святы от несанкционированных действий [Текст] / В. О. Шварцман, // В. О. Шварц / Электросвязь. – 2008. – № 5. – С. 5–8.
5. Нечунаев В. М. Методика описания корпоративной информационной системы для процедуры управления рисками информационной безопасности [Текст] // В. М. Нечуев / Доклады ТУСУРа. – 2008. – № 2 (18). – С. 116–117.
6. Домарев, В. В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты [Текст] / В. В. Домарев. – Киев: ТИД ДиаСофт, 2002. – 688 с.
7. Давыдов, И. В. Формализация модели совершения киберпреступлений, совершаемых с использованием вредоносных кодов [Текст] / И. В. Давыдов, А. А. Шелупанов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 126–129.
8. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов [Текст] / В. В. Репин, И. В. Елиферов. – «Манн, Иванов и Фербер», 2012. – 544 с.
9. Щеглов А. Ю. Защита компьютерной информации от несанкционированного доступа [Текст] / А. Ю. Щеглов. – Наука и Техника, 2004. – 384 с.
10. Вентцель, Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва: Академия, 2003. – 448 с.

References

1. Kotenko, Y. V. (2006). Prospective areas of research in the field of computer security. Data protection. Inside, 2 (6), 46–57.
2. Chyrygha, A. F. (2004). Evaluation of the effectiveness of the protection of automated systems from unauthorized access. Vestnyk SevKavGhTU. Seryja «Fyzykohymycheskaja», 1 (8), 40.
3. Meshcheryakov, R. V., Shelupanov, A. A., Belov, E. B., Los, V. P. (2006). Fundamentals of Information Security. Moscow: Hot line-Telecom, 544.
4. Shvartsman, V. O. (2008). Quantitative assessment of information security and holy networks from unauthorized actions. Electrosvyaz, 5, 5–8.
5. Nechunayev, V. M. (2008). Method of describing the corporate information system for the information security risk management procedure. Reports of TUSUR, 2 (18), 116–117.
6. Domarev, V. V. (2001). The security of information technology. Methodology of creating protection systems. Kiev: TID DiaSoft, 688.
7. Davydov, I. V., Shelupanov, A. A. (2006). Formalization of the model of committing cybercrime committed with the use of malicious codes. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 309 (8), 126–129.
8. Repin, V. V., Eliferov, V. G. (2012). Process approach to management. Modeling of business processes. «Mann, Ivanov i Ferber», 544.
9. Shcheglov, A. Y. (2004). Protection of computer information from unauthorized access. Science and Technology, 383.
10. Venttsel, E. S., Ovcharov, L. A. (2003). Applied Problems of Probability Theory. Moscow: Academy, 448.

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Побудова безпечної інформаційної інфраструктури як необхідність виживання/ О. Г. Оксіюк, Я. В. Шестак, Д. О. Огбу // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 50(1222). – С.112–117. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Построение безопасной информационной инфраструктуры как необходимость выживания/ А. Г. Окснюк, Я. В. Шестак, Д. О. Огбу// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.112–117. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Building a secure information infrastructure as a necessity for survival/ A. G. Oksiuk, Y.V. Shestak, J. O. Ogbu//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P. 112–117. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Окснюк Олександр Глібович - доктор технічних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, професор, завідувач кафедри «Кібербезпеки та захисту інформації»; вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; e-mail: o.oksiuk@gmail.com.

Шестак Яніна Володимирівна - аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, кафедра «Кібербезпеки та захисту інформації»; вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; e-mail: lucenko.y@ukr.net.

Огбу Джеймс Онигван – аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, кафедра «Кібербезпеки та захисту інформації»; вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033; e-mail: jamesybone@yahoo.com.

Окснюк Александр Глебович - доктор технических наук, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, профессор, заведующий кафедрой «Кибербезопасности и защиты информации»; ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033; e-mail: o.oksiuk@gmail.com.

Шестак Янина Владимировна - аспирант, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, кафедра «Кибербезопасности и защиты информации»; ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033.

Огбу Джеймс Онигван - аспирант, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, кафедра «Кибербезопасности и защиты информации»; ул. Владимирская, 60, г. Киев, Украина, 01033; e-mail: jamesybone@yahoo.com.

Oksiuk Alexandr Glebovich - doctor of technical science, Taras Shevchenko National University of Kyiv, professor, head of «Cyber security and information protection»; Volodymyrska str., 60, City of Kyiv, Ukraine, 01033.

Shestak Yanina Vladimirovna - PG student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, department «Cyber security and information protection»; Volodymyrska str., 60, City of Kyiv, Ukraine, 01033; e-mail: lucenko.y@ukr.net.

James Ogbu - PG student, Taras Shevchenko National University of Kyiv, department «Cyber security and information protection»; Volodymyrska str., 60, City of Kyiv, Ukraine, 01033; e-mail: jamesybone@yahoo.com.

УДК 621.74

Ю. В. ОРЕНДАРЧУК, А. А. КРАСНОУХОВА, І. О. АЧКАСОВ, А. С. БАРСУК, В. І. ГОЛОВКО

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ФОРМУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

На основі гребеневого аналізу вирішена оптимізаційна задача щодо визначення параметрів формувальної суміші типу холоднотвердіючої суміші (ХТС). В якості критеріїв оптимізації обрано максимум живучості та мінімум осипає мості суміші. Вхідними змінними обрано вміст у суміші рідкого скла та пропилен карбонату. Показано, що теоретично можна досягти максимального значення живучості 15,5 хв і мінімального значення осипає мості 0,04 %. Отримані результати можуть бути використані в автоматизованому виробництві формувальної суміші для підвищення якості литих деталей ДВЗ.

Ключові слова: двигуни внутрішнього згорання, формувальна суміш, холоднотвердіючої суміш, гребневий аналіз

На основе комбинированный анализа решена оптимизационная задача по определению параметров формовочной смеси типа холоднотвердеющих смеси (ХТС). В качестве критериев оптимизации выбрана максимум живучести и минимум осыпае мосту смеси. Входными переменными избран содержание в смеси жидкого стекла и пропилен карбоната. Показано, что теоретически можно достичь максимального значения живучести 15,5 мин и минимального значения осипаемости 0,04%. Полученные результаты могут быть использованы в автоматизированном производстве формовочной смеси для повышения качества литых деталей ДВС.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, формовочная смесь, холоднотвердеющих смесь, комбинированный анализ

On the basis of the combined analysis, an optimization problem is solved to determine the parameters of a molding mixture of the cold-hardening mixture (CHM) type. As a criterion of optimization, the maximum of survivability and the minimum of the mixture shedding are chosen. The contents of liquid glass and propylene carbonate in the mixture are chosen as input variables.

It is shown that the maximum of the survivability of the mixture is achieved with the limitations imposed by the experimental design is about 15.3 min. But if remove the restrictions, then theoretically it can reach of 15.5 minutes.

The minimum of the mixture shedding, when there are limitations imposed by the experimental design, corresponds to about 0.05. But, if remove the restrictions, it can reach of a minimum about 0.04%.

The obtained results can be used in the automated production of molding mixture to improve the quality of cast parts of ICE.

Keywords: internal combustion engines, molding mixture, cold-hardening mixture, combined analysis

© Ю. В. Орендарчук, А. А. Красноухова, І. О. Ачкасов, А. С. Барсук, В. І. Головка. 2016

Вступ. Серед головних напрямків щодо вдосконалення процесів конструкторсько-технологічної підготовки виготовлення литих деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) одне з перших місць займає комп'ютерно-інтегроване проектування оснастки. При цьому варто виділити такі напрями, як розробка 3D-моделі деталі та моделювання процесів заповнення форм та кристалізації [1–4], експериментальне підтвердження результатів комп'ютерного моделювання та виявлення на їх основі локальних місць формування внутрішніх дефектів [5, 6]. Результати такого моделювання повинні враховувати в якості вхідних даних параметри формувальної суміші, як такої, що формують якість внутрішньої та зовнішніх поверхонь литих деталей та впливають на якість самих розрахунків. Такі заходи можуть розглядатися як основа для створення автоматизованого виробництва литих деталей ДВЗ, тому відповідні дослідження є актуальними.

Аналіз літературних даних. Питання формування заданих властивостей литих деталей ДВЗ розглядаються в різних напрямках – від вдосконалення конструкцій, до підбору матеріалу сплаву та суто ливарних технологій, що впливають на можливості отримання заданої конструкції деталей ДВЗ. Так, серед спеціальних заходів, що можуть бути вживані для зменшення металоємності та зменшення масогабаритних характеристик готових деталей, автори робіт [7–9] виділяють технологічні процеси виготовлення високоміцного чавуну. Автори робіт [10–12] роблять акцент на підбір рецептури та на його основі синтез формувальних сумішей, що забезпечують високу якість поверхонь литих деталей, а в роботах [13–16] говориться про необхідність математичного моделювання технологічних процесів як основи для розробки оптимальних технологічних рішень щодо виготовлення литих деталей для умов автоматизованого виробництва. Зокрема це стосується умов, коли не усі параметри технологічних процесів можуть бути виміряні з заданою точністю та у режимі реального часу. Тож можна зробити висновок, що необхідно вміти визначати оптимальні режими технологічних процесів, зокрема тих, що стосуються виготовлення формувальних сумішей для литих деталей ДВЗ.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення оптимальних технологічних параметрів виготовлення формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей ДВЗ.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- вибір пріоритетних властивостей сумішей та аналіз математичних моделей, що пов'язують рецептуру із властивостями;
- проведення гребеневого аналізу відповідних математичних моделей.

Вибір пріоритетних властивостей сумішей та аналіз математичних моделей з метою оптимізації. Для вибору пріоритетних властивостей зауважимо, що в рамках автоматизованого виробництва доцільно використовувати холоднотвердіючі суміші (ХТС), що мають в своєму складі рідке скло та пропілен карбонат. Використання каталізатору дозволяє прискорити процеси твердіння суміші, що дуже важливо з точки

зору забезпечення високої продуктивності. Тому серед головних властивостей, підлягають оптимізації і живучість та осипаємість сумішей.

Тому скористаємося математичними моделями, що наведені в роботі [13], та описують залежність названих вихідних функцій від концентрації рідкого скла з діапазону (мас.ч) (3–4) і пропілен карбонату з діапазону (мас.ч) (0,3–0,4):

$$y_1 = 14,5 + 0,42x_1 + 0,17x_2 + 0,03(x_1^2 - 0,67) - 0,22(x_2^2 - 0,67), \quad (1)$$

$$y_2 = 0,11 - 0,07x_1 + 0,02x_2 + 0,05(x_1^2 - 0,67) + 0,01(x_2^2 - 0,67) - 0,03x_1x_2, \quad (2)$$

де x_1 – вміст рідкого скла, мас.ч, x_2 – вміст пропіленкарбонату, мас.ч., y_1 – живучість суміші, хв., y_2 – осипаємість суміші, %.

Моделі (1) та (2) записані в явному вигляді, трансформуючи їх з неявного опису [13].

Для знаходження оптимальних параметрів скористуємось параметричним описом гребеневого аналізу, описаного в роботі [17]. Рішення оптимізаційної задачі при цьому має наступний вигляд:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r(\lambda) = \sqrt{x^* x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a^1 x^* + x^* A x^*, \end{cases} \quad (3)$$

де a_i – коефіцієнти регресійних рівнянь (1) та (2),

λ – власні числа матриці A ,

$x^*(\lambda)$ – оптимальні значення вхідних змінних,

$r(\lambda)$ – радіус умовного циліндру в факторному просторі, що вводиться для визначення обмежень на вхідні змінні,

$y^*(\lambda)$ – оптимальні значення вихідних змінних.

На рис. 1, 2 показано рішення оптимізаційної задачі у графічному вигляді, причому наведені лінії гребенів, що описують множину локальних оптимізаційних точок, на основі третього рівняння з параметричного опису (3).

Графіки, що відповідають першому та другому рівнянням аналітичного опису (3) не наведені, так як вони представляють собою проміжні результати моделювання, а їх кількісна оцінка може бути зроблено безпосереднього з графічного опису рис. 1, 2.

Для визначення оптимальних значень вхідних змінних достатньо визначити з графіків рис. 1, 2 величини радіусу r для мінімальних значень вихідних змінних та зробити перерахунок за допомогою другого рівняння з аналітичного опису (3).

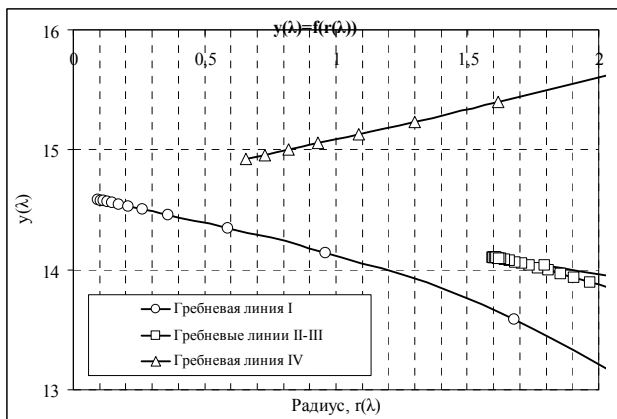


Рис. 1 – Результати гребневого аналізу по визначенню оптимальних за критерієм максимуму живучості значень вхідних змінних технологічного процесу

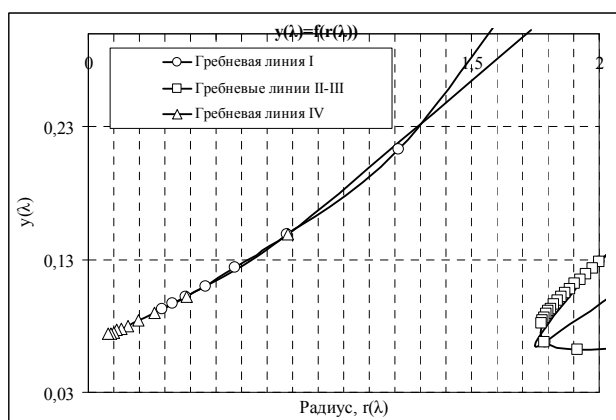


Рис. 2. Результати гребневого аналізу по визначенню оптимальних за критерієм мінімуму осипаємості суміші значень вхідних змінних технологічного процесу

Обговорення результатів. Результати гребневого аналізу у вигляді графіків рис. 1, 2 дозволяють зробити ряд принципів висновків. Зокрема, як видно з рис. 1, максимум живучості суміші досягається на гребневій лінії IV та при наявності обмежень, що накладаються планом експерименту, складає приблизно 15,3 хв. Але якщо зняти обмеження, то теоретично можна досягти значення 15,5 хв.

Як слідує з рис. 2., мінімум осипаємості суміші при наявності обмежень, що накладаються планом експерименту, досягається на гребневій лінії IV та відповідає приблизно 0,05. Але, якщо зняти обмеження, то можна досягти мінімуму приблизно 0,04 % – це слідує з вигляду гребневої лінії II–III для $r=1,9$.

Висновки. На основі використання гребневого аналізу встановлено оптимальні параметри технологічного процесу виготовлення холоднотвердіючої суміші, зокрема значення вмісту рідкого скла та пропілен карбонату в рецептурі. Показано, що максимум живучості суміші досягається при наявності обмежень, що накладаються планом експерименту, складає приблизно 15,3 хв. Але якщо зняти обмеження, то теоретично можна досягти значення 15,5 хв.

Мінімум осипаємості суміші при наявності обмежень, що накладаються планом експерименту, від-

повідає приблизно 0,05. Але, якщо зняти обмеження, то можна досягти мінімуму приблизно 0,04 %.

Отримані результати можуть бути використані в автоматизованому виробництві формувальної суміші для підвищення якості литих деталей ДВЗ.

Література

1. Алехин, В. И. Моделирование литейных процессов при изготовлении автомобильных поршней [Текст] / В. И. Алехин, А. В. Белозуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Цветные металлы. – 2010. – № 8. – С. 81–83.
2. Алехин, В. И. Компьютерно-интегрированное моделирование литейных процессов в автомобильных поршнях на основе конструкторско-технологической методики проектирования деталей ДВС [Текст] / В. И. Алехин, А. В. Белозуб, А. П. Марченко, О. В. Акимов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 2. – С. 101–104.
3. Краснокутский, Е. А. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации литой детали в кокиле [Текст] / Е. А. Краснокутский // Технологический аудит и резервы производства – 2012. – № 1/1 (3). – С. 3–8
4. Савченко, Ю. Э. Применение компьютерно-интегрированных систем и технологий в производстве поршней [Текст] / Ю. Э. Савченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – № 1/1 (3). – С. 8–13.
5. Акимов, О. В. Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование материалов для блок-картера ДВС [Текст] / О. В. Акимов, А. П. Марченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 5/1 (35). – С. 52–57.
6. Пономаренко, О. И. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации как резерв повышения качества поршней ДВС [Текст] / О. И. Пономаренко Н. С. Тренёв // Технологический аудит и резервы производства – 2013. – № 6/2 (14). – С. 36–40.
7. Хрычиков, В. Е. Влияние комбинированной кокильно-песчаной литейной формы на затвердевание и формирование макроструктуры в крупных отливках из высокопрочного чугуна [Текст] / В. Е. Хрычиков, Н. П. Котешов // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 12.
8. Хрычиков, В. Е. Газообразующие вещества для прибылей со сверхатмосферным давлением [Текст] / В. Е. Хрычиков, В. Ю. Селиверстов, И. А. Осипенко // Теория и практика металлургии. – 2002. – № 1. – С. 60–62.
9. Хрычиков, В. Е. К вопросу образования шаровидного графита при модифицировании чугуна магнием [Текст] / В. Е. Хрычиков // Литейное производство. – 1997. – № 2. – С. 5–7.
10. Евтушенко, Н. С. Исследование свойств регенерируемых смесей на основе ОФОС [Текст] / Н. С. Евтушенко, О. И. Шинский, О. И. Пономаренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4. – С. 48–51.
11. Берлизова, Т. В. Влияние фурфуролилпропиленкарбонатов (ФОПЦК) с различными добавками на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле [Текст] / Т. В. Берлизова, О. И. Пономаренко, А. М. Каратеев, Д. А. Литвинов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 26–29.
12. Пономаренко, О. И. Влияние жидких отвердителей с разными добавками на свойства жидкостекольных смесей [Текст] / О. И. Пономаренко, Н. С. Евтушенко, Т. В. Берлизова // Литейное производство. – 2011. – № 4. – С. 21–24.
13. Коваленко, Б. П. Оптимизация состава холоднотвердеющих смесей (ХТС) с пропиленкарбонатом [Текст] / Б. П. Коваленко, Д. А. Дёмин, А. Б. Божко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 6. – С. 59–61.
14. Акимов, О. В. Повышение качества литых деталей ДВС: учет технологических аспектов автоматизированного литейного производства [Текст] / О. В. Акимов, О. С. Коваль, А. А. Пуляев, Е. П. Дымко, Т. О. Егоренко, С. В. Высоцкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/1 (67) – С. 56–62. doi: [10.15587/1729-4061.2015.56039](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56039)
15. Дёмин, Д. А. Типизация математического описания в задачах синтеза оптимального регулятора технологических параметров литейного производства [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/4 (67) 2014 – С. 43–56. Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/21203/19147>

16. Демин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Демин // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 15–23.
17. Демин, Д. А. Адаптивное моделирование в задаче поиска оптимального управления термовременной обработкой чугуна [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 6, № 4 (66). – С. 31–37. – Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/19453/17110>

References

- Aljohin, V. I., Belogub, A. V., Marchenko, A. P., Akimov, O. V. (2010). Modelirovanie litejnyh processov pri izgotovlenii avtomobil'nyh porshnej. *Cvetnye metally*, 8, 81–83.
- Aljohin, V. I., Belogub, A. V., Marchenko, A. P., Akimov, O. V. (2009). Komp'juterno-integrirovannoe modelirovanie litejnyh processov v avtomobil'nyh porshnjah na osnove konstruktorsko-tehnologicheskoy metodiki proektirovaniya detalej DVS. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2, 101–104.
- Krasnokutskij, E. A. (2012). Komp'juternoe modelirovanie processov kristallizacii litoj detali v kokile. *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 1 (1 (3)), 3–8.
- Savchenko, Ju. Je. (2012). Primenenie komp'juterno-integrirovannyh sistem i tehnologij v proizvodstve porshnej. *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 1 (1 (3)), 8–13.
- Akimov, O. V., Marchenko, A. P. (2008). Jeksperimental'nye issledovaniya i komp'juternoe modelirovanie materialov dlja blok-kartera DVS. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 5 (1 (35)), 52–57.
- Ponomarenko, O. I., Trenjov, N. S. (2013). Komp'juternoe modelirovanie processov kristallizacii kak rezerv povysheniya kachestva porshnej DVS. *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 6 (2 (14)) 36–40.
- Hrychikov, V. E., Koteshev, N. P. (1994). Vlijanie kombinirovannoj kokil'no-peschanoj litejnoj formy na zatverdevanie i formirovanie makrostruktury v krupnih otlivkah iz vysokoprochnogo chuguna. *Litejnoe proizvodstvo*, 12, 12.
- Hrychikov, V. E., Seliverstov, V. Ju., Osipenko, I. A. (2002). Gazoobrazujushhie veshhestva dlja pribylej so sverhatmosfernym davleniem. *Teorija i praktika metallurgii*, 1, 60–62.
- Hrychikov, V. E. (1997). K voprosu obrazovaniya sharovidnogo grafita pri modifizirovanii chuguna magniem. *Litejnoe proizvodstvo*, 2, 5–7.
- Evtushenko, N. S., Shinskij, O. I., Ponomarenko, O. I. (2013). Issledovanie svojstv regeneriruemym smesem na osnove OFOS. *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie*, 4, 48–51.
- Berlizeva, T. V., Ponomarenko, O. I., Karateev, A. M., Litvinov, D. A. (2013). Vlijanie furfuraloksiopropilciklokarbonatov (FOPCK) s razlichnymi dobavkami na svojstva holdnotverdejushhij smesem na zhidkom stekle. *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie*, 3, 26–29.
- Ponomarenko, O. I., Evtushenko, N. S., Berlizeva, T. V. (2011). Vlijanie zhidkih otverditelej s raznymi dobavkami na svojstva zhidkostekol'nyh smesem. *Litejnoe proizvodstvo*, 4, 21–24.
- Kovalenko, B. P., Demin, D. A., Bozhko, A. B. (2006). Optimizacija sostava holdnotverdejushhij smesem (HTS) s propilenkarbonatom. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 6, 59–61.
- Akimov, O. V., Koval', O. S., Puljaev, A. A., Dymko, E. P., Yehorenko, T. O., Vysockij, S. V. (2015). Quality improvement of cast parts of ice: accounting technological aspects of the automated foundry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (78)), 56–62. doi: [10.15587/1729-4061.2015.56039](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56039)
- Demin, D. A. (2014). Tipizacija matematicheskogo opisaniya v zadachah sinteza optimal'nogo reguljatora tehnologicheskij parametrov litejnogo proizvodstva. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 1(4(67)), 43–56. Available at: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/21203/19147>
- Demin, D. A. (2013). Nечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости. *Problemy mashinostroeniya*, 16 (6), 15–23.
- Demin, D. A. (2013). Adaptivnoe modelirovanie v zadache poiska optimal'nogo upravleniya termovremennoj obrabotkoj chuguna. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 6 (4 (66)), 31–37. – Available at: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/19453/17110>

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація складу формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей двигунів внутрішнього згорання/ Ю. В. Орендарчук, А. А. Красноухова, І. О. Ачкасов, А. С. Барсук, В. І. Головка// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.117–121. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Оптимизация состава формовочных смесей для автоматизированного производства литых деталей двигателей внутреннего сгорания/ Ю. В. Орендарчук, А. А. Красноухова, И. О. Ачкасов, А. С. Барсук, В. И. Головка// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.117–121. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Optimization of molding compounds for computer-cast parts of internal combustion engines/ Y. Orendarchuk, A. Krasnoukhova, I. Achkasov, A. Barsuk, V. Holovko//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.117–121. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Орендарчук Юлія Владимировна – аспірант, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Красноухова Анастасія Александровна – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Ачкасов Игор Александрович – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Барсук Андрей Сергеевич – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Головко Вадим Ігоревич – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Орендарчук Юлія Володимирівна – аспірант, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Красноухова Анастасія Олександрівна – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Ачкасов Ігор Олександрович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Барсук Андрій Сергійович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Головко Вадим Ігоревич – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Orendarchuk Yuliia – graduate student, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Krasnoukhova Anastasiia – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Achkasov Ihor – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Barsuk Andrii – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Holovko Vadym – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.625.28

А. В. НЕКРАСОВ, В. О. ЧОРНА, Є. М. КАС'ЯНОВ

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ТА ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Проаналізовано відомі способи контролю температури обмоток тягових електричних двигунів. Розглянуто особливості функціонування існуючих пристроїв контролю температури тягових електричних двигунів рудничних електровозів та їх недоліки. Запропоновано спосіб безконтактного контролю та захисту тягових двигунів від перевищення температури. Розглянуто існуючі способи охолодження тягових двигунів. Встановлено недоліки існуючої системи охолодження тягових двигунів. Запропоновано спосіб примусового охолодження двигунів за рахунок нагнітання повітря всередину двигуна та оцінена його ефективність. Запропоновані способи дозволять підвищити надійність тягових двигунів та подовжити терміни їх експлуатації.

Ключові слова: електровоз, тяговий двигун, обмотка якоря, обмотка збудження, контроль, захист, надійність, температура, датчик, вимірювач

Проанализированы известные способы контроля температуры обмоток тяговых электрических двигателей. Рассмотрены особенности функционирования существующих устройств контроля температуры тяговых электродвигателей рудничных электровозов и их недостатки. Предложен способ бесконтактного контроля и защиты тяговых двигателей от превышения температуры. Рассмотрены существующие способы охлаждения тяговых двигателей. Встановлено недостатки существующей системы охлаждения тяговых двигателей. Предложен способ принудительного охлаждения двигателей за счет нагнетания воздуха внутрь двигателя и оценена его эффективность. Предложенные способы позволяют повысить надежность тяговых двигателей и продлить сроки их эксплуатации.

Ключевые слова: электровоз, тяговый двигатель, обмотка якоря, обмотка возбуждения, контроль, защита, надежность, температура, датчик, измеритель

The analysis of types of main and industrial railway transport, which is operated by the railway and enterprises of Ukraine, is carried out. The main reasons for the rapid failure of critical elements of traction electrical systems were identified.

The reliability of electric transport depends on the conditions of its operation and the availability of effective control and monitoring systems for the technical condition of the main equipment. The main elements of electric locomotives are traction electric motors. It is established that it is possible to increase the reliability of electric motors due to the qualitative control of the temperature state of the engines. The analysis of known methods for monitoring the temperature of winding of traction motors is carried out. Features of functioning of existing thermoregulating devices for traction motors are considered.

A method for monitoring and protecting traction motors from extreme temperatures is proposed. The developed control method will allow controlling the temperature of the motor windings without using bulky and inaccurate devices.

The analysis of existing cooling systems of traction engines is carried out and their shortcomings are established. A method for cooling the engine is proposed. The method consists in supplying air inside the engine through the holes in the bearing shield. By using this cooling method, it is possible to extend the life of the engine and increase its reliability.

Keywords: electric locomotive, traction motor, armature winding, excitation winding, monitoring, protection, reliability, temperature, sensor, measuring instrument.

Вступ. Більше третини в загальній собівартості видобутку руди підземним способом складають енергетичні затрати [1]. При цьому, на відміну від інших способів видобутку корисних копалин, електроенергетичні витрати складають близько 90%, в т.ч. до 16 % – це витрати на внутрішньошахтний транспорт. Між тим, в експлуатації наразі в шахтах України знаходиться близько чотирьох тисяч електровозів з застарілим обладнанням, яке потребує модернізації з урахуванням новітніх розробок. Крім цього, вітчизняні підприємства гірничо-металургійного комплексу з технологією підземного ведення робіт відносять до числа найнебезпечніших з огляду на можливість ураження електричним струмом та статистику виробничого травматизму (внаслідок дії цього чинника), яка в останні роки неспинно зростає [2, 3]. Зниження факторів неефективності функціонування електротехнічного комплексу, підвищення його експлуатаційної безпеки та надійності можливі за умови побудови й застосування сучасних систем управління його поточними електричними та технологічними параметрами при русі з використанням бездатчикових систем контролю.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Підвищення надійності роботи ТЕД неможливе без поточного контролю температурних режимів функціонування будь-яких типів електричних двигунів в тягових електротехнічних комплексах шахтних електровозів [4, 5]. Як свідчить досвід експлуатації магістральних електровозів, застосування лише системи безперервного температурного контролю режимів функціонування ТЕД дозволяє знизити відмови останніх на 30...35 % , виходи з ладу колекторів в 2,6...3,3 рази, кругових вогнів в них в 3,1...3,7 рази при загальному зменшенні колекторів в 2,8...3,4 рази [6]. Експлуатація ТЕД без систем контролю теплових режимів збільшує кількість їх відмов в 1,5...3,5 рази.

До відомих способів контролю температури ТЕД та побудови відповідних захистів відносяться: закладка в двигун датчиків температури; застосування теплових реле; непряма оцінка, яка базується на вимірюванні опорів обмоток двигуна або розрахунках втрат у двигуні.

© А. В. Некрасов, В. О. Чорна, Є. М. Кас'янов. 2016

Найбільш точним та найчастіше застосовуваним є метод безпосередньої оцінки температури обмотки або активної сталі за допомогою датчиків температури. Головними недоліками методу є: необхідність закладення датчиків в обмотки двигуна, що в умовах експлуатації без його розбирання неможливо; необхідність виведення з двигуна додаткових проводів, що в умовах жорсткої вібрації може призвести до їх ушкодження та відмов системи захисту.

Теплові реле раціонально застосовувати при захисті ТЕД з постійним або мало змінним навантаженням. При перевищенні струмів тривалого режиму теплові реле спрацьовують занадто швидко, що може спричинити «перегони автоматів», та непридатні для захисту ТЕД від перегріву.

Непряму оцінку нагрівання ТЕД можна здійснити за розрахунок втрат енергії в ТЕД за розрахунковий період. При застосуванні цього методу період роботи ТЕД розбивають на інтервали, протягом яких струм можна вважати сталим. В сучасних мікропроцесорних системах управління електровозів можна реалізувати безпосередню оцінку втрат енергії шляхом визначення еквівалентного струму. Якщо його значення перевищує номінальний струм тривалого режиму, спрацьовує захист, подаючи сигнал на відключення електропривода.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз пристроїв контролю температурних режимів тягових електродвигунів (ТЕД) та вимірювачів швидкості руху тягових електротехнічних комплексів.

Задачею досліджень є розробка вдосконалених схемних рішень вимірювання електромеханічних параметрів електровозів

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Аналіз місця найбільшого перевищення температури ТЕД.
2. Розробка ефективних та надійних способів контролю температурних параметрів ТЕД під час їх експлуатації.
3. Розробка способу охолодження ТЕД під час експлуатації.

Матеріал досліджень температурних параметрів тягових двигунів під час експлуатації. Найбільш доцільним для визначення температури обмотки двигуна є метод, заснований на властивості зміни опору обмотки в функції температури. Температура обмотки визначається за виразом:

$$T_z = \frac{r_z - r_x}{r_x} (k + T_x) + T_x, \quad (1)$$

де r_z , r_x – опори обмоток відповідно у гарячому та холодному станах; T_x – температура обмотки у холодному стані; k – конструктивний коефіцієнт (для мідної обмотки дорівнює 235, для алюмінієвої – 245).

Під час проведення значної кількості досліджень температурних режимів ТЕД встановлено, що критичний нагрів відбувається у обмотці якоря, спричинений низькою тепловіддачею двигунів закритого типу рудничного нормального РН типу використання. Це призводить до підвищеного нагріву двигуна й може вплинути нормальне функціонування усього електротехнічного

комплексу. Але процес точного контролю її температури стикається з певними технічними складнощами. Зважаючи на цей факт, доцільним є інший спосіб контролю температури обмотки якоря, заснований на непряму контролю температури якоря через опір обмотки збудження (ОЗ). Такий підхід пояснюється наступним чином: оскільки на тяговому рухомому складі в якості тягових двигунів використовуються двигуни постійного струму з послідовною обмоткою збудження, то струм, що протікає в обмотках якоря та збудження однаковий за величиною. Виходячи з цього, процеси нагрівання та охолодження в обмотках можна вважати однаковими, що дозволяє за температурою ОЗ визначити температуру якоря з достатньою ступінню точності.

Дослідження розподілу температур, проведені авторами, показали, що при максимально допустимій температурі обмотки якоря вона нагрівається на 25 °С вище, ніж ОЗ. Враховуючи, що допустима температура обмотки якоря для ізоляції класу F складає 155 °С, максимально допустима за нагріванням якоря температура ОЗ становить 130 °С. Тобто, на таку температуру повинна бути налаштована система захисту.

Матеріал досліджень системи примусового охолодження тягового двигуна. Як відомо, ТЕД в залежності від виду охолодження поділяються на закриті неvented, ТЕД з незалежною вентиляцією та самовентильовані. На електровозах, що експлуатуються на гірничих підприємствах України, застосовуються самовентильовані ТЕД з встановленими на валу вентиляторів. Таке рішення дозволило збільшити в 1,5 рази тривалу потужність ТЕД (рис. 1, крива 3). Але при такому способі охолодження через розташування вентиляційних вікон зверху двигуна разом з повітрям всередину попадає бруд, у тому числі вода та пил, що присутні в шахті. Крім того, в результаті аналізу ефективності існуючої системи охолодження двигуна ДТН-45 встановлено, що енергетичні можливості використовуються не повністю. У зв'язку з цим найбільш перспективним способом підвищення надійності ТЕД є застосування примусової вентиляції.

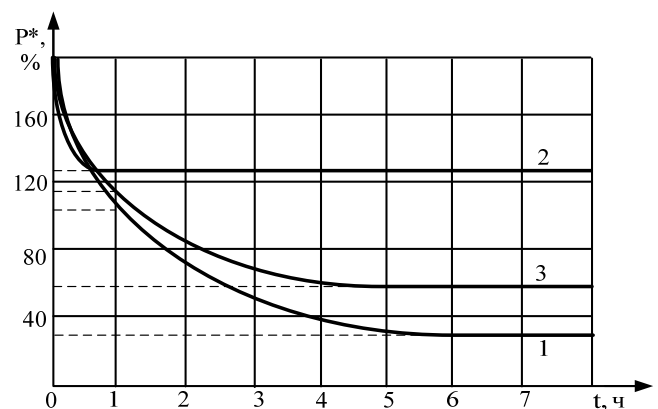


Рис. 1 – Залежність допустимого навантаження від тривалості при різних способах охолодження: 1 – природне, 2 – незалежне, 3 – самовентильована

Розроблений та запропонований спосіб охолодження двигуна полягає у подачі повітря через венти-

ляційні канали всередину з їх розподілом у міжполюсному просторі, повітряному просторі між якорем та полюсами, у аксіальних каналах якоря (рис. 2).

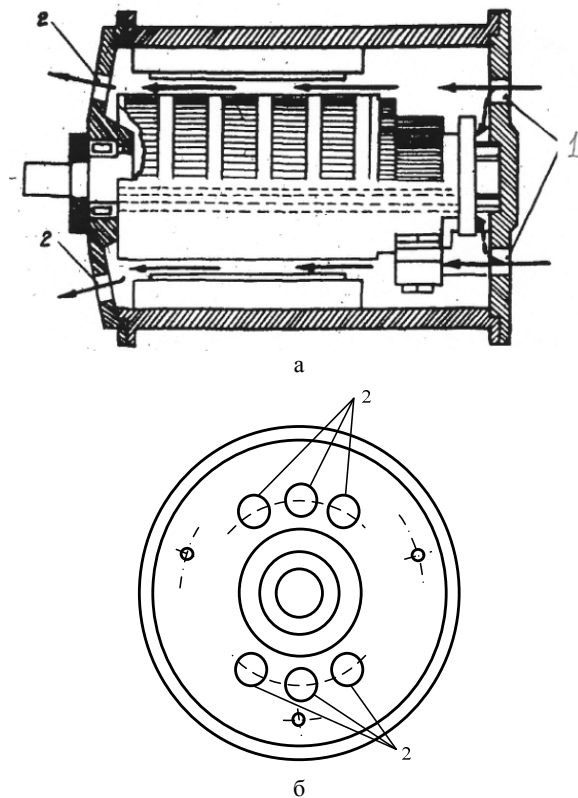


Рис. 2 – Запропонований варіант системи вентиляції двигуна ДТН-45: а – переріз двигуна; б – схема розташування отворів

Для вибору оптимальної кількості та величини отворів необхідно встановити кількість повітря, необхідного для достатнього охолодження двигуна:

$$Q_B = 60 \frac{10^3 \cdot \sum \Delta P}{\rho \cdot C_p \cdot \Theta_B}, \quad (2)$$

$$\sum \Delta P = I \cdot U \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_n}{I_n \cdot U_n}, \quad \Theta_B = \tau_{B2} - \tau_{B1},$$

де Q_B – витрата повітря; $\sum \Delta P$ – сумарні втрати потужності ТЕД; ρ – щільність повітря; C_p – питома теплоємність повітря; Θ_B – температура перегріву повітря; τ_{B2}, τ_{B1} – температура повітря відповідно на виході та вході ТЕД; η – ККД двигуна; P_n – номінальна потужність ТЕД; I_n, U_n – відповідно номінальний струм та напруга ТЕД.

Так, використовуючи дані залежності встановлено, що для охолодження досліджуваного ТЕД кількість повітря складає $5 \text{ м}^3/\text{хв}$. Таку величину витрат можна забезпечити за рахунок 6 отворів загальною площею 143 см^2 . При цьому, як встановлено під час експериментальних досліджень, на конструкційну надійність ТЕД це не впливає.

Результати досліджень системи захисту ТЕД від перегріву. В результаті проведених досліджень була розроблена схема захисту двигунів тягових електротехнічних комплексів від недопустимого підвищення температури. На рис. 3 представлено варіант реалізації схеми захисту ТЕД від перегрівання обмоток. Середнє значення напруги U знімають з ОЗ через коло, що складається з опорів $R1-R2$ та ємності C , яке обмежує імпульси напруги при комутаціях в силовому колі пристрою, що захищається. Середнє значення струму I , який протікає через ОЗ, визначають за допомогою шунта RS . Настроювання захисту на визначений опір та відповідну температуру здійснюють резистором підстройки $R3$. Блок пристрою захисту містить аналоговий інтегральний дільник, який виконує функцію ділення $U_{сер}/I_{сер}$ – тобто безперервно визначає величину опору обмоток. При досягненні значення опорів, який відповідає температурі ОЗ $130 \text{ }^\circ\text{C}$, захист спрацьовує, температура обмотки якоря при цьому сягає температури $155 \text{ }^\circ\text{C}$. Схема не потребує встановлення в ТЕД датчиків температури, оскільки безпосередньо ОЗ ТЕД є датчиком, що набагато спрощує та підвищує надійність захисту.

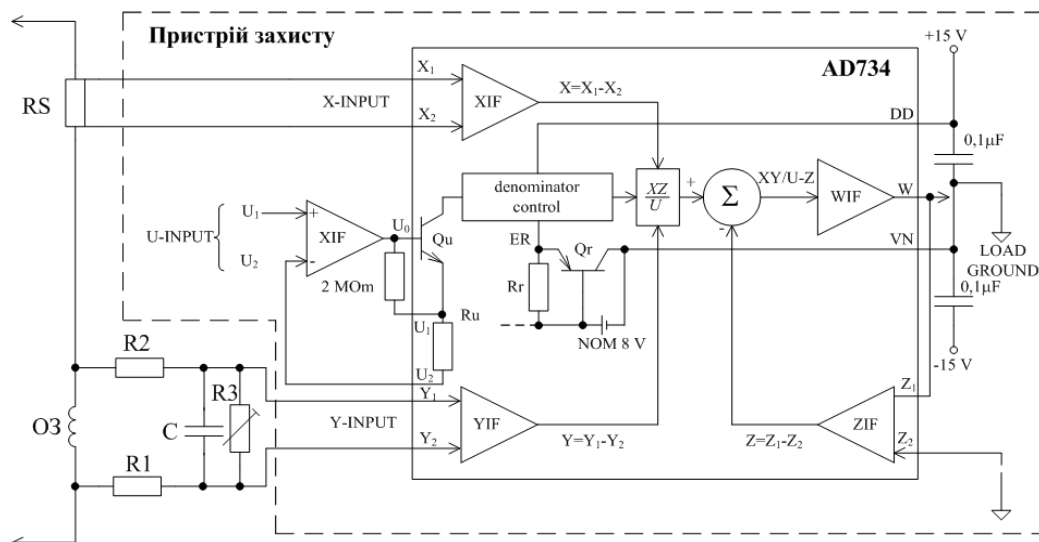


Рис. 3 – Схема захисту тягового двигуна електровоза від перегріву

Для підтвердження запропонованого способу контролю температури ТЕД та захисту від перегріву були проведені лабораторні дослідження. Для повної оцінки роботи системи контролю та захисту в ТЕД були закладені термопари. При цьому фактична температура обмотки якоря контролювалась за даними термопар, а обмотки збудження – визначалась через її опір та дублювалась за даними термопар. Дослідження показали, що при досягненні температури обмотки якоря 120°C спрацювала сигналізація, при цьому температура якірної обмотки досягла 140°C . При подальшій роботі ТЕД температура ОЗ збільшилась та досягла 130°C , що призвело до спрацювання захисту та відключення ТЕД від джерела живлення.

Дослідження ефективності запропонованого способу охолодження ТЕД (рис. 4) свідчить про те, що при нагнітанні всередину двигуна повітря значно знижується температура обмоток якоря, голосних та додаткових полюсів, при цьому температури ОЯ не перевищує 80°C .

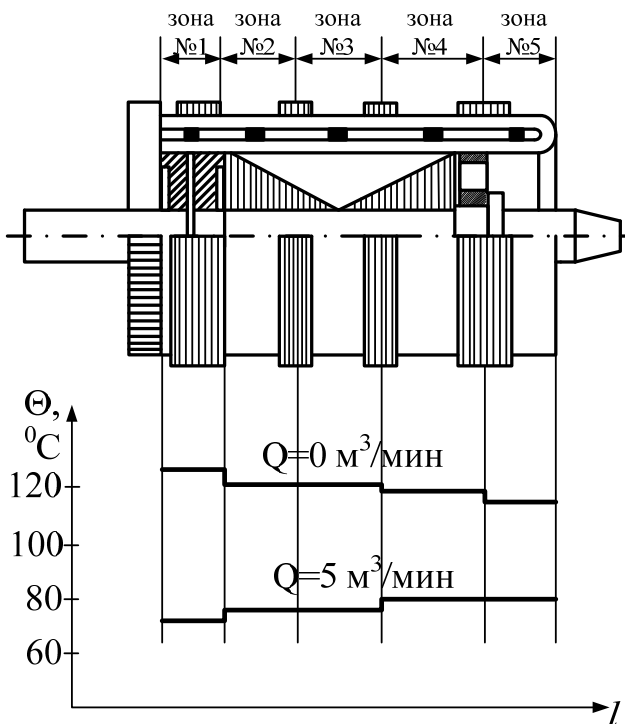


Рис. 4 – Розподіл температури обмотки ТЕД за довжиною при примусовому охолодженні та відсутності системи охолодження

Отже, з отриманих даних можна зробити висновок, що тепловіддача обмотки якоря збільшилась майже в 1,5 рази за рахунок вентиляції, що дозволяє природнім шляхом підвищити тривалу потужність та надійність ТЕД, збільшивши тим самим терміни міжремонтної експлуатації.

Висновки

1. В результаті досліджень проведений аналіз та оцінювання якісних показників функціонування пристроїв контролю температурних режимів, які застосовують в тягових електромеханічних системах з ТЕД

постійного струму послідовного збудження сучасних рудничних електровозів.

2. Запропоноване схемне рішення способу непрямого контролю температури обмотки якоря та захисту від її перевищення. Це дозволить при досягненні обмоткою якоря критичної температури 155°C спрацьовувати захисту та знеструмувати ТЕД, не допускаючи його роботу в аварійному режимі.

3. Запропонований спосіб примусового охолодження ТЕД без застосування додаткових механічних пристроїв дозволить в 1,5 рази збільшити тепловіддачу обмотки якоря, підвищивши надійність ТЕД.

Список літератури:

1. *Бабец, Е. К.* Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009–2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004–2011 гг [Текст] / *Е. К. Бабец, Л. А. Штанько, В. А. Салганик* – Кривой Рог: Издательский дом, 2011. – 329 с.
2. Електроотравитизм і шляхи його зменшення при експлуатації електрифікованих видів транспорту на підземних гірничорудних підприємствах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi_2011/0338.pdf
3. НПАОП 10.0-1.01-05. Правила безпеки у вугільних шахтах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dnaop.com/html/33608/doc-npaop-100-101-05-pravila-bezpeki-u-vugilynih-shahтах-ukr>
4. *Черная, В. О.* К вопросу анализа поврежденных тяговых двигателей шахтных электровозов [Текст]: первая Всеукраинская научно-техническая конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / *В. О. Черная* // Молодежь: наука и инновации, 2013. – С. 421–422.
5. *Волотковскій, С. А.* Рудничная электровозная тяга [Текст] / *С. А. Волотковскій*. – Москва: Недра, 1981. – 389 с.
6. *Носков, В. И.* Контроль и диагностика мотор-вагонных поездов с использованием нейронных сетей [Текст] / *В. И. Носков, М. В. Липчанский, В. С. Блиндаж* // Коммунальное хозяйство городов. – 2011. – № 101. – С. 278–283.
7. *Лагутін, В. М.* Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах [Текст] / *В. М. Лагутін, В. Ц. Зелінський, О. Б. Бурікін*. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 115 с.
8. *Хечинашвили, А.* Микропроцессорные системы безопасности химических источников тока [Текст]: VI межд. конф. / *А. Хечинашвили* // Фундаментальные проблемы электротехнической энергетики, 2005. – С. 406–408.
9. *Бутт, Ю. Ф.* Шахтный подземный транспорт: справочное издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт [Текст] / *Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелый, А. Н. Коваль, А. Л. Фурман, В. М. Шука, В. А. Яценко*. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.
10. *Розенфельд, В. Е.* Теория электрической тяги [Текст] / *В. Е. Розенфельд, И. И. Исаев, Н. К. Сидоров, М. С. Озеров*. – Москва: Транспорт, 1995. – 294 с.

Bibliography (transliterated):

1. Babec, E. K., Shtanko, L. A., Salganik, V. A. (2011). Compilation technical and economic parameters of mining enterprises of Ukraine in 2009- 2010 years. Analysis of the global IO market conditions 2004–2011. Krivoy Rog: Publishing House, 329.
2. Electrical injuries and ways to reduce the operation modes of transport on electrified underground mining enterprises. Available at: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi_2011/0338.pdf
3. NPAOP 10.0-1.01-05. Pravyla bezpeky u vuhilnykh shakhtakh. Available at: <http://dnaop.com/html/33608/doc-npaop-100-101-05-pravila-bezpeki-u-vugilynih-shahтах-ukr>
4. Chernaya, V. O. (2013). On the analysis of damage to electric traction motor shaft. First Ukrainian scientifically conference of students and young scientists, 421–422.
5. Volotkovskiy, S. A. (1981). Mine locomotive traction. Moscow: Nedra, 389.
6. Noskov, V. I., Lipchanskiy, M. V., Blindaj, V. I. (2011). Kontrol' i diagnostika motor-vagonnyh poezdov s ispol'zovaniem nejronnyh setej. Kommunal'noe hozjajstvo gorodov, 101, 278–283.

7. Lagutin, V. M., Zelinskiy, V. C., Burykin, O. B. (2010). Testing of electrical machines and transformers in power systems. Vinnica: VNTU, 115.
8. Hetchinashvili, A. (2005). Microprocessor security of chemical current sources. VI International Conference Fundamental Problems of the electrical power industry, 406–408.
9. Butt, Yu. F., Gryaduschiy, V. B., Debelyj, V. L., Koval, A. N., Furman, A. L. (2009). Mine underground transport: reference book. Mine locomotive and rail transport. Donetsk: «Vik», 481.
10. Rozenfeld, V. E., Isaev, I. I., Sidorov, N. K., Ozerov, M. S. (1995). Theory of electric traction. Moscow: Transport, 294.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Контроль температурних режимів та охолодження тягових двигунів електротехнічних комплексів в процесі експлуатації/ А. В. Некрасов, В. О. Чорна, Є. М. Кас'янов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.122–126. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Контроль температурных режимов и охлаждения тяговых двигателей электротехнических комплексов в процессе эксплуатации/ А. В. Некрасов, В. О. Черная, Е. М. Касьянов// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.122–126. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Controlling temperature and cooled traction motors electrical systems during operation/A. Nekrasov, V. Chorna, E. Kasyanov//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P.122–126 . – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Некрасов Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри електричних машин та апаратів, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600.

Чорна Вікторія Олегівна – кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри систем електроживлення та енергетичного менеджменту, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600, e-mail: chornajav@gmail.com.

Кас'янов Євгеній Михайлович – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, аспірант кафедри електричних машин та апаратів, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Україна, 39600.

Некрасов Андрей Викторович – кандидат технических наук, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры электрических машин и аппаратов, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600.

Черная Виктория Олеговна – кандидат технических наук, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры систем электропотребления и энергетического менеджмента, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600, e-mail: chornajav@gmail.com.

Касьянов Евгений Михайлович – аспирант, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, аспирант кафедры электрических машин и аппаратов, ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600.

Andrii Nekrasov – PhD, associate professor, Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University, Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600.

Chorna Viktoriya – PhD, associate professor, Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University, Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600, , e-mail: chornajav@gmail.com.

Evgenii Kasyanov – graduate student, Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University, Pershotravneva, 20, Kremenchuk, Ukraine, 39600.

УДК 664.12:303.446.33

О. В. ШКОЛЬНА, В. Д. КИШЕНЬКО, А. П. ЛАДАНИЮК

ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ СПОЖИВАННЯ ВТОРИННОЇ ПАРИ З ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ

Розглядається метод прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки, що може використовуватись при реалізації випереджувального керування випарною установкою як складовою теплотехнологічного комплексу цукрового заводу. Вибір методу для прогнозування часових рядів, а саме методу нечітких елементарних тенденцій, обґрунтовано та наведено приклад його реалізації в заданій предметній області. Також оцінено адекватність та точність розробленої моделі на основі нечітких елементарних тенденцій в заданій предметній області. Результати досліджень можуть бути використані при реалізації випереджувального керування випарною установкою.

Ключові слова: прогнозування часових рядів, нечіткі елементарні тенденції, випереджувальне керування, випарна установка.

Рассматривается метод прогнозирования динамики потребления вторичного пара из испарительной установки, который может использоваться при реализации упреждающего управления испарительной установкой как составной теплотехнологического комплекса сахарного завода. Выбор метода для прогнозирования временных рядов, а именно метода нечетких элементарных тенденций, обосновано и приведен пример его реализации в заданной предметной области. Также оценены адекватность и точность разработанной модели на основе нечетких элементарных тенденций в заданной предметной области. Результаты исследований могут быть использованы при реализации опережающего управления испарительной установкой.

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, нечеткие элементарные тенденции, упреждающее управление, выпарная станция.

In terms of control the evaporator system as a part of thermal technological complex at the sugar refinery is nonlinear, multidimensional, multiply, complex object. Therefore, the energy efficiency of its operations is advisable to use the methods and approaches to predictive control. For the implementation of predictive control, above all, necessary to solve the problem of time series prediction. The paper presents solved this problem by using a method of analysis and time series forecasting based on fuzzy basic trends. The method proved and an example of its implementation on the basis of time series values of the actuator position on burning steam defecator characterizing the dynamics of consumption of secondary steam from the evaporation unit for a particular customer. As a result, the resulting model for predicting time series based on this method, and assessed its adequacy and accuracy. Determined that the T-model, built by NET capable of successfully and adequately predict fuzzy basic trends and values of the time series position actuator supply second pair of evaporator station on burning defecator, and that the forecasting method can be used in the implementation of advanced control evaporators sugar factory.

Keywords: time series prediction, fuzzy basic trends, predictive control, evaporator.

Вступ. Існуючі системи автоматизації випарної установки [1–3] розглядають останню як складову технологічного комплексу цукрового заводу, метою якої є забезпечення необхідних показників якості вихідного продукту, тобто цукрового сиропу, але, крім цього, ВУ виконує і теплотехнічну функцію – забезпечення вторинною парою споживачів, тому, з метою підвищення енергоефективності ВУ та виробництва в цілому, варто при автоматизації ВУ розглядати її як складову теплотехнологічного комплексу, що одночасно виконує дві вищезазначені функції.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Дедалі частіше при вдосконаленні систем автоматизації використовують сучасні інтелектуальні методи [4, 5]. Останнім часом в промисловості набула розвитку методологія випереджувального керування [6], що заснована на вирішенні задач поточної оптимізації процесів в реальному часі при заданих технічних умовах. Алгоритм випереджувального керування заснований на розрахунку керувальних впливів на технологічний процес з метою оптимізації його майбутньої поведінки, від поточного моменту часу до певного горизонту прогнозу.

З точки зору керування випарна установка як складова теплотехнологічного комплексу цукрового заводу є нелінійною, багатомірною, багатозв'язною системою з складним характером перехідних процесів, що викликані, зокрема, технологічними режимами вироблення та використання енергетичних ресурсів, тому, для підвищення енергоефективності виробництва, доцільно використовувати методологію випереджувального керування. Для цього, в першу чергу, необхідно вирішити задачу прогнозування часових рядів ВУ.

Часто, при прогнозуванні часових рядів (ЧР), невизначеність поведінки моделюється в рамках стохастичних моделей на основі представлення ЧР, як реалізації випадкового процесу, але невизначеність поведінки не завжди може бути адекватно змодельована методами теорії випадковості, в цьому випадку застосовують інтелектуальні методи аналізу часових рядів, що активно використовують знання експертів [7]. Серед них - методи прогнозування ЧР з використанням нечіткого згладжування [8], метод побудови прогнозу на основі розв'язання системи рівнянь методом простих ітерацій; метод прогнозування ЧР на основі нейромережевого підходу [9]; прогнозування часових рядів на основі нечітких елементарних тенденцій [10]. Вибір методу прогнозування часових рядів обраної предметної області та його реалізація є актуальною задачею.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки.

Задачею дослідження є визначення методів та підходів, що дадуть можливість прогнозувати динаміку використання вторинної пари споживачами за межами ВУ, таких як: парові камери дифузії, різноманітні підігрівники, вакуум апарати та ін.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Визначити основний підхід до прогнозування динаміки споживання вторинної пари.
2. Обрати та реалізувати метод прогнозування ЧР для кожного зі споживачів вторинної пари.
3. Оцінити точність отриманого прогнозу та перспективу його використання.

Матеріали та методи прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки. Динаміку споживання вторинної пари з випарної установки можна оцінити аналізуючи динаміку використання вторинної пари кожного з споживачів вторинної пари, серед яких [11]: підігрівники соку перед ВУ першої, другої та третьої групи; вакуум апарати першого, другого та третього продукту; парові камери дифузії; пароконтактні підігрівники жомпресової води (№1 та №2); підігрівники соку I сатурації перед фільтрацією; підігрівники соку перед основною гарячою дефекацією (третьої та четвертої групи) та ін.. Саме зміна паровідбору для конкретного споживача з того чи іншого корпусу ВУ вносить збурення в роботу випарної установки та призводить до зміни динаміки споживання вторинної пари, тому для аналізу загальної динаміки зміни паровідбору з ВУ варто зосередитись на споживачах, витрата вторинної пари для яких є змінною величиною. Як правило, на цукрових заводах витратоміри в трубопроводах вторинної пари не встановлюють, тому оцінювати зміну витрати пари для таких споживачів пропонуємо за часовими рядами положення виконавчого механізму подачі пари на певний підігрівник. Споживачі, для яких не передбачено зміну паровідбору, на загальну динаміку витрати вторинної пари впливу не матимуть, а тому не потребують уваги в контексті поставленої задачі. Отже, щоб оцінити, або прогнозувати загальну динаміку споживання вторинної пари з ВУ необхідно виділити споживачів, паровідбір для яких є регульованою величиною та оцінити, або прогнозувати паровідбори для кожного з них. На основі прогнозованих значень паровідборів по кожному з динамічних споживачів оцінюється загальна динаміка споживання вторинної пари з ВУ.

Дедалі ширшого використання та розвитку здобувають інтелектуальні методи аналізу часових рядів, основою яких є нечітка модель часового ряду, яку називають [12] нечітким часовим рядом (НЧР). НЧР – це впорядкована послідовність спостережень, в яких за допомогою нечітких міток виражені значення, які приймає деяка змінна в певний момент часу. Моделювання розвитку процесу в лінгвістичних термінах проводиться на основі часового ряду нечітких тенденцій.

Для прогнозування будемо використовувати методи прогнозування часових рядів на основі нечітких елементарних тенденцій, що оперують наступними поняттями:

– нечітка елементарна тенденція (НЕТ) τ , визначена на \tilde{Y}_Δ , є сукупність впорядкованих пар $\tau = \{\tilde{y}_\Delta, \mu_\tau(\tilde{y}_\Delta)\}$, де $\mu_\tau(\tilde{y}_\Delta)$ – степінь приналежності \tilde{y}_Δ до НЕТ; $\tilde{y}_\Delta = \{\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_m\}$ – нечіткий часовий ряд лінгвістичної змінної $\tilde{Y}, T_y, U_y, G_y, M_y$; $\tilde{Y}_\Delta = \{\tilde{y}_\Delta\}$ – множина нечітких часових рядів однакової, або змінної довжини [10];

– часовий ряд нечіткої тенденції є впорядкована в часі нечітка множина $\tau_i = \{t, \mu_\tau(\tilde{y}_\Delta)\}$, де $\{\tilde{y}_\Delta\}$ –

множина нечітких часових рядів довжиною m , $\tilde{y}_\Delta = \{\tilde{y}_{t-m+1}, \dots, \tilde{y}_t\}$, $\tilde{y}_t \in \tilde{Y}$. Для лінгвістичної змінної «тенденція» часовий ряд визначають сукупністю значень усіх видів нечітких тенденцій [10]:

$$\tau_i = \{t, \tau_i^1, \dots, \tau_i^p\}; \quad (1)$$

– модель нечітких тенденцій (МНТ) з параметрами (n, p, m, l) визначають сукупністю компонент та рівнянь [13]:

$$\tilde{y}_i^i = \text{Fuzzy}[y_i], \quad y_i^i = \text{deFuzzy}[\tilde{y}_i^i], \quad (2)$$

$$\tau_i^j = \text{Tend}[\tilde{y}_{t-m_j+1}, \dots, \tilde{y}_t], \quad (3)$$

$$\tilde{y}_i^u = \text{deTend}[\tau_i, \dots, \tau_{i+m-1}], \quad (4)$$

$$\tau_i = f(\tau_{i-1}, \dots, \tau_{i-l}), \quad i = 1..n, \\ j = 1..p, \quad m = \max(m_j), \quad (5)$$

де $\tilde{y}_i = \{\tilde{y}_i^j\}$ – нечіткий часовий ряд; n – кількість термів нечіткого часового ряду; Fuzzy – функціонал фазифікації; $\tau_i = \{\tau_i^j\}$ – часовий ряд нечіткої тенденції; p – кількість термів нечіткої тенденції; m_j – інтервал визначення нечіткої тенденції; Tend – функціонал розпізнавання НЕТ; f – функціональна залежність; $\tilde{y}_i^u = \{\tilde{y}_i^u\}$ – нечіткий часовий ряд, що отриманий з часового ряду нечіткої тенденції; deTend – функціонал отримання нечіткого часового ряду з оцінки нечіткої тенденції; \tilde{y}_i^i – дефазифікований часовий ряд; deFuzzy – функціонал отримання чіткого часового ряду з НЧР.

Модель нечіткого ЧР задають розподілом нечіткості на універсальній множині, яка включає діапазон зміни значень ЧР. Розподіл нечіткості моделюється лінгвістичною змінною з заданою кількістю нечітких термів та отримують в результаті нечіткий часовий ряд значень (спостережень), який також називають «НЧР класу 1» [12], та нечіткий часовий ряд нечітких елементарних тенденцій (НЧР класу 2). Кожне значення нечітких ЧР класів 1 та 2 представляють нечітким термом (нечіткою множиною).

Для фазифікації числового ЧР та його перетворення в нечіткий ЧР класу 1 використовують АСЛ-шкалу (Absolute&Comparative Linguistic) [12, 13], що призначена для нечіткої оцінки спостережень, при цьому, абсолютні оцінки, отримані по АСЛ-шкалі, відповідають нечітким оцінкам (міткам) значень НЧР, а порівняльні оцінки відповідають нечітким різницям, тобто елементарним тенденціям НЧР.

В якості числового часового ряду візьмемо ЧР зміни положення виконавчого механізму, що регулює подачу вторинної пари з ВУ на гарячий дефекатор, що виражене у відсотках та характеризує динаміку витрати вторинної пари на гарячий дефекатор (рис. 1).

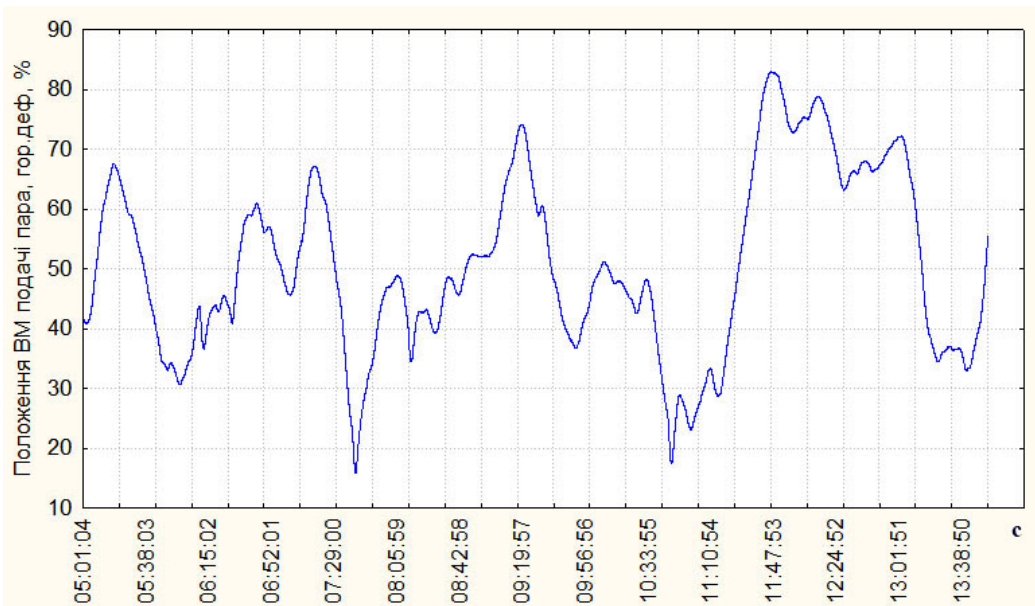


Рис. 1 – Графік зміни положення виконавчого механізму, що регулює подачу вторинної пари з ВУ на гарячий дефекатор

Математична модель ACL-шкали має вигляд [1]:

$$C = \{H, \Omega, \Psi\}, \quad (6)$$

де $H = \{X, \tilde{X}, V, A, \tilde{V}, \tilde{A}\}$ – множина об'єктів оцінювання; $\Omega = \{F_T, F_C, F_P, F_Er\}$ – множина операцій (функцій та предикатів), визначених на множині H ; операції-функції

$F_T = \{Fuzzy, deFuzzy, TTend, RTend\}$ для оцінки нечітких значень НЧР та компонент НЕТ; операції-функції $F_C = \{STend, GTend\}$ для розрахунку нових нечітких значень нечіткої тенденції; операції-предикати $F_P = \{P_p, P_n\}$ для аналізу базових типів нечітких тенденцій; операції-функції $F_Er = \{Er_V, Er_A, Er_v, Er_a, Er_x, Er_x\}$

для розрахунку похибок лінгвістичного та числового оцінювання; Ψ – множина параметрів шкали $\Psi = \{E, d, MF, n\ min, n\ max\}$, де E – тип ACL-шкали, d – допустимий рівень відхилення в даних, що оцінюють; MF – вид функції приналежності нечітких множин $\tilde{X}, \tilde{V}, \tilde{A}$; $n\ min, n\ max$ – мінімально та максимально допустимі значення шкали.

Шляхом адаптації ACL-шкали до предметної області визначимо значення вектора її параметрів $\Psi = \{E, d, MF, n\ min, n\ max\}$ наступним чином: E –

«квазіінтервальна»; ε – допустимий рівень похибки в 10 % від розмаху шкали; MF – трикутна функція приналежності; довжина інтервалу функції належності нечітких термів ACL-шкали $d = 2\varepsilon = 20\%$, $n\ min = 2 * \min = 2 * 0 = 0$,

$n\ max = 2 * \max = 2 * 100 = 200$, де \min – мінімальне, \max – максимальне значення числового ЧР.

Визначимо кількість градувань ACL-шкали за формулою:

$$m = \frac{2 \cdot (x_{\max} - x_{\min})}{d} + 1 = \frac{2 \cdot (100 - 0)}{20} + 1 = 11 \quad (7)$$

Використавши теорему про потужність шкали [1]:

$$m = \text{int}\left(\frac{2 \cdot (x_{\max} - x_{\min})}{n \cdot \delta} \cdot S\right) + 1, \quad (8)$$

де

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}, \quad \text{при } n = 32000, \quad S = 698,9293 \quad (9)$$

визначимо значення максимальної середньої відносної похибки:

$$\delta_{\max} = \left(\frac{2 \cdot (x_{\max} - x_{\min})}{n \cdot (m-1)} \cdot S\right) = \frac{2 \cdot (100 - 0)}{32000 \cdot (11 - 1)} \cdot 698,9293 = 0,44 \quad (10)$$

Використаємо вбудовані операції ACL-шкали для оцінки нечітких значень та нечітких елементарних тенденцій:

$$\tilde{x} = Fuzzy(x_i), \quad (11)$$

$$\tilde{v}_i = TTend(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i+1}), \quad (12)$$

$$\tilde{a}_i = RTend(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i+1}), \quad (13)$$

$$\mu_i(v_i) = \min(\mu(x_{i-1}), \mu(x_i)), \quad (14)$$

де \tilde{v}_e – тип; \tilde{a}_e – інтенсивність; R_0, R_1, \dots, R_{10} – значення інтенсивностей; $\mu_i(v_i) = \min(\mu(x_{i-1}), \mu(x_i))$ – степінь належності нечіткій тенденції.

Для побудови нечіткої Т-моделі ЧР як нечіткої моделі нечіткого динамічного процесу з нечіткими приростами першого порядку, сформуємо нечіткі

правила послідовності типів нечітких елементарних тенденцій:

$$R_0 : \{ зрос \rightarrow стаб, стаб \rightarrow зрос, зрос \rightarrow спад, спад \rightarrow зрос \}, (15)$$

та інтенсивностей нечітких елементарних тенденцій:

$$R_a : \{ R_2 \rightarrow R_0, R_0 \rightarrow R_1, R_1 \rightarrow R_1, R_1 \rightarrow R_2 \} . (16)$$

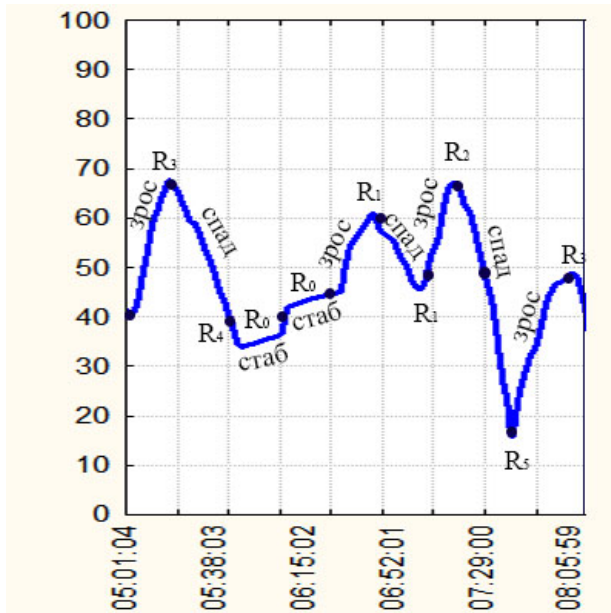


Рис. 2 – Результат оцінювання нечітких елементарних тенденцій ЧР по ACL-шкалі

В результаті отримаємо нечітку Т-модель у вигляді бази нечітких правил типів НЕТ наступного вигляду: якщо «Зростання», то «Спадання» та бази нечітких правил залежності інтенсивностей НЕТ вигляду - якщо R_2 , то R_1 .

Отримана нечітка Т-модель у вигляді бази нечітких правил дозволить проводити прогнозування часового ряду положення виконавчого механізму подачі вторинної пари на горячий дефекатор.

Результати прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки. Для вихідного моменту часу $t_4 = 05god : 59xв$, що характеризується нечіткою елементарною тенденцією типу «Стабільність», прогнозуємо тип нечітких елементарних тенденцій на 2 інтервал, при цьому, використовуємо відповідні правила з бази правил R_0 :

Якщо «Стабільність» (1), то «Стабільність» (0,6);
Якщо «Стабільність» (0,6), то «Зростання» (1).

В результаті розв'язку системи виділених нечітких правил отримаємо агреговану функцію належності цих нечітких термів. Визначимо значення X^* методом «центра ваги» для агрегованої функції належності та шляхом фазифікації визначимо тип НЕТ $Fuzzy(\tilde{x}^*) = \text{«Зростання»}$. Прогнозоване значення можна визначити за формулою:

$$x'_{t+1} = x_t + v'_{t+1} \cdot a'_{t+1} (17)$$

де v'_i визначають за залежністю:

$$defuzzy(v'_i) = \begin{cases} 0, \text{якщо } \tilde{v}_i = \text{«стабільніс»} \\ -1, \text{якщо } \tilde{v}_i = \text{«спадання»} \\ 1, \text{якщо } \tilde{v}_i = \text{«зростання»} \end{cases} (18)$$

Для прогнозного моменту часу $t_5 = 06god : 15xв$ дефазифіковане значення $R_2 = 1,6$, прогнозне значення типу НЕТ $\tilde{v}'_i = \text{«зростання»}$ отже за формулою (17):

$$x'_{t+1} = 40 + 1 * 1,6 = 41,6 (19)$$

Прогнозування нечітких елементарних тенденцій та числових значень часового ряду в моменти часу $t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}$ та t_{12} проводиться аналогічно.

В результаті застосування нечіткої Т-модель отримали прогнозовані значення компонент нечітких елементарних тенденцій та числових значень ЧР на 2 інтервали вперед по 16 хвилин (рис. 3).

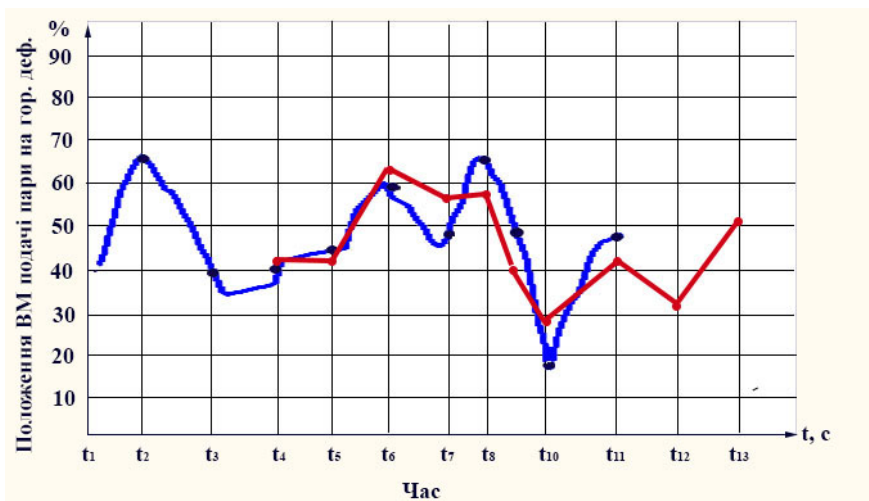


Рис. 3 – Результати прогнозування ЧР методом НЕТ (синій колір – вихідний ЧР, червоний – прогнозоване значення ЧР)

Обговорення результатів прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки. Для оцінки точності прогнозування числових значень використаємо показник середньої абсолютної відносної похибки δ :

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x'_i}{x_i} \right| \quad (20)$$

За даними прогнозованих значень розрахуємо $\delta = 0,16$. Показник точності моделі δ не перевищує її максимального значення $\delta_{\max} = 0,44$, що підтверджує адекватність побудованої ACL-шкали та моделі ЧР.

Щоб оцінити адекватність перевіримо модель по критерію d_a , тобто перевіримо чи всі значення абсолютних похибок не перевищують допустимий рівень похибок $\varepsilon = 10$, що був заданий до побудови моделі:

$$d_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i, \quad \Delta x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\varepsilon_i| > d, \\ 0, & \text{якщо } |\varepsilon_i| \leq d. \end{cases} \quad (21)$$

Відповідно до таблиці 3 модель адекватна по показнику d_a , оскільки $d_a = 0$.

Висновки

1. В якості основного підходу до прогнозування загальної динаміки споживання вторинної пари з ВУ запропоновано виділити динамічних споживачів вторинної пари та провести для кожного з них прогнозування споживання вторинної пари, використавши часові ряди положень виконавчих механізмів подачі вторинної пари для відповідного споживача.

На основі прогнозованих значень паровідборів по кожному з споживачів можна буде оцінити загальну тенденцію зміни динаміки споживання вторинної пари з ВУ.

2. Для прогнозування часових рядів положень виконавчих механізмів подачі вторинної пари динамічних споживачів обрано метод нечітких елементарних тенденцій. В результаті прогнозування значень часового ряду методом НЕТ отримано прогнозовані значення на 2 інтервали вперед, кожен з яких дорівнює 16 хвилин.

3. В результаті оцінки результатів прогнозування встановлено, що обраний метод забезпечує необхідну точність та адекватність прогнозу та може бути застосований для прогнозування загальної динаміки споживання вторинної пари з ВУ, як одна зі складових методології випереджувального керування.

Список літератури:

1. Уліцька, О. О. Програмно-технічна структура системи управління випарною установкою [Текст] / О. О. Уліцька // Холодильная техника і технологія. – 2011. – № 2 (130). – С. 84–87.
2. Власенко, Л. О. Підвищення ефективності функціонування випарної станції цукрового заводу за рахунок використання методів статистичної діагностики [Текст]: міжн. наук. конф. / Л. О. Власенко, М. А. Сич // Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості, 2014. – С. 259.
3. Засць, Н. А. Моделювання процесу випарювання для синтезу автоматизованої системи керування [Текст] / Н. А. Засць, Н. М. Луцька // Національний вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2011. – № 161. – С. 180–186.
4. Кишенько, В. Д. Нелінійний рекурентний аналіз поведінки складного технологічного об'єкта [Текст] / В. Д. Кишенько, А. П. Ладанюк, М. А. Сич, О. В. Школьна // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 4/2 (82). – С. 59–65. doi: [10.15587/1729-4061.2016.73111](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73111)
5. Ладанюк, А. П. Розробка алгоритму визначення стану випарної установки з використанням нейронних мереж [Текст] / А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько, О. В. Школьна, М. А. Сич // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 5/2 (83). – С. 54–62. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79322](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79322)
6. Шнайдер, Д. А. Метод упреждающего управления сложными технологическими комплексами по критерию энергетической эффективности [Текст] / Д. А. Шнайдер, Л. С. Казаринов // Управление большими системами. – 2011. – № 32. – С. 221–240.
7. Батыришин, И. З. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика [Текст] / И. З. Батыришин, А. О. Недосекин, А. А. Стецко, А. Язенин, В. Тарасов, Н. Ярушкіна. – Физико-математическая литература, 2007. – 208 с.
8. Садовникова, Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование [Текст] / Н. А. Садовникова, Р. А. Шмойлова. – Москва: Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 2001. – 67 с.
9. Кузьмин, А. Н. Прогнозирование технического состояния штанговых глубинных насосов на основе нейросетевых технологий [Текст] / А. Н. Кузьмин, И. А. Вялых // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 3. – С. 9–19.
10. Афанасьева, Т. В. Метод прогнозирования временных рядов на основе нечетких тенденций [Текст]: тр. седьмой межд. конф. / Т. В. Афанасьева // Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов, 2009. – С. 33–35.
11. Школьна, О. В. Мережеві моделі в задачах автоматизованого керування випарною станцією цукрового заводу [Текст] / О. В. Школьна, А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько // Харчова промисловість. – 2016. – № 19. – С. 119–124.
12. Афанасьева, Т. В. Прогнозирование временных рядов: нечеткие модели [Текст] / Т. В. Афанасьева, А. М. Наместников, И. Г. Перфильева, А. А. Романов, Н. Г. Ярушкіна. – Ульяновск: УлГТУ, 2014. – 145 с.
13. Афанасьева, Т. В. Модель ACL-шкалы для генерации лингвистических оценок в принятии решений [Текст] / Т. В. Афанасьева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. Т. 2. Серия «Технические науки» – 2008. – № 4 (14). – С. 91–97.

Bibliography (transliterated):

1. Ulitska, O. O. (2011). Programno-tekhnichna struktura systemy upravlinnia vyparnoiu ustanovkoiu. holodylna tekhnika i tehnolohiia, 2 (130), 84–87.
2. Vlasenko, L. O., Sych, M. A. (2014). Pdivyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia vyparnoi stantsii tsukrovoho zavodu za rakhunok vykorystannia metodiv statystychnoi diahnostyky. Novi idei v kharchovii nauksi – novi produkty, 259.
3. Zaets, N. A., Lutska, N. M. (2011). Modeliuvannia protsesu vypariuvannia dlia syntezu avtomatyzovanoi systemy keruvannia. Natsionalnyi visnyk Natsionalnogo univertsytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, 161, 180–186.
4. Kyshenko, V., Ladanyuk, A., Sych, M., Shkolna, O. (2016). Non-linear recurrent analysis of the behavior of a complex technological object. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(2(82)), 59–65. doi: [10.15587/1729-4061.2016.73111](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.73111)
5. Ladanyuk, A., Kyshenko, V., Shkolna, E., Sych, M. (2016). Development of the algorithm of determining the state of evaporation station using neural networks. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(2 (83)), 54–62. doi: [10.15587/1729-4061.2016.79322](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79322)
6. Schneider, D. A., Kazarynov, L. S. (2011). Metod uprezhdajushhego upravlenija slozhnymi tehnologicheskimi kompleksami po kriteriju jenergeticheskoi jeffektivnosti. Upravlenie bol'shimi sistemami, 32, 221–240.

7. Batyrshin, I. Z., Nedosekin, A. O., Stecko, A. A., Jazenin, A., Tarasov, V., Jarushkina, N. (2007). Nechetkie gibridnye sistemy. Teorija i praktika. Fiziko-matematicheskaja literatura, 208.
8. Sadovnikova, N. A., Shmoilova, N. A. (2001). Analysis of Time Series and Prediction. Moscow: Moskovskij gosudarstvennyj universitet jekonomiki, statistiki i informatiki, 67.
9. Kuzmin, A. N., Vlikh, I. A. (2016). Prognozirovanie tehničeskogo sostojanija shtangovyh glubinyh nasosov na osnove nejrosetevykh tehnologij. Vestnik permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehničeskogo universiteta. Himičeskaja tehnologija i biotehnologija, 3, 9–19.
10. Afanasyeva, T. V. (2009). Metod prognozirovanija vremennyh rjadov na osnove nechetkih tendencij. Matematicheskoe modelirovanie fizičeskikh, jekonomičeskikh, tehničeskikh, social'nyh sistem i processov, 33–35.
11. Shkolna, O. V., Ladanyuk, A. P., Kyshenko, V. D. (2016). Network Model in the Tasks of Automated Control Evaporator Plant Sugar Factory. Food Industry, 19, 119–24.
12. Afanasyev, T. V., Namestnykov, A. M., Perfyleva, I. G., Romanov, A. A., Yarushkina, N. G. (2014). Prognozirovanie vremennyh rjadov: nechetkie modeli. Ulyanovsk: UIGTU, 145.
13. Afanasyeva, T. V. (2008). Model' ACL-shkaly dlja generacii lingvisticheskikh ocenok v prinjatii reshenij. Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo. T.2. Serija «Tehničeskije nauki», 4 (14), 91–97.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки/ О. В. Школьна, В. Д. Кишенько, А. П. Ладанюк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.127–132. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Прогнозирование динамики потребления вторичного пара из испарительной установки/ Е. В. Школьная, В. Д. Кишенько, А. П. Ладанюк// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.127–132. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Predicting of secondary steam consumption dynamics at the evaporator state О. V. Shkolna, V. D. Kyshenko, A. P. Ladanyuk//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.127–132. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Школьна Олена Валентинівна – аспірант, Національний університет харчових технологій, асистент кафедри «Автоматизації та інтелектуальних систем керування»; вул. Володимирська, 68, м Київ, Україна 01033; e-mail: evlens@ukr.net

Кишенько Василь Дмитрович – кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій, професор кафедри «Автоматизації та інтелектуальних систем керування»; вул. Володимирська, 68, м Київ, Україна 01033; e-mail: vdk.nuft@gmail.com

Ладанюк Анатолій Петрович – доктор технічних наук, Національний університет харчових технологій, професор, завідувач кафедри «Автоматизації та інтелектуальних систем керування»; вул. Володимирська, 68, м Київ, Україна 01033; e-mail: ladanyuk@ukr.net

Школьная Елена Валентиновна – аспірант, Національний університет пищевих технологій, асистент кафедри «Автоматизации и интеллектуальных систем управления»; ул. Владимирская, 68, г. Киев, Украина 01033; e-mail: evlens@ukr.net

Кишенько Василий Дмитриевич – кандидат технических наук, Національний університет пищевих технологій, професор кафедри «Автоматизации и интеллектуальных систем управления»; ул. Владимирская, 68, г. Киев, Украина 01033; e-mail: vdk.nuft@gmail.com

Ладанюк Анатолій Петрович – доктор технических наук, Національний університет пищевих технологій, професор, заведующий кафедры «Автоматизации и интеллектуальных систем управления»; ул. Владимирская, 68, г. Киев, Украина 01033; e-mail: ladanyuk@ukr.net

Shkolna Olena – graduate student, National University of Food Technologies, asistent of the department “Automation and intelligent control systems”; Vladimirskaya str., 68, Kyiv, Ukraine 01033; e-mail: evlens@ukr.net

Kyshenko Vasily – PhD, National University of Food Technologies, professor of the department “Automation and intelligent control systems”; Vladimirskaya str., 68, Kyiv, Ukraine 01033; e-mail: vdk.nuft@gmail.com

Ladanyuk Anatoly – doctor of engineering, National University of Food Technologies, professor, head of the department “Automation and intelligent control systems”; Vladimirskaya str., 68, Kyiv, Ukraine 01033; e-mail: ladanyuk@ukr.net

УДК 621.658.512

О. В. МЕЛЬНИЧУК, В. С. ГРИШИН, О. П. МОРОЗЕНКО

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЗОН КРИТИЧЕСКИХ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЯХ ГИБОЧНОГО ШТАМПА

Розглядається математична модель оцінки зон критичних внутрішніх напруг у формотворчих деталях сгинального штампу. Спроекована тривимірна робоча конструкція штампу. Розроблена математична модель напруг у прикладному програмному забезпеченні Solidworks Simulation, яка включає в себе використані набори контактів, сили та кріплення. Виявлені ділянки критичних напруг, які підтверджуються практичним досвідом експлуатації даного оснащення на промисловому виробництві, що свідчить про достовірність проведених досліджень. Результати дослідження можуть бути використані для прогнозування зношення формотворчих деталей штампу.

Ключові слова: штампування, внутрішні напруги, матриця, метод кінцевих елементів, моделювання, прогнозування зношення.

Рассматривается математическая модель оценки зон критических внутренних напряжений в формообразующих деталях гибочного штампа. Спроектирована трехмерная рабочая конструкция штампа. Разработана математическая модель напряжений в прикладном программном обеспечении Solidworks Simulation, которая включает в себя использованные наборы контактов, силы и крепления. Выявлены участки критических напряжений, которые подтверждаются практическим опытом эксплуатации данной оснастки на промышленном производстве, что свидетельствует о достоверности проведенных исследований. Результаты исследования могут быть использованы для прогнозирования износа формообразующих деталей штампа.

Ключевые слова: штамповка, внутренние напряжения, матрица, метод конечных элементов, моделирование, прогнозирование износа.

There was considered the evaluation of stresses model in shape-generating parts of bending die stamp. The construction of a die stamp three-dimensional working model was done. Was designed the mathematical model of stresses in applied program Solidworks Simulation, that include used contacts, forces and fixtures. Simulation was provided with the finite element method. The finite element method allows to take into account properties of the deformable zones of heterogeneity, including flat and curved surfaces, allows the calculation of complex configuration areas including multivariable provided technological impact of physical and mechanical properties of the materials. Was detected the areas of critical stresses that are proved by practical experience of the tooling exploitation at manufacture. It shows that provided research is positive. The results of research can be used for wearing prediction of shape-generating parts of die stamp.

Keywords: die stamping, internal stresses, matrix, finite elements method, modelling, wearing prediction.

Введение. Надежность работы штампов для холодной деформации листового материала определяется не только использованием новых инструментальных сплавов и технологией изготовления деталей данной оснастки, но и конструкцией нагруженных элементов и их упрочнением. Наиболее нагруженными элементами штампов являются формообразующие поверхности матриц и пуансонов, которые работают при высоких контактных нагрузках, с сильной концентрацией напряжений. Это приводит к развитию механической усталости, пластической деформации, окислительным процессам и истиранию рабочих поверхностей [1, 2].

Поэтому задача повышения стойкости штамповой оснастки за счет минимизации напряженно-деформированного состояния при эксплуатации является актуальной.

Цель работы. Разработка моделей контактных нагруженных зон на формообразующих поверхностях деталей штампов для выявления участков с наибольшими напряжениями для дальнейшего их упрочнения.

Методика исследования по выявлению наиболее нагруженных участков рабочих поверхностей матрицы штампа. В работе проведены исследования по выявлению наиболее нагруженных участков рабочих поверхностей матрицы штампа, рис. 1, для изготовления скобы трубного хомута и определения внутренних напряжений методом конечных элементов в среде SolidWorks Simulation [3, 4].

Метод конечных элементов дает возможность учитывать неоднородность свойств деформируемых зон, включая криволинейные и плоские поверхности, позволяет рассчитывать зоны сложной конфигурации, в том числе и при условии многофакторного влияния

технологических физико-механических свойств применяемых материалов [5, 6].

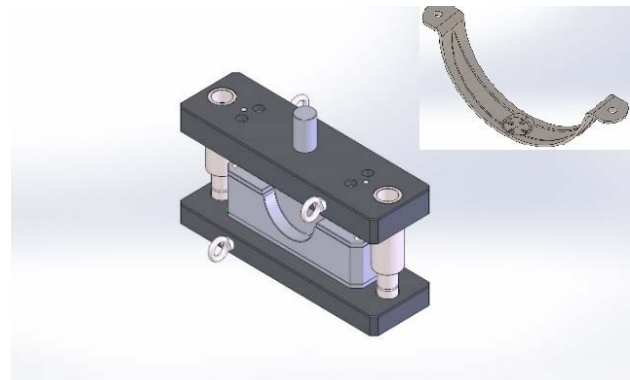


Рис. 1 – 3D модель штампа и изготовления скобы

При моделировании нагрузок были включены детали штампа (матрица, пуансон, знаки) и изготавливаемая скоба, которые непосредственно контактируют с поверхностями матрицы (рис. 1, 2) и максимальное усилие которые развивает пресс, табл. 1.

Результаты исследований при математическом моделировании нагруженных деталей штампа и скобы, представлены в виде твердого тела исходными характеристиками исследуемых материалов.

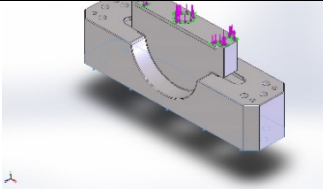
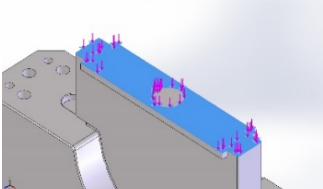
Для адекватного проведения исследования следует применить корректную фиксацию элементов штампа в системе симуляции, данные по креплению приведены в табл. 2.

© О. В. Мельничук, В. С. Гришин, О. П. Морозенко. 2016

Таблица 1 – Приложения внешних нагрузок и числовой эквивалент

Нагрузка	Изображение нагрузок	Данные нагрузок	
		Объекты:	2 грани
Сила-1		Тип:	Приложена нормальная сила
		Значение:	500000 N

Таблица 2 – Крепления элементов штампа

Название крепления		Изображение крепления		Данные крепления	
Зафиксирован -1				Объекты:	1 грань
				Тип:	Зафиксированная геометрия
Результирующие силы					
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая	
Сила реакции(N)	1617.26	997382	-38.9302	997383	
Реактивный момент(N.m)	0	0	0	0	
На плоских гранях-1				Объекты:	1 грань
				Тип:	На плоских гранях
				Сдвиг:	0, 0, ---
				Размерность:	mm
Результирующие силы					
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая	
Сила реакции (N)	-1617.44	0	38.8813	1617.91	
Реактивный момент (N.m)	0	0	0	0	

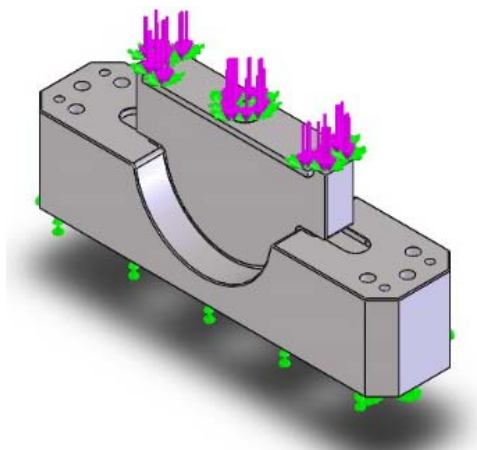


Рис. 2 – Модель контактных нагрузок и крепления

Кроме креплений большую роль играет модель поведения и реакций твердых тел, участвующих в исследовании, за эти функции отвечают контакты, добавленные в рассматриваемую систему, и приведены в табл. 3.

После проведения предварительной подготовительной работы в среде моделирования для

создания наиболее реальных условий симуляции была проведена симуляция нагрузки на штамп [7].

Наглядное изображение связанных контактов без проникновения приведено на рис. 3.

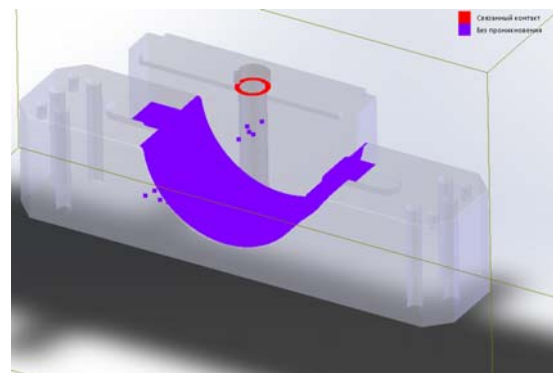
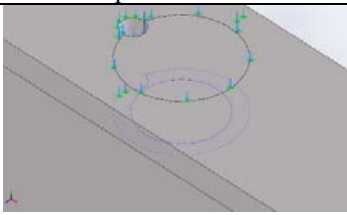
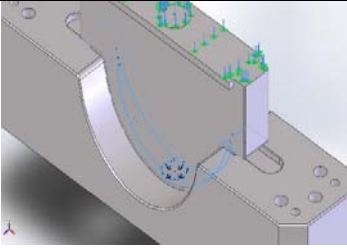
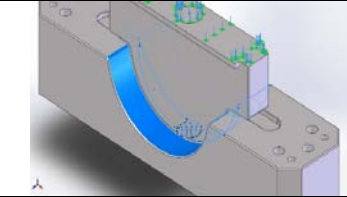


Рис. 3 – Связи между компонентами гибочного штампа

Сетка является важным этапом исследования в среде модуля Solidworks Simulation, в исследовании наибольший размер конечного элемента равна 10 мм, рис. 4.

Таблица 3 – Данные по контактам твердых тел

Контакт 3D	Изображение контакта		Свойства контакта	
Набор соприкосновения -1			Тип:	Контактная пара со связанными узлами
			Элементы:	2 грани
Набор соприкосновения -2			Тип:	Контактная пара без проникновения
			Элементы:	125 грани
			Значение трения:	0.2
			Дополнительно:	Узел с поверхностью
Сила контакту/трения				
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая
Сила контакта(N)	-1.2187E-010	-4.6242E-010	-1.2847E-011	4.7838E-010
Сила трения(N)	-1.9348E-011	9.8332E-011	1.8971E-012	1.0024E-010
Набор соприкосновения-3			Тип:	Контактная пара без проникновения
			Элементы:	158 грани
			Значение трения:	0.2
			Дополнительно:	Узел с поверхностью
Сила контакту/ трения				
Компоненты	X	Y	Z	Результирующая
Сила контакта (N)	-2.7143E-011	-2.5392E-009	1.16E-012	2.5394E-009
Сила трения (N)	2.7644E-011	1.3466E-010	-5.9819E-013	1.3747E-010

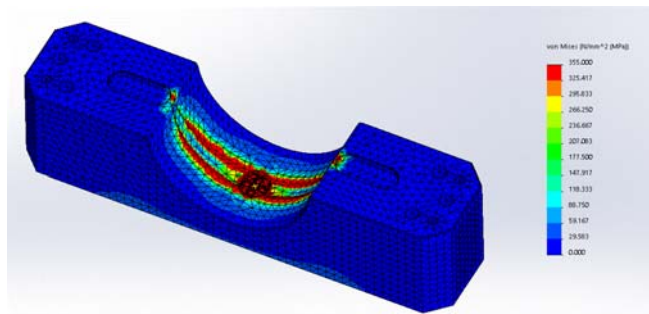


Рис. 4 – Зоны критических напряжений матрицы гибочного штампа

Выводы. Результаты моделирования указывают на то, что в детали «Матрица» глобально существуют две зоны критических напряжений, приводящих к износу штампа, первая - на формообразующей поверхности пуклевки и выемки скобы, вторая - на скруглениях детали. Напряжения на скруглениях матрицы приводят к интенсивному износу этих поверхностей, так как они контактируют с поверхностями других деталей штампа более длительное время в цикле напряжения, а потому воспринимают гораздо большую нагрузку, чем другие элементы матрицы и штампа в целом, что доказывает практический опыт

эксплуатации рассматриваемой оснастки. Результаты проведенного исследования могут быть использованы в производственных условиях для прогнозирования износа формообразующих деталей штампа.

Список литературы:

1. Долматов, А. И. Повышение жизненного цикла оснастки на основе защитных технологий [Текст] / А. И. Долматов, А. В. Богуслаев. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2000. – 296 с.
2. Палей, М. М. Технология производства приспособлений прессформ и штампов [Текст] / М. М. Палей. – Москва: Машиностроение, 1979. – 344 с.
3. Алямовский, А. А. Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. Е. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
4. Mac Donald, B. J. Practical Stress Analysis with Finite Elements (2nd Edition) [Text] / B. J. Mac Donald. – Glasnevin Publishing, 2011. – 402 p.
5. Даутов, Р. З. Вступ в теорію методу скінчених елементів [Текст]: навч. пос. / Р. З. Даутов, М. М. Карчевський. – Казань: Казанський державний університет ім. В. І. Ульянова-Леніна, 2004. – 239 с.
6. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган. – Москва: Мир, 1986. – 318 с.
7. Мельничук, О. В. Виявлення зон критичних напруг у технологічному оснащенні [Текст]: матер. Шістнадцятої міжнар. молодіжної науково-технічної конф. / О. В. Мельничук, В. С. Гришин // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво, 2016. – С. 44–46.
8. Кухарь, В. В. Разработка альтернативной технологии

- спаренной штамповки из профилированной заготовки, полученной продольным изгибом [Текст] / В. В. Кухарь, В. А. Бурко, А. Г. Присяжный, Е. Ю. Балалаева, Н. Н. Нагнибеда // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 3/7 (81). – С. 53–61. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72063](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063)
9. Mirzak, V. Ia. The influence of mechanical error compensator on the quality of thin-sheet separating stamping [Text] / V. Ia. Mirzak, V. M. Bokov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 6/7 (78). – P. 10–15. doi: [10.15587/1729-4061.2015.54276](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54276)
 10. Guk, N. Identification of the geometry and elastic properties of rigid inclusions in thin plate [Text] / N. Guk, N. Stepanova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 2/7 (80). – P. 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2016.64395](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64395)
 4. Mac Donald, B. J. (2011). Practical Stress Analysis with Finite Elements (2nd Edition). Glasnevin Publishing, 402.
 5. Dautov, R. Z., Karchevskiy, M. M. (2004). Vstup v teoriiu metodu skinchennykh elementiv. Kazan: Kazanskiy derzhavnyi universitet im. V. I. Ulianova-Lenina, 239.
 6. Zenkevich, O., Morgan, K. (1986). Konechnye jelementy i approksimacija. Moscow: Mir, 318.
 7. Melnychuk, O. V., Hryshyn, V. S. (2016). Vyiavleniia zon krytychnykh napruh u tekhnolohichnomu osnashchenni. Mashynobuduvannia ochyma molodykh: prohresyvni idei – nauka – vyrobnytstvo, 44–46.
 8. Kukhar, V., Burko, V., Prysiashnyi, A., Balalayeva, E., Nyhnbida, M. (2016). Development of alternative technology of dual forming of profiled workpiece obtained by buckling. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7 (81)), 53. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72063](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72063)
 9. Mirzak, V. Ia., Bokov, V. M. (2015). The influence of mechanical error compensator on the quality of thin-sheet separating stamping. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (7 (78)), 10–15. doi: [10.15587/1729-4061.2015.54276](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54276)
 10. Guk, N., Stepanova, N. (2016). Identification of the geometry and elastic properties of rigid inclusions in thin plate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (7 (80)), 4–9. doi: [10.15587/1729-4061.2016.64395](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.64395)

Bibliography (transliterated):

1. Dolmatov, A. I., Boguslaev, A. V. (2000). Povyshenie zhiznennogo cikla osnastki na osnove zashhitnykh tehnologij. Zaporozh'e: OAO «Motor-Sich», 296.
2. Palej, M. M. (1979). Tehnologija proizvodstva prispoblenij pressform i shtampov. Moscow: Mashinostroenie, 344.
3. Aljamovskij, A. A., Sobachkin, A. A., Odincov, E. V., Haritonovich, A. E., Ponomarev, N. B. (2005). Solid Works. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike. Saint-

Поступила (received) 11.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка математичної моделі оцінки зон критичних внутрішніх напружень в формотворчих деталях сигнального штампа/ О. В. Мельничук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 50(1222). – С.133–136. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Разработка математической модели оценки зон критических внутренних напряжений в формообразующих деталях гибочного штампа/ А. В. Мельничук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 50(1222). – С.133–136. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Development of mathematical model evaluation of critical areas internal stresses in the molding details bending dies/ О. Melnychuk // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.133–136. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мельничук Олександр Володимирович – аспірант, Національна Металургійна Академія України, вул. Гагаріна 4, м. Дніпро 49000, Україна; e-mail: oleksandr.melnichuk.92@gmail.com.

Гришин Володимир Сергійович – кандидат технічних наук, Національна Металургійна Академія України, доцент кафедри "Технології машинобудування"; вул. Гагаріна 4, м. Дніпро 49000, Україна; e-mail: texmash@ua.fm.

Морозенко Олена Петрівна – кандидат технічних наук, Національна Металургійна Академія України, доцент кафедри "Нарисної геометрії та інженерної графіки"; вул. Гагаріна 4, м. Дніпро 49000, Україна; e-mail: elenamorozenko@gmail.com.

Мельничук Олександр Володимирович – аспірант, Национальная Металлургическая Академия Украины, ул. Гагарина 4, г. Днепр 49000, Украина; e-mail: oleksandr.melnichuk.92@gmail.com.

Гришин Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, Национальная Металлургическая Академия Украины, доцент кафедры "Технологии машиностроения", ул. Гагарина 4, г. Днепр 49000, Украина.

Морозенко Елена Петровна – кандидат технических наук, Национальная Металлургическая Академия Украины, доцент кафедры "Начертательной геометрии и инженерной графики", ул. Гагарина 4, г. Днепр 49000, Украина; e-mail: elenamorozenko@gmail.com.

Melnichuk Oleksandr – PhD student, National Metallurgical Academy of Ukraine; Gagarina street 4, city Dnipro 49000, Ukraine; e-mail: oleksandr.melnichuk.92@gmail.com.

Gryshyn Volodymyr – candidate of technical sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine, associate professor at the department of "Technology of machinebuilding"; Gagarina street 4, city Dnipro 49000, Ukraine; e-mail: texmash@ua.fm.

Morozenko Olena – candidate of technical sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine; associate professor at the department of "Descriptive geometry and engineering graphics "; Gagarina street 4, city Dnipro 49000, Ukraine; e-mail: texmash@ua.fm.

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

УДК 543.1; 535.016

З. Д. БЕЗРУК, Д. Г. РАДОВ, В. П. МАСЛОВ, Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ, Г. В. ДОРОЖИНСЬКА, А. В. КОНЧЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ОЧИЩЕННЯ ВОДОПРОВІДНОЇ ВОДИ МЕТОДОМ ВИМОРОЖУВАННЯ

Експериментально виявлено, що ефективність очищення методом виморожування водопровідної води має "S" – подібний графік, який складається з трьох частин: 1 – початковий етап з малою ефективністю; 2 – з високою ефективністю; 3 – де графік поступово наближається до межі, обумовленої фізико-хімічною природою процесу очищення. Ця закономірність дозволяє визначити ефективність процесу в залежності від кількості циклів виморожування. Результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення існуючих та створення нових методик контролю процесу очищення водопровідної води.

Ключові слова: водопровідна вода, очищення води, виморожування, кондуктометрія, поверхневий плазмонний резонанс.

Експериментально встановлено, что эффективность очистки методом вымораживания водопроводной воды имеет "S" – подобный график, состоящий из трех частей: 1 – начальный этап с малой эффективностью; 2 – с высокой эффективностью; 3 – где график постепенно приближается к границе, определяемой физико-химической природой процесса очистки. Эта закономерность позволяет определить эффективность процесса в зависимости от количества циклов вымораживания. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования существующих и создания новых методик контроля процесса очистки водопроводной воды.

Ключевые слова: водопроводная вода, очистка воды, вымораживание, кондуктометрия, поверхностный плазмонный резонанс.

One of the most important natural resources was and still water. Therefore, water supply quality drinking water in modern society is an urgent problem. Since drinking water is becoming less growing need cleaning and monitoring its quality. A promising method of treatment of water is freezing. The process of freezing water is used as an industrial scale, and can be easily used at home for further purification of water. It is not investigated patterns of purification of water using freezing.

By conductometry and surface plasmon resonance methods was investigated patterns of purification of tap water depending on the number of freezing. To characterize the quality of water treatment by freezing proposed clean water coefficient, which is determined by the difference between the values of conductivity or refractive indices dirty water and clean water after each cleaning cycle. Experimentally found that cleaning efficiency by freezing water is "S" - like schedule that consists of three parts: 1 – the initial stage of the low efficiency; 2 – high efficiency; 3 – where the schedule is gradually approaching the limit, due to physical and chemical nature of the cleaning process. This pattern to determine the effectiveness of the process depending on the number of cycles of freezing. The research results can be used to improve existing and create new methods of process control of water.

Keywords: tap water, water purification, freezing, conductometry, surface plasmon resonance.

Вступ. Одним з найбільш важливих природних ресурсів була і залишається вода. Це і обов'язкова складова у виробничих процесах, і основна складова життєдіяльності людини, забезпечує нормальні умови існування та проживання. З огляду на досить різноманітний вміст небажаних домішок у воді, яка використовується для споживання, є актуальною проблема її очищення. Вода, яка містить багато домішок впливає на здоров'я нації, призводить до надмірного використання миючих засобів у побуті та виходу з ладу побутової техніки через утворення накипу тощо.

За підрахунками ООН 31 жовтня 2011 року чисельність населення Землі сягнула 7 мільярдів осіб, при чому 1999 року вона становила 6 мільярдів. За прогнозами, до кінця цього століття загальна чисельність населення в світі може налічувати понад 10 млрд. [1], що передбачає збільшення потреб у використанні природних ресурсів, дефіцит яких спостерігається на даний час, водні ресурси забруднюються різного роду відходами від промисловості та сільського господарства. Тому водопостачання населення якісною питною водою на сучасному етапі розвитку суспільства є актуальною проблемою.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Як відомо, організм людини складається на 2/3 із води. Добова потреба в воді для дорослої людини – 2–2,5 л. та повинна відповідати наступним нормам:

- 1) бути безпечною в санітарно-епідемічному відношенні;
- 2) бути придатною за хімічним складом;
- 3) мати відповідні органолептичні властивості: бути прозорою, не мати кольору, запаху та стороннього присмаку [2].

Існує багато методів очистки, які забезпечують вимоги до питної води [3]. Основними методами контролю очищення води є: фотометричний, титриметричний, гравіметричний, потенціометричний, атомно-абсорбційний, хроматографічний, спектральний, радіометричний, рентгеноспектральний, флуоресцентний та електрохімічні методи [4]. Основними недоліками існуючих методів визначення якості води є потреба у пробопідготовці, велика площа, маса та висока вартість аналітичного обладнання. Пріоритетними тенденціями розвитку методів контролю є підвищення точності і чутливості методик вимірювання, зменшення часу отримання результатів вимірювання та зменшення об'ємів досліджуваних проб.

В роботі застосовані два методи контролю: кондуктометричний [5], як найбільш простий в реалізації, та новий – на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) [6]. Прилади, на основі ППР, мають високу точність вимірювання і високу чутливість до малих концентрацій домішок у воді.

© З. Д. Безрук, Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинський, Г. В. Дорожинська, А. В. Конченко. 2016

Ці методи контролю були використані для вивчення процесу очищення водопровідної води при її виморожуванні. Процес виморожування води використовується як в промислових масштабах [7–10], а також може бути просто застосований в домашніх умовах для додаткового очищення водопровідної води. Але в літературі відсутні дані щодо закономірностей процесу очищення води виморожуванням.

Ціль та задачі дослідження. Метою роботи дослідження є дослідження закономірностей очищення водопровідної води методом виморожування.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз стану проблеми забезпечення населення питною водою, існуючих методів очищення та контролю цього процесу.

2. Дослідити методами кондуктометрії та поверхневого плазмонного резонансу закономірності процесу очищення водопровідної води методом виморожування в залежності від кількості циклів виморожування.

3. Узагальнити експериментальну закономірність процесу очищення води.

Матеріали та методи дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу. Методичною основою виконання комплексних досліджень є: чисельний аналіз залежностей різниці електричних провідностей зразків води дистильованої та водопровідної від кількості циклів її виморожування.

Об'єктом дослідження є процес очищення питної води.

Предметом дослідження є закономірності питомого опору та ППР параметрів водопровідної води від кількості циклів її виморожування.

Методика дослідження:

Досліджували зразки водопровідної води м. Києва та дистильовану воду (провідність 3 ± 2 мкСм/см при 20°C). Відомо, що ця вода постачається з міської Дніпровської водопровідної станції. На станції запроєктована традиційна схема реагентної очистки води з відстоюванням та фільтруванням. Кінцевий споживач отримує водопровідну воду, яку можна додатково очистити методом виморожування. При цьому методі заданий об'єм води в пластмасових пробірках (в наших експериментах об'єм дорівнював 25 мл) заморожують в морозильній камері при мінус 20°C протягом певного часу, при якому половина об'єму перетворювалася у лід, (в наших експериментах час виморожування дорівнював двом годинам). Потім пробірки діставали з морозильної камери. Вода, що не замерзла і мала збільшену кількість солей та домішок, зливалася, а заморожену частину розморожували. Вимірювали електропровідність (величина обернена до питомого електричного опору) води, яка не замерзала і талу воду після розмороження льоду. Різницю цих двох значень ми використовували як коефіцієнт очищення цього циклу виморожування. Талу воду знову виморожували та проводили повторний цикл виморожування та вимірювання. Для визначення закономірності процесу очищення проводили десять циклів виморожування та вимірювання.

Вимірювання ППР параметрів (кутового зсуву мінімуму характеристики відбиття) води проводили за методикою викладеною в роботі [6].

Експериментальні результати та їх аналіз. Для вимірювань кондуктометричним методом необхідно більший об'єм проби досліджуваної рідини (не менше 10 мл), ніж для методу ППР, тому після п'яти циклів виморожування цей метод не змогли більше застосувати через недостатню кількість проби води.

Початок графіку залежності питомого опору зразків водопровідної води від кількості циклів виморожування (рис. 1) добре апроксимується функцією (1) з коефіцієнтом узгодження $R^2=0,99205$.

$$y(x) = y_0 + A \cdot \exp(x/B), \quad (1)$$

де $y_0=0,96 \pm 0,11$; $A=6,91 \pm 0,94$; $B=1,83 \pm 0,13$.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що процес виморожування водопровідної води призводить до зменшення її електричної провідності (табл. 1). В табл. 1 наведено виміряні значення електричної провідності водопровідної води до та після кожного циклу виморожування.

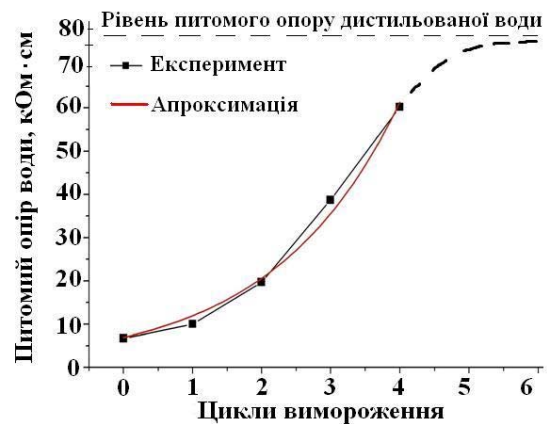


Рис. 1 – Графік залежності питомого опору води від кількості циклів виморожування

Для 4-го циклу виморожування різниця у значеннях електричної провідності еталону та вимороженої води (54 ± 2 мкСм/см) на порядок більша за величину роздільної здатності кондуктометра (1 мкСм/см) та для п'ятого циклу різниця у вимірюваннях становила 1 мкСм/см, що менше за величину похибки приладу. Крім того кондуктометр не може визначити вміст органічних домішок, таких як, наприклад, метанол, оскільки він не дисоціює у воді. Це було підтверджено експериментально при дослідженні чотирьох зразків 40%-го водного розчину етанолу з домішкою метанолу (табл. 2). Концентрація метанолу в зразках була від 0,04 %об. до 5 %об.

Проведений нами експеримент показав, що метод ППР виявляє метанол у водному розчині етанолу, в той час як кондуктометричним методом неможливо його виявити.

Таблиця 1 – Виміряні електричні провідності зразків водопровідної води

№ п.п.	Цикл вимороження	Провідність вимороженої водопровідної води S_v , мкСм/см	Провідність водопровідної води, що не замерзла S_n , мкСм/см
1	без виморож.	–	501±2
2	1	275±2	734±2
3	2	163±2	446±2
4	3	82±2	243±2
5	4	51±2	105±2
6	5	48±2	49±2

Таблиця 2 – Експериментальні значення провідності та параметру ППР для різних концентрацій метанолу у водно-спиртовому розчині

№ п.п.	Концентрація метанолу у водному розчині етанолу, %об.	Провідність водного розчину етанолу з метанолом, мкСм/см	Параметр ППР, кут.град.
1	0	3±2	0
2	0,04±0,01	3±2	0,027±0,001
3	0,29±0,01	3±2	0,030±0,001
4	1,00±0,01	3±2	0,038±0,001
5	5,00±0,01	3±2	0,156±0,001

Обговорення результатів дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу. Було зроблено припущення, що при збільшенні кількості циклів виморожування величина питомого електричного опору буде наближатися до значення, що відповідає дистильованій воді (рис. 1). Цю гіпотезу потрібно було перевірити з використанням методу ППР, який потребує в десятки разів менший об'єм проби (0,1...0,5 мл). На (рис. 2) наведені графіки залежності коефіцієнту ефективності очищення від кількості циклів виморожування. Коефіцієнт ефективності очищення був розрахований за формулою (2) відповідно до методики [6].

$$KEO_i = 1 - (0,5 \cdot (S_{n_i} + S_{v_i}) / dS) \quad (2)$$

де, S_{n_i} – значення провідності водопровідної води, що не замерзла, для i -го циклу виморожування, мкСм/см; S_{v_i} – значення провідності вимороженої водопровідної води для i -го циклу виморожування, мкСм/см; dS – різниця у значеннях електричної провідності водопровідної та дистильованої вода, мкСм/см.

Можна побачити, що наша гіпотеза цілком підтвердилась. Таким чином, нами була виявлена закономірність процесу очищення водопровідної води методом виморожування. Експериментально виявлено, що ефективність очищення методом виморожування має “S”- подібний графік, який складається з трьох частин:

- 1 – початковий етап з малою ефективністю;
- 2 – з високою ефективністю;
- 3 – де графік поступово наближається до межі, обумовленої фізико-хімічною природою процесу очищення.

Ця закономірність дозволяє визначити ефективність процесу в залежності від кількості циклів виморожування. З цього графіку видно, що після другого циклу виморожування є ефективними, а найкращі результати за ефективністю можна отримати на третьому або четвертому циклі. Ця закономірність відповідає вимірюванням як кондуктометричним методом, так і ППР методом (рис. 2).

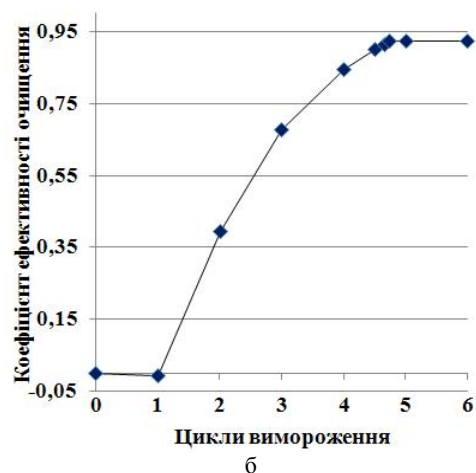
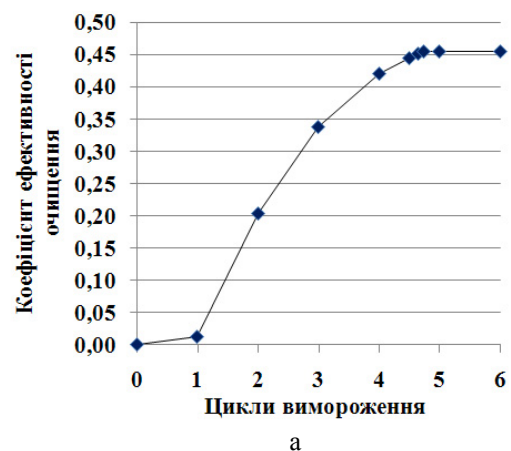


Рис. 2 – Розраховані залежності коефіцієнту ефективності очищення води від кількості циклів її заморожування при контролі: а – методом поверхневого плазмонного резонансу; б – кондуктометричним методом

Висновки. Двома методами (кондуктометричним та методом поверхневого плазмонного резонансу) визначено закономірності очищення питної води методом виморожування. Ця закономірність може бути представлена “S”- подібним графіком, який складається з трьох частин:

- 1 – початковий етап з малою ефективністю;
- 2 – з високою ефективністю;

3 – де графік поступово наближається до межі, обумовленої фізико-хімічною природою процесу очищення.

Досліджена закономірність дозволяє визначити ефективність процесу в залежності від кількості циклів виморожування. Показано експериментально, що методом ППР можуть бути виявлені шкідливі органічні домішки у воді та водних розчинах етанолу. При цьому кондуктометричним методом їх виявити неможливо.

Список літератури:

1. World population [Electronic resource]. – Available at: <http://www.census.gov/popclock>
2. Пашиківська, О. С. Вода та її значення для здоров'я людини. Біологічні дослідження [Текст] / О. С. Пашиківська, Н. В. Бродецька // Науковий вісник Житомирського державного університету імені Івана Франка. – 2013. – № 14. – С. 186–187.
3. Гигиенические требования к воде питьевой, предназначенной для потребления человеком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://home.chem.univ.kiev.ua/sol/specifications/water/sanpin_2_4-171-10.pdf
4. Гончарук, В. В. Современные технологии очистки воды [Текст] / В. В. Гончарук, Д. Д. Кучерук, А. О. Самсон-Тодоров, В. Ф. Скубченко // Наука та інновації. – 2006. – Т. 2., № 5. – С. 66–77.
5. Луговской, А. Ф. Оценка методов обеззараживания воды [Текст] / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // Вестник НТУУ "КПИ". – 2007. – № 52. – С. 103–111.
6. Радов, Д. Г. Дослідження процесу додаткового очищення питної води методом поверхневого плазмонного резонансу [Текст] / Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинський // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 49 (1221). – С. 89–94.
7. Пат. № 2395459 RU. Опреснительный комплекс. МПК C02F 1/14, A01G 31/02 [Текст] / Карпович С. С., Саркисов А. С., Микуняева В. В. – № 2008117600/12; заявл. 20.11.2009; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 21.
8. Пат. № 2507157 RU. Устройство для получения талой воды МПК C02F 1/22 (2006.01), F25C 1/12 [Текст] / Исмаилов Т. А., Гаджиев А. М., Рашидханов А. Т., Миспахов И. Ш. – № 2012104690/05; заявл. 09.02.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.
9. Пат. № 2226504 RU. Способ опреснения минерализованных вод и установка для его осуществления [Текст] / Алимов, А. Г.

- Карпунин, В. В. Алимов, А. А. Абезин, В. Г. Алимов, О. А. Карпунин, В. В. Сердюков Д. А. – № 2003107524/15; заявл. 19.03.2003; опубл. 10.04.2004, Бюл. № 10.
10. Пат. № 2274607 RU. Способ очистки воды и установка для его осуществления [Текст] / Высоцкий Е. Н., Высоцкий Д. Е., Высоцкий И. Е. – № 2003104764/15; заявл. 17.02.2003; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11.

Bibliography (transliterated):

1. World population. Available at: <http://www.census.gov/popclock/>.
2. Pashkivska, O. S., Brodecka, N. V. (2013). Voda ta yiyi znachennya dlya zdorov'ya lyudyny. Biologichni doslidzhennya. Naukovyj visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo universytetu imeni Ivana Franka, 14, 186–187.
3. Gigenicheskie trebovaniya k vode pit'evoy, prednazanachenoj dlja potrebleniya chelovekom. Available at: http://home.chem.univ.kiev.ua/sol/specifications/water/sanpin_2_4-171-10.pdf
4. Honcharuk, V. V., Kucheruk, D. D., Samsony-Todorov, A. O., Skubchenko, V. F. (2006). Sovremennye tekhnolohyy ochystky vody. Nauka ta innovaciya, 2 (5), 66–77.
5. Luhovskoy, A. F., Movchanyuk, A. B., Hryshko, Y. A. (2007). Ocenka metodov obezrazhyvaniya vody. Vestnyk NTUU "KPI", 52, 103–111.
6. Radov, D. G., Maslov, V. P., Dorozinsky, G. V. (2016). Doslidzhennya processu dodatkovoho ochyshhennya pytnoyi vodu metodom poverkhnevoho plazmonnoho rezonansu. Visnyk NTU «KhPI», 49 (1221), 89–94.
7. Karpovich, S. S., Sarkisov, A. S., Mikuljaeva, V. V. (2009). Pat. No. 2395459 RU. Opresnitel'nyj kompleks. MPK C02F 1/14, A01G 31/02. No. 2008117600/12; declared: 20.11.2009; published: 27.07.2010, Bul. No. 21.
8. Ismailov, T. A., Gadzhiev, A. M., Rashidhanov, A. T., Mispahov, I. Sh. (2012). Pat. No. 2507157 RU. Ustrojstvo dlja poluchenija taloj vody MPK C02F 1/22 (2006.01), F25C 1/12. No. 2012104690/05; declared: 09.02.2012; published: 20.02.2014, Bul. No. 5.
9. Alimov, A. G., Karpunin, V. V., Alimov, A. A., Abezina, V. G., Alimov, O. A., Karpunin, V. V., Serdjukov, D. A. (2003). Pat. No. 2226504 RU. Sposob opresneniya mineralizovannykh vod i ustanovka dlja ego osushhestvleniya. No. 2003107524/15; declared: 19.03.2003; published: 10.04.2004, Bul. No. 10.
10. Vysockij, E. N., Vysockij, D. E., Vysockij, I. E. (2003). Pat. No. 2274607 RU. Sposob ochystki vody i ustanovka dlja ego osushhestvleniya osushhestvleniya. No. 2003104764/15; declared: 17.02.2003; published: 20.04.2006, Bjul. No.

Надійшла (received) 15.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження закономірностей очищення водопровідної води методом виморожування/ З. Д. Безрук, Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинський, Г. В. Дорожинська, А. В. Конченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.137–141. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Исследование закономерностей очистки водопроводной воды методом вымораживания/ З. Д. Безрук, Д. Г. Радов, В. П. Маслов, Г. В. Дорожинский, Г. В. Дорожинская, А. В. Конченко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.137–141. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Investigation of water treatment by freezing method/ Z. Bezruk, D. Radov, V. Maslov, G. Dorozinsky, G. Dorozinska, A. Konchenko //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222). – P.137–141. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Безрук Зоя Домініківна – кандидат технічних наук, начальник відділу інструментально–лабораторного контролю, Державна екологічна інспекція у місті Києві, Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, вул. Набережно–Лугова, 4, м. Київ, Україна, 04080

Радов Денис Георгійович – працівник ДК «Укроборонпром»; вул. Дегтярівська, 36, м. Київ, Україна, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Володимир Петрович – доктор технічних наук, професор, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України, завідувач відділу фізико–технологічних основ сенсорного матеріалознавства; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинський Гліб Вячеславович – кандидат технічних наук, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України, старший науковий співробітник відділу фізико–технологічних основ сенсорного матеріалознавства; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Дорожинська Ганна Василівна – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри інформаційно–вимірювальних систем та технології екологічного моніторингу; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: annakushnir30@ukr.net.

Конченко Алла Вікторівна – студент кафедри інформаційно–вимірювальних систем та технології екологічного моніторингу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри інформаційно–вимірювальних систем та технології екологічного моніторингу; пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: spacespark315@gmail.com.

Безрук Зоя Доминиковна – кандидат технических наук, начальник отдела инструментально–лабораторного контроля, Государственная экологическая инспекция в городе Киеве, Министерство охраны окружающей природной среды Украины, ул. Набережно–Луговая, 4, г. Киев, Украина, 04080

Радов Денис Георгиевич – работник ГК «Укроборонпром»; ул. Дегтярёвская, 36, г. Киев, Украина, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Маслов Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН Украины, заведующий отделом физико–технологических основ сенсорного материаловедения; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Дорожинский Глеб Вячеславович – кандидат технических наук, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН Украины, старший научный сотрудник отдела физико–технологических основ сенсорного материаловедения; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Дорожинская Анна Васильевна – аспірант, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», аспірант кафедры информационно–измерительных систем и технологии экологического мониторинга; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: annakushnir30@ukr.net.

Конченко Алла Викторовна – студент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», студент кафедры информационно–измерительных систем и технологии экологического мониторинга; пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056; e-mail: spacespark315@gmail.com.

Bezruk Zoja – PhD, head of Instrumental and Laboratory Control Department, State Ecological Inspectorate in the city of Kiev, Ministry of Environmental Protection of Ukraine, 4 Naberezhno–Lugovaya str., Kiev, Ukraine, 04080;

Radov Denys – employee SC “Ukroboronprom”; 36 Dehtiarivska str., Kyiv, Ukraine, 04119; e-mail: Denis.Radov@ukroboronprom.com.

Maslov Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine, Professor, head of department of physical and technological bases of sensory materials; Nauky ave., 41, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: vpmaslov@ukr.net.

Dorozinsky Glib – PhD, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine, senior researcher of department of physical and technological bases of sensory materials; Nauky ave., 41, Kyiv, Ukraine, 03028; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

Dorozinska Hanna – graduate student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Environmental Monitoring, Peremogy ave., 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: annakushnir30@ukr.net.

Konchenko Alla – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", student of the Department of Information and Measurement Systems and Technology of Environmental Monitoring; Peremogy ave., 37, Kiev, Ukraine, 03056; e-mail: spacespark315@gmail.com.

УДК 504.06:622.33

В. Є. КОЛЕСНИК, А. В. ПАВЛИЧЕНКО

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИРОДООХОРОННИХ ЗАХОДІВ НА ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

Розглядаються підходи до оцінки ефективності впровадження природоохоронних заходів на різних етапах функціонування вугільних шахт. Розроблено методику оцінки рівнів екологічної небезпеки на територіях діючих і закритих шахт. Пропонується враховувати вплив 16 пріоритетних техногенних чинників вугледобування, що дозволяє в межах 15-ти бальної шкали встановити 3 рівні екологічної небезпеки: «низький» (0-5), «помірний» (5-10), «високий» (10-15). Виконано оцінку екологічної ефективності впровадження на вугільній шахті технологій закладки виробленого простору та розбирання й рекультивациі породного відвалу.

Ключові слова: вугільна шахта, екологічна небезпека, оцінка, деформації земної поверхні, породний відвал, закладка виробленого простору.

Рассматриваются подходы к оценке эффективности внедрения природоохранных мероприятий на различных этапах функционирования угольных шахт. Разработана методика оценки уровней экологической опасности на территориях действующих и закрытых шахт. Предлагается учитывать влияние 16 приоритетных техногенных факторов угледобычи, что позволяет в пределах 15-ти балльной шкалы установить 3 уровня экологической опасности: «низкий» (0-5), «умеренный» (5-10), «высокий» (10-15). Выполнена оценка экологической эффективности внедрения на угольной шахте технологий закладки выработанного пространства и разборки и рекультивации породного отвала.

Ключевые слова: угольная шахта, экологическая опасность, оценка, деформации земной поверхности, породный отвал, закладка выработанного пространства.

The paper deals with the ways of ecological problems solving caused by coal mines operation and liquidation. Long-term operation of coal mining enterprises caused high levels of contamination of environment, soils, surface and ground waters, as well as substantial waste disposal in coal mining regions. The results of the research are as follows: the developed complex methodology for assessment of ecological danger levels on the territories of operating and closed coal mines. The methodology enables efficient determination of the sum of average grades of expert judgments (in 4-point scale: 0 for no influence of the factor; 1 for minimum or indirect influence; 2 for recurrent influence (direct or indirect); 3 for continuous direct influence) of ecological state of the five main components of environment (atmosphere, hydrosphere, lithosphere, soils and biota). The influence of sixteen priority anthropogenic factors of coal mining is considered, which enables complex determination of the following three levels of ecological danger under the 15-point scale: "low" (0-5 points), "moderate" (5-10 points), "high" (10-15 points).

As for a scientific novelty, for the first time the problem of reliable and prompt assessment of the efficiency of implementation of nature protection measures complex for reduction of ecological danger of operation and liquidation of coal mines was formulated and solved.

The practical significance of the developed methodology consists in prompt assessment of the reduction efficiency of ecological danger levels of technological processes of mines operation and liquidation for the main components of environment. The methodology enables determination of efficiency of implementation of a range of nature protection measures at once and prediction of changes in the environment state under the conditions of mass liquidation of coal mines.

Keywords: coal mine, ecological danger, assessment, deformation of earth surface, waste dump, mined-out space stowing.

Вступ. Інтенсивний багаторічний видобуток вугілля призвів до значних порушень масиву гірських порід, забруднення компонентів навколишнього середовища, а також збільшення ризиків руйнування будинків та комунікацій. Найбільш інтенсивно це спостерігається у старопромислових вугледобувних регіонах [1]. Тому необхідним є створення методологічних основ комплексного оцінювання рівнів екологічної небезпеки функціонування та подальшої ліквідації гірничих підприємств [2].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Авторами в роботі [3] узагальнено та систематизовано інформацію про екологічний стан вугільних родовищ Донецького, Львівсько-Волинського кам'яновугільних і Дніпровського буровугільного басейнів. Багаторічна діяльність вугледобувних підприємств супроводжується утворенням значних обсягів побічних продуктів (пустих порід, шахтних вод), а також формуванням великих об'ємів виробленого простору. Акцентується увага на необхідності вивчення екологічних ризиків функціонування вугільних підприємств, особливо на етапі їх підготовки до ліквідації.

В роботі [4] обґрунтовується необхідність застосування індексу небезпечності об'єктів та екологічного ризику на етапі проектування промислових підприємств.

Для комплексної оцінки екологічності системних природно-техногенних об'єктів сформовано алгоритм забезпечення комплексної оцінки екологічної безпеки на рівні природно-техногенних комплексів, що дозволяє

прогнозувати та попереджувати деградаційні зміни у довкіллі [5].

В роботі [6] виконано коротко- та довгострокове прогнозування стратегій розвитку промислових регіонів України; ці прогнози можуть бути застосовані для визначення екологічних та техногенних наслідків реформування вугільної галузі.

В трудах [7] рекомендується оцінювати екологічні ризики у вугледобувних регіонах шляхом застосування комплексно-інформаційного методу. Для ідентифікації негативних наслідків, що виникають на етапах експлуатації та ліквідації вугледобувних підприємств, рекомендується комплексна методика оцінки екологічних ризиків [8].

Для характеристики поточного стану процесу вугледобування необхідно розробити кількісно-якісні критерії, що будуть визначати екологічну небезпеку як експлуатації, так і ліквідації вугільних підприємств (шахт). При цьому важливе значення мають параметри, які характеризують джерела утворення побічних продуктів вуглевидобутку (породу, шахтну воду, шлами збагачувальних фабрик), наявність та стан шахтної інфраструктури, котельень, шахтних стволів, горіння териконів, деформацію земної поверхні та ін. [3, 8, 9].

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення закономірностей та механізмів змін екологічної ситуації в вугледобувних регіонах при різних варіантах застосування природоохоронних заходів.

© В. Є. Колесник, А. В. Павличенко. 2016

Задачею роботи є розробка методики комплексної оцінки ефективності впровадження природоохоронних заходів на етапах експлуатації та подальшої підготовки вугільних шахт до ліквідації.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Дослідження рівнів екологічної небезпеки експлуатації вугільних шахт до та після впровадження природо- та ресурсозберігаючих технологій.

2. Прогнозування рівнів екологічної небезпеки експлуатації вугільної шахти при застосування відходів вуглевидобутку для закладки виробленого простору.

Матеріали та методи дослідження рівнів екологічної небезпеки процесів експлуатації та ліквідації шахт при різних варіантах застосування природоохоронних заходів. Методичною основою виконання комплексних досліджень є: оцінка рівнів екологічної небезпеки на територіях діючих і закритих вугільних шахт. Методика дозволяє оперативним визначити суму середніх балів експертних оцінок (за 4-х бальною шкалою:

0 – вплив фактору відсутній;

1 – мінімальний або опосередкований вплив;

2 – періодичний вплив (безпосередній або опосередкований);

3 – безперервний безпосередній вплив) екологічного стану 5-ти основних компонентів довкілля (атмосфери, гідросфери, літосфери, ґрунтів і біоти).

Враховується вплив 16-ти пріоритетних техногенних чинників вугледобування, що дозволяє комплексно в межах 15-ти бальної шкали встановити 3 рівня екологічної небезпеки: «низький» (0-5 балів), «помірний» (5-10 балів), «високий» (10-15 балів).

Об'єктом дослідження є екологічна безпека функціонування вугільних шахт на етапах експлуатації та підготовки до ліквідації.

Предметом дослідження є оцінювання екологічної ефективності впровадження природоохоронних заходів на вугільних шахтах.

Для оцінки рівнів екологічної небезпеки, що виникає на різних етапах функціонування вугледобувних підприємств (аж до моменту закриття нерентабельних та збиткових шахт), рекомендується аналізувати інтенсивність та періодичність впливу техногенних наслідків функціонування вугледобувних підприємств на стан об'єктів навколишнього середовища [8, 10].

Результати дослідження ефективності впровадження природоохоронних заходів на етапі експлуатації вугільної шахти. Видобуток вугілля шахтами (а у подальшому при відпрацюванні запасів і їх закритті) посилює вплив гірничих робіт на навколишнє середовище. Відсутність надійних даних про зміни стану об'єктів довкілля на різних етапах функціонування гірничого підприємства ускладнює оцінку еко-

логічних та техногенних ризиків. Кількісна чи якісна оцінка ризику може бути основою для розробки комплексу заходів з покращення екологічного стану вугледобувних регіонів.

Загальну оцінку рівня екологічної небезпеки вугледобувних регіонів рекомендується визначати як суму оцінок середніх балів таблиці у виді матриці |16x5| з 16-ти рядків (впливів на довкілля) та 5-ти стовпчиків (об'єктів довкілля). Шкала комплексної оцінки рівнів екологічної небезпеки процесів експлуатації та ліквідації шахт переставлена в табл. 1.

Таблиця 1 – Шкала комплексної оцінки рівня екологічної небезпеки експлуатації та ліквідації вугледобувних підприємств

Діапазон комплексних оцінок	Рівень небезпеки
0–5	низький
5–10	помірний
10–15	високий

В попередніх дослідженнях [8, 10] встановлено, що експлуатація вугільної шахти призводить до формування «високого» рівня екологічної небезпеки для навколишнього середовища. Аналогічний «високий» рівень екологічної небезпеки має і «мокра» ліквідація шахт. Слід відмітити, що «суха» ліквідація вугільної шахти дозволяє зменшити рівень екологічної небезпеки з «високого» до «помірного».

Для зменшення негативних впливів на довкілля вугільних шахт рекомендується застосування технологій закладки виробленого простору вугільних шахт з одночасним розбиранням породних відвалів.

Результати комплексної оцінки змін рівнів та характеру екологічного впливу на об'єкти довкілля 16 техногенних чинників при різних варіантах застосування природоохоронних заходів наведені в табл. 2.

Графічне відображення результатів експертного оцінювання ефективності реалізації природоохоронних заходів на вугледобувних підприємствах за допомогою діаграми Парето приведено на рис. 1.

Загальну оцінку рівня екологічної небезпеки вугледобувних підприємств при різних варіантах застосування природоохоронних заходів приведено в табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 виявив, що своєчасне впровадження природоохоронних заходів на вугледобувних підприємствах дозволить знизити рівень екологічної небезпеки з «високого» до «помірного».

Слід відмітити, що впровадження запропонованих заходів буде ефективним лише за умови реалізації на діючому вугледобувному підприємстві; це дозволить в подальшому знизити рівні екологічної небезпеки при ліквідації нерентабельних вугільних шахт.

Таблиця 2 – Експертна оцінка екологічної ефективності застосування комплексу природоохоронних заходів на вугільних шахтах

№ з/п	Техногенні наслідки експлуатації шахти, як чинники негативного впливу на довкілля	Сумарні оцінки за окремими чинниками впливу			
		I	II	III	IV
1	Зміна (зниження) стійкості та міцності гірських порід	8	4	5	4
2	Деформація масиву гірських порід	12	5	8	5
3	Просідання земної поверхні	12	5	8	5
4	Водоносичення масиву гірських порід	10	5	10	7
5	Порушення гідрологічного режиму	11	6	11	8
6	Виснаження водоносних горизонтів	10	5	9	8
7	Забруднення поверхневих водних об'єктів	8	6	5	5
8	Міграція забруднюючих речовин (викиди, скиди, відходи тощо)	10	5	5	5
9	Змішування шахтних вод з питними водами підземних горизонтів	8	6	7	7
10	Підтоплення та заболочування земель	12	5	8	5
11	Відведення земель під породні відвали	10	8	3	5
12	Відведення земель під відстійники шахтних вод	10	10	10	10
13	Горіння та пиління відвалів	9	8	4	6
14	Деформації і руйнування будівель та об'єктів інфраструктури	11	8	8	8
15	Утворення вибухонебезпечних метано-повітряних сумішей	10	6	10	8
16	Емісія шахтних газів на земну поверхню	10	6	10	6
I	Сумарні бали за всіма факторами впливу	161	98	121	102
II	Середні бали	10,07	6,12	7,56	6,38
III	Загальне погіршення стану об'єктів довкілля на територіях вугледобувних регіонів (експертні оцінки)	13	8	6	9

Примітка: I – без застосування природоохоронних заходів; II – проведення закладки виробленого простору; III – розбирання та рекультивация породного відвалу; IV – застосування закладки виробленого простору з розбиранням породного відвалу

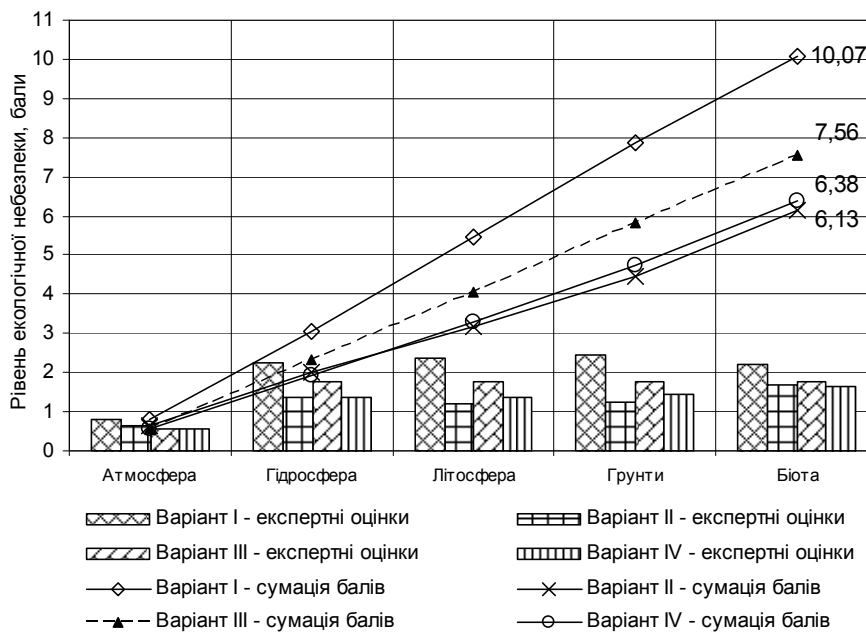


Рис. 1 – Ефективність застосовуваних природоохоронних заходів на вугільних шахтах, що визначена за комплексною оцінкою рівнів екологічної небезпеки: I – без природоохоронних заходів; II – проведення закладки виробленого простору; III – розбирання та рекультивация породного відвалу; IV – застосування закладки виробленого простору з розбиранням породного відвалу

Таблиця 3 – Оцінки ефективності впровадження природоохоронних заходів на вугледобувних підприємствах

Варіанти застосування природоохоронних заходів	Діапазон значень комплексної оцінки екологічної небезпеки	Рівень небезпеки
Без застосування природоохоронних заходів	10,07	високий
Проведення закладки виробленого простору	6,12	помірний
Розбирання та рекультивация породного відвалу	7,56	помірний
Застосування закладки виробленого простору з розбиранням породного відвалу	6,38	помірний

Обговорення результатів дослідження ефективності запропонованих природоохоронних заходів. В результаті проведеної оцінки встановлено, що використання відходів вуглевидобутку для виготовлення сумішей з метою закладки виробленого простору вугільних шахт дозволить зменшити обсяги відходів, а як наслідок і забруднення сільськогосподарських територій поблизу шахтних відвалів та подальше накопичення небезпечних забруднюючих речовин у продуктах харчування. Також буде попереджено просідання та деформація земної поверхні, її наступне заболочування та вилучення земель з господарського використання.

Результати проведеної комплексної оцінки екологічного стану об'єктів довкілля на території вугледобувного підприємства є теоретичною та практичною основою для вирішення прикладних задач, таких як: планування екологічно обгрунтованого рівня техногенного навантаження, розробка схем розвитку та розміщення технологічних ділянок, а також розробка відповідних природоохоронних заходів.

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблена комплексна методика оцінки рівнів екологічної небезпеки на територіях діючих і закритих вугільних шахт. Методика дозволяє оперативно визначати суму середніх балів експертних оцінок екологічного стану основних компонентів довкілля (атмосфери, гідросфери, літосфери, ґрунтів і біоти). Розроблена методика дозволяє оперативно оцінювати ефективність зменшення рівнів екологічної небезпеки технологічних процесів експлуатації та ліквідації шахт для основних компонентів довкілля. При цьому можна визначати ефективність реалізації відразу декількох природоохоронних заходів та прогнозувати зміни стану довкілля в умовах масової ліквідації вугільних шахт.

Список літератури:

1. Рудько, Г. І. Екологічні ризики при розробці родовищ корисних копалин [Текст] / Г. І. Рудько, О. І. Бондар // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2005. – № 5. – С. 75–84.
2. Яковлев, С. О. Сучасні фактори національної безпеки України при формуванні мінерально-сировинної бази [Текст] / С. О. Яковлев // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2005. – № 5. – С. 84–91.
3. Рудько, Г. І. Екологічна безпека вугільних родовищ України [Текст]: Монографія / Г. І. Рудько, О. І. Бондар, Є. О. Яковлев, О. А. Машков, В. М. Єрмаков, С. А. Плахотній. – Київ: Букрек, 2016. – 608 с.
4. Статюха, Г. О. До питання кількісної оцінки екологічної безпеки при ОВНС [Текст] / Г. О. Статюха, В. А. Соколов, І. Б. Абрамов, Т. В. Бойко, А. О. Абрамова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 6/6 (48). – С. 44–46. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/3347/3147>
5. Козуля, Т. В. Комплексна екологічна оцінка природно-техногенних комплексів на основі MIPS- і ризик-аналізу [Текст]

- / Т. В. Козуля, Д. І. Ємельянова, М. М. Козуля // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 3/10 (69). – С. 8–13. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/24624/22722>
6. Бугасва, Л. М. Використання методів системної динаміки для дослідження сталого розвитку регіонів України [Текст] / Л. М. Бугасва, М. М. Османов, Г. О. Статюха // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 2/10 (44). – С. 22–25. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/2772/2578>
7. Аоаменко, М. І. Оцінка екологічного ризику в шахтних регіонах комплексно-інформаційним методом [Текст] / М. І. Аоаменко, Е. А. Дармофал // Системи обробки інформації. – 2014. – № 8. – С. 171–173.
8. Павличенко, А. В. Ідентифікація екологічних ризиків, що виникають на різних етапах функціонування вугледобувних підприємств [Текст]: міжвід. зб. наук. праць / А. В. Павличенко // Геотехнічна механіка. – 2015. – № 124. – С. 280–288.
9. Лисиченко, Г. В. Методологія оцінювання екологічних ризиків [Текст] / Г. В. Лисиченко, Г. А. Хміль, С. В. Барбашев. – Одеса: Астропринт, 2011. – 368 с.
10. Павличенко, А. В. Шляхи удосконалення природоохоронної діяльності вугледобувного підприємства [Текст] / А. В. Павличенко // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2015. – № 49. – С. 297–305.

Bibliography (transliterated):

1. Rudko, H. I., Bondar, O. I. (2005). Ekolohichni ryzyky pry rozrobtsi rodovyshch korysnykh kopalyn. Ekolohiia dovkillia ta bezpeka zhyttiedialnosti, 5, 75–84.
2. Yakovliev, Ie. O. (2005). Suchasni faktory natsionalnoi bezpeky Ukrainy pry formuvanni mineralno-syrovynnoi bazy. Ekolohiia dovkillia ta bezpeka zhyttiedialnosti, 5, 84–91.
3. Rudko, H. I., Bondar, O. I., Yakovliev, Ie. O., Mashkov, O. A., Yermakov, V. M., Plakhotnij, S. A. (2016). Ekolohichna bezpeka vuhilnykh rodovyshch Ukrainy. Kyiv: Bukrek, 608.
4. Statiukha, H. O., Sokolov, V. A., Abramov, I. B., Boiko, T. V., Abramova, A. O. (2010). Do pytannia kilkisnoi otsinky ekolohichnoi bezpeky pry OVNS. Skhidno-levropeysky zhurnalпередovykh tekhnolohii, 6 (6 (48)), 44–46. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/3347/3147>
5. Kozulia, T. V., Yemelianova, D. I., Kozulia, M. M. (2014). Kompleksna ekolohichna otsinka pryrodno-tekhnohennykh kompleksiv na osnovi MIPS- i ryzyk-analizu. Skhidno-levropeysky zhurnal передovykh tekhnolohii, 3 (10 (69)), 8–13. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/24624/22722>
6. Buhaiava, L. M., Osmanov, M. M., Statiukha, H. O. (2010). Vykorystannia metodiv systemnoi dynamiky dlia doslidzhennia staloho rozvytku rehioniv Ukrainy. Skhidno-levropeysky zhurnal передovykh tekhnolohii, 2 (10 (44)), 22–25. Available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/2772/2578>
7. Adamenko, M. I., Darmofal, E. A. (2014). Otsinka ekolohichnoho ryzyku v shakhtnykh rehionakh kompleksno-informatsiynym metodom. Systemy obrobky informatsii, 8, 171–173.
8. Pavlychenko, A. V. (2015). Identyfikatsiia ekolohichnykh ryzykiv, shcho vynykaiut na riznykh etapakh funktsionuvannia vuhledobuvnykh pidpryemstv. Neotekhnichna mekhanika, 124, 280–288.
9. Lysychenko, H. V., Khmil, H. A., Barbashev, S. V. (2011). Metodolohiia otsiniuvannia ekolohichnykh ryzykiv. Odesa: Astroprynt, 368.
10. Pavlychenko, A. V. (2015). Shliakhy udoskonalennia pryrodookhoronnoi diialnosti vuhledobuvnoho pidpryemstva. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu, 49, 297–305.

Надійшла (received) 20.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка ефективності реалізації природоохоронних заходів на вугільних шахтах/ В. Є. Колесник, А. В. Павличенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 50(1222). – С.142–146. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Оценка эффективности реализации природоохранных мероприятий на угольных шахтах/ В. Е. Колесник, А. В. Павличенко// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.142–146. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Efficiency Assessment for Nature Protection Measures Implementation on Coal Mines/ V. Ye. Kolesnyk, A. V. Pavlychenko //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P. 142–146. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Колесник Валерій Євгенійович – доктор технічних наук, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», професор кафедри екології, пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, e-mail: kolesnikve@yahoo.com.

Павличенко Артем Володимирович – кандидат біологічних наук, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», доцент кафедри екології, пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, e-mail: pavlychenkoa@nmu.org.ua.

Колесник Валерій Євгеньевич – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», профессор кафедры экологии, пр. Д. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, 49005, e-mail: kolesnikve@yahoo.com.

Павличенко Артем Владимирович – кандидат биологических наук, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», доцент кафедры экологии, пр. Д. Яворницкого, 19, Днепр, Украина, 49005, e-mail: pavlychenkoa@nmu.org.ua.

Kolesnyk Valerii – Doctor of Technical Science, State Institution of Higher Education «National Mining University», Professor of Ecology Department, Dmytra Yavornytskoho ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail: kolesnikve@yahoo.com.

Pavlychenko Artem– PhD, State Higher Educational Institution «National Mining University», Associate Professor of Ecology Department, Dmytra Yavornytskoho ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail: pavlychenkoa@nmu.org.ua.

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ

УДК 621.74

А. А. ПУЛЯЕВ, А. В. ЗОЛОТАРЕВА, В. И. ЧУМАЧЕНКО, В. В. БОГДАН, Н. Н. БЕЛИК

РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЛИТОГО ПОРШНЮ ДЛЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Проведено комп'ютерне моделювання процесів заповнення кокілю розплавом при виготовленні литих поршнів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). На основі аналізу динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, виявлено зони формування внутрішніх дефектів, зокрема газової та усадкової пористості. Запропоновано використання результатів моделювання процесів заповнення робочої порожнини кокілю для подальшої параметричної класифікації з визначення проблемних зон у виливках поршню.

Ключові слова: двигуни внутрішнього згоряння, поршень, кокіль, газова пористість, усадкова пористість

Проведено компьютерное моделирование процессов заполнения кокиля расплавом при изготовлении литых поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС). На основе анализа динамики охлаждения отливки, фазового перехода, связанности зон, кристаллизуются в последнюю очередь, выявлены зоны формирования внутренних дефектов, в частности газовой и усадочной пористости. Предложено использование результатов моделирования процессов заполнения рабочей полости кокиля для дальнейшей параметрической классификации по определению проблемных зон в отливках поршня.

Ключевые слова: двигатели внутреннего сгорания, поршень, кокиль, газовая пористость, усадочная пористость

The actual applied problem of development of design and technological solutions for the manufacture of internal combustion engine (ICE) pistons is studied. A computer simulation of the processes of chill filling with a melt is carried out. Based on the analysis of the cooling dynamics of the casting, the phase transition and the bonding of the zones crystallized last of all, zones of formation of internal defects, in particular, gas and shrinkage porosity, are identified. The use of the simulation results of the filling processes of the chill mold working cavity for further parametric classification by determination of problem zones in piston castings is proposed. A comprehensive approach to design and technological solutions, as well as a procedure for determining the localization of internal defects cast by an ICE piston, is proposed. In particular, parametric methods of classification are proposed, which can be performed on the basis of the results of computer simulation of the filling process of the chill mold working cavity.

Keywords: internal combustion engines, piston, chill mold, gas porosity, shrinkage porosity

Вступ. Сучасні тенденції боротьби за якість продукції передбачають використання комплексного підходу щодо управління якістю виливків. Ця проблема розглядається в різних напрямках – вибір раціональних технологічних параметрів технологічних процесів та їх узгодженість на етапі конструкторської підготовки виробництва [1–4], спеціальні технологічні засоби підвищення експлуатаційних властивостей на етапі розробки технологічних процесів [5, 6], комп'ютерне моделювання динаміки процесів, що протікають в ливарних формах. Існуючі методи чисельного моделювання з використанням фізичних моделей ливарних процесів, які відбуваються в результаті охолодження виливка у формі, є трудомісткими, при цьому варіювання різними технологічними параметрами є практично неможливим. Все сказане стосується й литих деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Аналіз літературних даних. Питання комп'ютерно-інтегрованого проектування литих поршнів з використанням програмних продуктів SolidWorks і LVM Flow розглянуті в роботах [7–9]. Зокрема наведені результати комп'ютерного моделювання процесу кристалізації в литих деталях типу «поршень» при використанні різних тепло ізолюючих покриттів кокілю. На основі отриманих результатів зроблено висновок про можливість оптимізації параметрів якості поршня шляхом ефективного управління процесами кристалізації. Наведені також результати комп'ютерного моделювання усадки та формування усадкових дефектів в литих деталях типу «поршень» при використанні різних термоізолюючих покриттів кокіля. На основі отриманих результатів зроблено висновок про

важливість підбору матеріалу термоізолюючого покриття для зниження дефектів. Запропоновані конструкторсько-технологічні рішення отримані на основі моделювання в програмному пакеті LVM Flow. Але не вказано, варіюванням яких саме параметрів слід оптимізувати конструкторсько-технологічні рішення щодо конструкції ливарної оснастки. Вибір таких факторів дуже важливий, бо дозволяє з використанням методів планування експерименту побудувати рівняння регресії або взагалі математичні моделі процесів заповнення ливарної форми та кристалізації, що зв'язують конструкторсько-технологічні параметри з вмістом газової пористості, величини усадки чи розподілу пористості по об'єму виливку. На основі такого типового для уніфікованих технологічних процесів виготовлення литих поршнів математичного опису можна визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри, що закладаються в ливарну оснастку на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва [10, 11].

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є виявлення місць розташування та розмірів дефектів газоусадкового характеру в литих поршнях ДВЗ.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- розробка 3D моделі виливку;
- комп'ютерне моделювання заповнення форми та аналіз динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу.

© А. А. Пуляев, А. В. Золотарева, В. И. Чумаченко, В. В. Богдан, Н. Н. Белик. 2016

Розробка моделі та результати комп'ютерного моделювання заповнення форми розплавом. Як досліджувана деталь для комп'ютерно-інтегрованого моделювання був узятий литий поршень Д 240-1004021, вироблений на Харківському підприємстві ПАТ «АВТРАМАТ». В якості інструментарію для інженерного моделювання процесу лиття поршнів була обрана ІКС LVM Flow 2.91 (власник ліцензії - ПАТ «АВТРАМАТ»). Створення 3D-моделі (рис.1) виконувалося з урахуванням вимог, що пред'являються до виливків, одержуваних в кокіль із застосуванням можливостей програм SolidWorks і LVM Flow.

Граничні умови і вихідні дані для моделювання задавалися в наступній послідовності: 3D-імпорт і створення кінцево-різницевої моделі; призначення матеріалу для відливання і технологічної оснастки, а також розділового покриття, що наноситься на поверхні оснастки (матеріал виливки поршня –

АК12М2МгН ГОСТ 1583-93 (ДСТУ 2839-94); матеріал технологічної оснастки – Сталь 20, СЧ20; на формотворчих частини кокіль нанесена кокільна фарба товщиною – 0,2 мм, яка має теплопровідність $\lambda=1,90$ Вт/м·К; призначення початкової температури розплаву і технологічної оснастки, її охолодження різними теплоносіями.

Для прогнозування мікропористості і газоусадкової пористості використовується критерій Niyama, який показує спрямованість процесу кристалізації. Для зручності аналізу результатів моделювання заповнюваність форми розглядалася поетапно, у міру заповнення розплавом окремих конструктивних частин. На загальному вигляді для приклада заповнення форми на 50 % (рис. 1) вказана шкала, де чисельно і в кольорі показана величина швидкості руху розплавленого металу, стрілками показано напрямок руху металу.

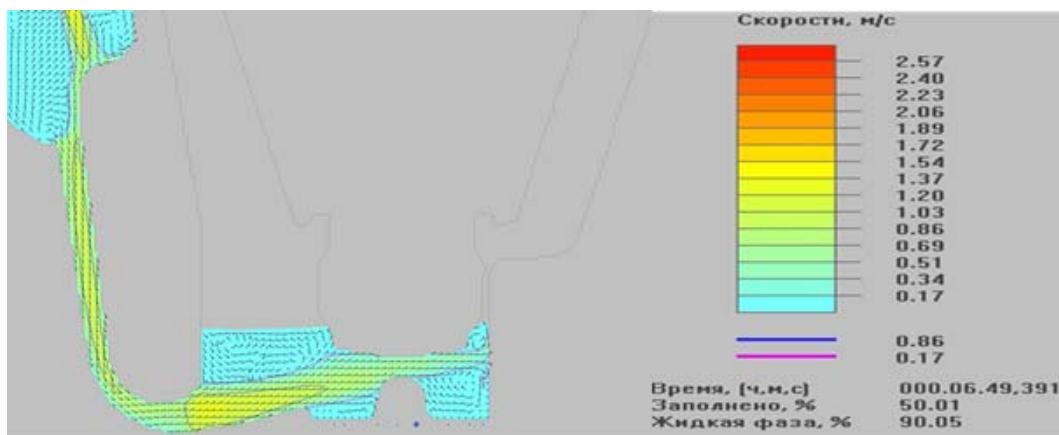


Рис. 1 – Загальний вигляд заповнення форми рас плавом на 50 %

Визначено, що метал в стояку рухається без зайвих завихрень та при вході металу в стояк швидкість відносно невелика, але в міру просування по стояку вона зростає. Підвищення швидкості на висоті стояка дозволяє уникнути втрат температур на початковому етапі заливки, що для малогабаритних деталей є істотним чинником. За таких умов метал потрапляє в наступний елемент ливникової системи з найменшими втратами. За результатами моделювання встановлено, що швидкість руху металу становить 0,4 м/с. Після цього метал надходить в колектор, площа перерізу якого дорівнює площі перетину стояка, і за рахунок цього метал поступово заповнює колектор. Швидкість металу при вході в колектор зменшується і її значення становить 0,2 м/с. Таке значення швидкості течії металу в формі в даному елементі ливникової системи вважається задовільним.

Як видно з результатів, на донній порожнині виливку розплав рухається від застиглих частин до більш гарячим. У той же час створюються зустрічні потоки, але завихрення відбувається всередині виливки, які не переміщуючись до стінки форми. Результати моделювання охолодження виливки і подальший аналіз зон рідкої і твердої фаз дозволяють виявити характер спрямованості кристалізації виливка. Спочатку охолоджувалася тонка «спідниця»

деталі поршня, далі область пальцевих отворів і в останню чергу кристалізувалася головка поршня.

Проведений аналіз показав, що інтервал між повним затвердіння «спідниці» поршня і головки викликає нерівномірність зростання кристалів в тілі виливка, що призводить при експлуатації до зміни механічних властивостей деталі. Аналіз динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газоусадочної характеру. В даному дослідженні для прогнозування мікропористості і газоусадочної пористості застосований критерій Niyama Цей критерій є надійним інструментом для простих відливок, але в разі виливків зі складною геометрією його використання вимагає більш ретельного аналізу результатів моделювання. обчислюється як температурний градієнт, поділений на корінь квадратний з швидкості охолодження в даному розрахунковому вузлі, іншими словами він показує спрямованість процесу кристалізації.

На рис. 2 показано загальний характер напрямку кристалізації виливку для моменту часу, коли зміст рідкої фази складає 68%, а на рис. 3 – місця розташування дефектів газоусадкового характеру згідно з критерієм Niyama.

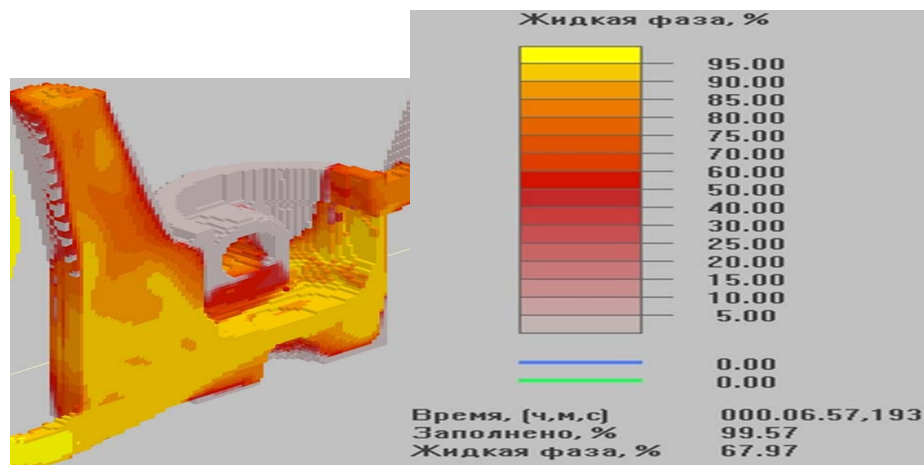


Рис. 2 – Загальний характер напрямку кристалізації виливку

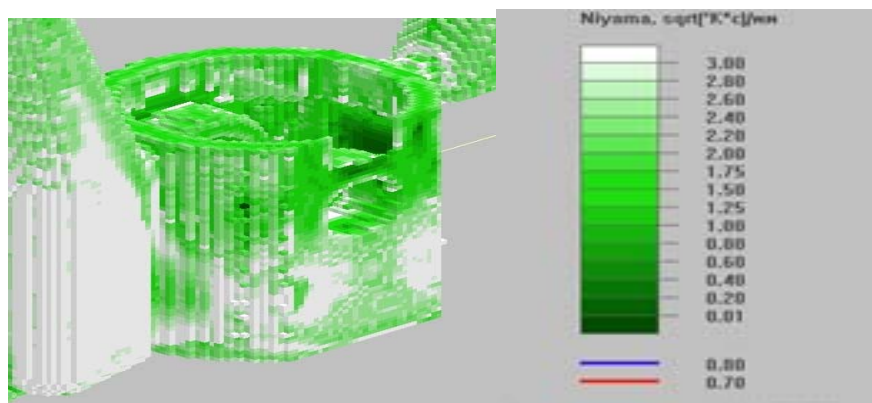


Рис. 3 – Місця розташування дефектів газосадкового характеру згідно з критерієм Niyama в масиві бобишки

Отримані результати моделювання охолодження виливки і подальший аналіз зон рідкої і твердої фаз дозволяють виявити характер спрямованості кристалізації виливка та визначити потенційно небезпечні місця формування газової пористості та усадкових дефектів.

Обговорення результатів. Результати моделювання процесів заповнення робочої порожнини кокілю можуть бути використані для подальшої параметричної класифікації, якщо в якості факторів впливу на локалізацію внутрішніх дефектів обрати відповідні конструкторсько-технологічні рішення щодо ливарної оснастки. В цьому разі будується класифікаційне правило у вигляді лінійної дискримінантної функції вигляду [9–14]

$$y_0 = \frac{1}{2}(m_A + m_B)' \text{cov}^{-1}(x)(m_A - m_B) - \ln \frac{P(A)}{P(B)}, (1)$$

де m_A і m_B – математичні очікування векторів X для класів A та B (A – годне, B – брак за внутрішніми дефектами), y_0 – порогове значення, що дозволяє порівняти брак та годне литво,

$\text{cov}(x) = \frac{1}{N} X^T X - m^T m$ – коваріаційна матриця, $P(A)$,

$P(B)$ – апіорні ймовірності класів.

Можливе також представлення факторів впливу у вигляді нечітких значень [15–21], якщо складно визначити їх безпосередньо на основі моделювання та для оцінки відповідних рішень залучаються експерти.

В цьому разі варто розглянути різні технологічні варіанти оформлення конструкторської розробки щодо оснастки поршнів, якими можуть бути як безпосередні

Висновки. Встановлено, що інтервал між повним затвердіння «спідниці» поршня і головки викликає нерівномірність зростання кристалів в тілі виливка, що призводить при експлуатації до зміни механічних властивостей деталі. Аналіз динаміки охолодження виливки, фазового переходу, пов'язаності зон, що кристалізуються в останню чергу, дозволили визначити місця можливої появи дефектів газосадочного характеру.

Запропоновано використання результатів моделювання процесів заповнення робочої порожнини кокілю для подальшої параметричної класифікації, якщо в якості факторів впливу на локалізацію внутрішніх дефектів обрати відповідні конструкторсько-технологічні рішення щодо ливарної оснастки.

Література

1. Акимов, О. В. Анализ погрешностей формообразования отливок колес турбин турбокомпрессоров для наддува ДВС на этапе изготовления их восковых моделей [Текст] / О. В. Акимов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 3. – С. 16–24.
2. Хорошилов, О. Н. Повышение качества непрерывнолитых заготовок из медных сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко, А. В. Кипенский, В. В. Наний // Металлургия машиностроения, – 2012. – № 12. – С. 29–31.
3. Бреславский, Д. В. Управление качеством непрерывно литых заготовок [Текст] / Д. В. Бреславский, О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Вестник ДДМА. – 2010. – № 3 (20). – С. 41–46.
4. Idan, A. F. I. The study of the influence of laser hardening

- conditions on the change in properties of steels [Text] / A. F. I. Idan, O. Akimov, L. Golovko, O. Goncharuk, K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 2/5 (80). – P. 69–73. doi: [10.15587/1729-4061.2016.65455](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455)
5. Kostyk, K. O. Development of the high-speed boriding technology of alloy steel [Text] / K. O. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 6/11 (78). – P. 8–15. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55015](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55015)
 6. Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding [Text] / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Demin, K. Kostyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 2/5 (80). – P. 45–49. doi: [10.15587/1729-4061.2016.65454](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65454)
 7. Краснокутский, Е. А. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации литой детали в кокиле [Текст] / Е. А. Краснокутский // Технологический аудит и резервы производства – 2012. – № 1/1 (3). – С. 3–8. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4867](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4867)
 8. Савченко, Ю. Применение компьютерно-интегрированных систем и технологий в производстве поршней [Текст] / Ю. Савченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – № 1/1 (3). – С. 8–13. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4868](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4868)
 9. Акимов, О. В. Повышение качества литых деталей ДВС: учет технологических аспектов автоматизированного литейного производства [Текст] / О. В. Акимов, О. С. Коваль, А. А. Пуляев, Е. П. Дымко, Т. О. Егоренко, С. В. Высоцкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 6/1 (67) – С. 56–62. doi: [10.15587/1729-4061.2015.56039](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56039)
 10. Дёмин, Д. А. Типизация математического описания в задачах синтеза оптимального регулятора технологических параметров литейного производства [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 1/4 (67). – С. 43–56. Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/21203/19147>
 11. Дёмин, Д. А. Адаптивное моделирование в задаче поиска оптимального управления термовременной обработкой чугуна [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/4 (66). – С. 31–37. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19453/17110>
 12. Mourad, A. Localization of vectors–patterns in the problems of parametric classification with the purpose of increasing its accuracy [Text] / A. Mourad // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/4 (82). – P. 10–20. doi: [10.15587/1729-4061.2016.76171](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76171)
 13. Дёмин Д. А. Принятие решений в процессе управления электроплавкой с учетом факторов нестабильности технологического процесса [Текст] / Д. А. Дёмин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 17. – С. 67–72.
 14. Дёмин, Д. А. Идентификация чугуна для определения рациональных режимов легирования [Текст] / Д. А. Дёмин, А. Б. Бошко, А. В. Зрайченко, А. Г. Некрасов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 4/1 (22). – С. 29–32.
 15. Пономаренко, О. И. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации как резерв повышения качества поршней ДВС [Текст] / О. И. Пономаренко Н. С. Тренёв // Технологический аудит и резервы производства – 2013. – № 6/2 (14). – С. 36–40. doi: [10.15587/2312-8372.2013.19529](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19529)
 16. Дёмин, Д. А. Обработка экспериментальных данных и построение математической модели технологического процесса методом наименьших квадратов (МНК) [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 3/1. – С. 47–50.
 17. Vasenko Iu. A. Technology for improved wear iron [Text] / Iu. A. Vasenko // Technology Audit and Production Reserves. – 2012. – № 1/1 (3). – P. 17–21. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4870](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4870)
 18. Дёмин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Дёмин // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 15–23.
 19. Косячков, В. А. Перспективы производства биметаллических отливок модифицированием чугуна в литейной форме [Текст] / В. А. Косячков, М. А. Фесенко, Д. В. Денисенко // Процессы литья. – 2004. – № 4. – С. 80.
 20. Фесенко, М. А. Внутриформенное модифицирование для получения чугунных отливок с дифференцированными структурой и свойствами [Текст] / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко, В. А. Косячков // Литейное производство. – 2010. – № 1. – С. 7–13.
 21. Фесенко, М. А. Исследование процессов внутриформенной обработки чугуна методами физического моделирования [Текст] / М. А. Фесенко, В. А. Фесенко, А. Н. Косячков // Вестник ДГМА. – 2006. – № 3. – С. 7–14.
- ### References
1. Akimov, O. V. (2003). Analiz pogreshnostej formoobrazovanija otlivok koles turbin turbokompressorov dlja nadduva DVS na jetape izgotovlenija ih voskovykh modelej. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 3, 16–24.
 2. Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I., Kipenskiy, A. V., Naniy, V. V. (2012). Povyshenie kachestva nepreryynolityh zagotovok iz mednyh splavov. Metallurgija mashinostroenija, 12, 29–31.
 3. Breslavskij, D. V., Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I. (2010). Upravlenie kachestvom nepreryvno lityh zagotovok. Vestnik DDMA, 3 (20), 41–46.
 4. Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K. (2016). The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (80)), 69–73. doi: [10.15587/1729-4061.2016.65455](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65455)
 5. Kostyk, K. O. (2015). Development of the high-speed boriding technology of alloy steel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (11 (78)), 8–15. doi: [10.15587/1729-4061.2015.55015](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55015)
 6. Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K. (2016). Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (80)), 45–49. doi: [10.15587/1729-4061.2016.65454](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65454)
 7. Krasnokutskij, E. A. (2012). The simulation of crystallization in a metal mold cast parts. Technology Audit and Production Reserves, 1 (1 (3)), 3–8. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4867](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4867)
 8. Savchenko, Ju. Je. (2012). Use of computer-integrated systems and technology in the production of pistons. Technology Audit and Production Reserves, 1 (1 (3)), 8–13. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4868](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4868)
 9. Akimov, O. V., Koval', O. S., Puljaev, A. A., Dymko, E. P., Yehorenko, T. O., Vysockij, S. V. (2015). Quality improvement of cast parts of ice: accounting technological aspects of the automated foundry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (78)), 56–62. doi: [10.15587/1729-4061.2015.56039](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56039)
 10. Demin, D. A. (2014). Tipizacija matematičeskogo opisaniya v zadachah sinteza optimal'nogo reguljatora tehnologičeskikh parametrov litejnogo proizvodstva. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 1 (4 (67)), 43–56. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/21203/19147>
 11. Demin, D. A. (2013). Adaptivnoe modelirovanie v zadache poiska optimal'nogo upravlenija termovremennoj obrabotkoj chuguna. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 6 (4 (66)), 31–37. – Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/19453/17110>
 12. Mourad, A. (2016). Localization of vectors–patterns in the problems of parametric classification with the purpose of increasing its accuracy. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (4 (82)), 10–12. doi: [10.15587/1729-4061.2016.76171](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76171)
 13. Demin, D. A. (2010). Prinjatje reshenij v processe upravlenija jelektroplavkoj s uchetom faktorov nestabil'nosti tehnologičeskogo processa. Vestnik NTU «HPI», 17, 67–72.
 14. Demin, D. A., Bozhko, A. B., Zrajchenko, A. V., Nekrasov, A. G. (2006). Identifikacija chuguna dlja opredelenija racional'nyh rezhimov legirovanija. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 4 (1 (22)), 29–32.
 15. Ponomarenko, O. I., Trenjov, N. S. (2013). Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ICE. Technology Audit and Production Reserves, 6 (2 (14)), 36–40. doi: [10.15587/2312-8372.2013.19529](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19529)
 16. Demin, D. A. (2006). Obrabotka jeksperimental'nyh dannyh i postroenie matematičeskoj modeli tehnologičeskogo processa metodom naimen'shix kvadratov (MNK). Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 3 (1), 47–50.
 17. Vasenko Iu. A. (2012). Technology for improved wear iron.

- Technology Audit and Production Reserves, 1 (1 (3)), 17–21. doi: [10.15587/2312-8372.2012.4870](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4870)
18. Demin, D. A. (2013). Nechetkaja klasterizacija v zadache postroenija modelej «sostav – svojstvo» po dannym passivnogo jeksperimenta v uslovijah neopredeljonnosti. Problemy mashinostroenija, 16 (6), 15–23.
 19. Kosjachkov, V. A., Fesenko, M. A., Denisenko, D. V. (2004). Perspektivy proizvodstva bimetallicheskih otlivok modifirovanijem chuguna v litejnoj form. Processy lit'ja, 4, 80.
 20. Fesenko, M. A., Fesenko, A. N., Kosjachkov, V. A. (2010). Vnutriformennoe modifirovanie dlja poluchenija chugunnyh otlivok s differencirovannymi strukturaj i svojstvami. Litejnoe proizvodstvo, 1, 7–13.
 21. Fesenko, M. A., Fesenko, V. A., Kosjachkov, A. N. (2006). Issledovanie processov vnutriformennoj obrabotki chuguna metodami fizicheskogo modelirovanija. Vestnik DGMA, 3, 7–14.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Результати комп'ютерного моделювання процесу формування литого поршню для двигунів внутрішнього згорання/ А. А. Пуляев, А. В. Золотарева, В. І. Чумаченко, В. В. Богдан, М. М. Белик// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.147–151. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Результаты компьютерного моделирования процесса формирования литого поршня для двигателей внутреннего сгорания/ А. А. Пуляев, А. В. Золотарева, В. И. Чумаченко, В. В. Богдан, Н. Н. Белик// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 50(1222). – С.147–151. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

A computer simulation FORMATION OF cast pistons for internal combustion engines/ A. Pulyaev, A. Zolotareva, V. Chumachenko, V. Bohdan, M. Bielik//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 50 (1222).– P. 147–151. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пуляев Антон Анатольевич – аспірант, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Золотарева Анастасія Вадимівна – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Чумаченко Віталій Іванович – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Богдан Вікторія Володимирівна – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Белик Николай Николаевич – магістр, Кафедра литейного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ул. Кирпичева, 2, г. Харків, Україна, 61002.

Пуляев Антон Анатолійович – аспірант, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

Золотарева Анастасія Вадимівна – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

Чумаченко Віталій Іванович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

Богдан Вікторія Володимирівна – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

Белик Микола Миколайович – магістр, Кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

Pulyaev Anton – graduate student, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Zolotareva Anastasiia – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Chumachenko Vitalii – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Bohdan Viktoriia – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

Bielik Mykola – master, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; Курпухова str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

ЗМІСТ

Миронюк О. В., Дудко В. А., Баклан Д. В., Смольниченко К. О. Дослідження взаємозв'язку між енергією поверхні волокнистих наповнювачів та міцністю полімерних композицій на їх основі.....	3
Лутчин М. М. Математичні моделі гістерезису	8
Барвицкий П. П., Прихна Т. А., Свердун В. Б., Моциль В. Е., Дуб С. Н., Карпец М. В., Муратов В. Б., Васильев А. А. Синтез, спекание, структура и свойства материалов на основе $AlB_{12}C_2$	14
Прокопович І. В., Духаніна М. О., Становська І. І., Валід Шер Х., Добровольська В. В., Торopenко О. В. Метрологічне забезпечення контролю щільності гетерогенних матеріалів.....	22
Василюк С. В., Мягченко Ю. А. Вивчення контрольованого електронного переносу крізь одиночну органічну молекулу	29
Задорожний П. С. Моделювання проходження світла через напівпрозорі середовища.....	36
Ходаковський О. В., Амелін М. Ю., Сметанкін С. О., Акімов, О. В. Яцюк В. М. Дослідження впливу парааміноазобензолу на адгезійні властивості епоксидної матриці для захисних покриттів засобів транспорту.....	42
Леонтьева В. В., Кондратьева Н. А. Исследование чувствительности в некотором классе сложных динамических систем	47
Бакулевський В. Л. Тестування програмного забезпечення розрахунку технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередач напругою 6-35 кВ.....	55
Сачанюк-Кавецька Н. В. Підвищення ефективності обробки інформації для ідентифікації суб'єктів в системах контролю доступу за допомогою перетворення Фур'є.....	63
Єрьоміна Н. С., Сотніков О. М., Таршин В. А. Формування вирішальної функції кореляційно-екстремальних систем навігації за критерієм максимуму узагальненого коефіцієнта взаємної кореляції.....	68
Адоньєв Є. О., Верещага В. М., Лисенко К. Ю. Розробка узагальненої техніки алгебраїчного формування Б-функцій для трьох точок.....	74
Білошицька О. К. Нелінійна динаміка як інструмент прогнозування патологічних змін на електроенцефалограмі.....	79
Тітомир, Л. А. Данилова О. І. Досвід впровадження соціальних інновацій в готелях Одеси і області.....	84
Маркін М. О., Маркіна О. М., Кушовий С. М., Бутенко К. О. Контроль геометричних розмірів зондів для атомно-силової мікроскопії інформаційно-виміральною системою	90
Москалец Н. В. Анализ влияния ограниченной при реализации методов пространственно-временного доступа	95
Лларіонов О. Є., Лларіонова Н. М., Сорока П. М. Застосування теорії свідчень у адаптивних курсах корпоративних систем дистанційного навчання.....	100
Сорока П. М., Лларіонов О. Є. Вирішення проблем прийняття рішень в умовах невизначеності за допомогою дерева рішень.....	106
Оксіюк О. Г., Шестак Я. В., Огбу Д. О. Побудова безпечної інформаційної інфраструктури як необхідність виживання	112
Орендарчук Ю. В., Красноухова А. А., Ачкасов І. О., Барсук А. С., Головка В. І. Оптимізація складу формувальних сумішей для автоматизованого виробництва литих деталей двигунів внутрішнього згорання.....	117
Некрасов А. В., Чорна В. О., Кас'янов Є. М. Контроль температурних режимів та охолодження тягових двигунів електротехнічних комплексів в процесі експлуатації.....	122
Школьна О. В., Кишенько В. Д., Ладанюк А. П. Прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки	127
Мельничук О. В. Розробка математичної моделі оцінки зон критичних внутрішніх напружень в формотворчих деталях стигнального штампа.....	133
Безрук З. Д., Радов Д. Г., Маслов В. П., Дорожинський Г. В., Дорожинська Г. В., Конченко А. В. Дослідження закономірностей очищення водопровідної води методом виморожування.....	137
Колесник В. Є., Павличенко А. В. Оцінка ефективності реалізації природоохоронних заходів на вугільних шахтах.....	142
Пуляев А. А., Золотарева А. В., Чумаченко В. І., Богдан В. В., Белик М. М. Результати комп'ютерного моделювання процесу формування литого поршню для двигунів внутрішнього згорання.....	147

CONTENTS

Myronyuk O., Dudko V., Baklan D., Smolnychenko K. Investigation of the relationship between the surface energy of fibrous fillers and the strength of polymer compositions based on them.....	3
Lutchyn M. Mathematical models histeresys.....	8
Barvitskiy P., Prikhna T., Sverdun V., Moshchil V., Dub S., Karpets M., Muratov V., Vasiliev O. Structure and properties of AlB ₁₂ C ₂ -based materials.....	14
Prokopovich I., Duhanina M., Stanovska I., Walid Sher H., Dobrovolska V., Toropenko O. Metrological assurance of control density heterogeneous materials.....	22
Vasylyuk S., Myahchenko Y. Controlled study of electron transport through single organic molecule.....	29
Zadorozhnyi P. Modeling the passage of light through semitransparent media.....	36
Khodakovskiy A., Amelin M., Smetankin S., Akimov A., Yatsyuk V. Investigation of the effect of paraaminoazobenzene on the adhesion properties of epoxy matrix for protective coatings of vehicles.....	42
Leontieva V., Kondratieva N. Research the Sensitivity of Certain Class of Complex Dynamical Systems.....	47
Bakulevskiy V. Software testing calculation of technical losses in electricity overhead lines with voltage 6-35 kV.....	55
Sachaniuk-Kavets'ka N. Improving the efficiency of information processing for the identification of subjects in access control systems with the help of Fourier transform.....	63
Eremina N., Sotnikov A., Tarshyn V. Creating a decision function correlation-extreme systems navigation on generalized criterion of maximum cross-correlation coefficient.....	68
Adoniev Y., Vereshchaga V., Lysenko K. Development of a generalized technique for the algebraic formation of B-functions for three points.....	74
Biloshytska O. Nonlinear Dynamics as Instruments for Prediction of Pathological Changes in the Electroencephalogram.....	79
Titomir L., Danylova O. Implementation experience of social innovations in hotels of Odessa and Odessa region.....	84
Markin M., Markina O., Kushchovi S., Butenko K. Control of geometric sizes atomic force microscopy probe for information-measuring system.....	90
Moskalets M. Analysis of influence implementation methods restricted spatial-time access.....	95
Ilarionov O., Ilarionova N., Soroka P. Evidence theory in adaptive corporate e-learning systems.....	100
Soroka P., Ilarionov O. The solving of problems of decision making under uncertainty using decision tree.....	106
Oksiuk A., Shestak Y., Ogbu J. Building a secure information infrastructure as a necessity for survival.....	112
Orendarchuk Y., Krasnoukhova A., Achkasov I., Barsuk A., Holovko V. Optimization of molding compounds for computer-cast parts of internal combustion engines.....	117
Nekrasov A., Chorna V., Kasyanov E. Controlling temperature and cooled traction motors electrical systems during operation.....	122
Shkolna O., Kyshenko V., Ladanyuk A. Predicting of secondary steam consumption dynamics at the evaporator state.....	127
Melnychuk O. Development of mathematical model evaluation of critical areas internal stresses in the molding details bending dies.....	133
Bezruk Z., Radov D., Maslov V., Dorozinsky G., Dorozinska G., Konchenko A. Investigation of water treatment by freezing method.....	137
Kolesnyk V., Pavlychenko A. Efficiency Assessment for Nature Protection Measures Implementation on Coal Mines.....	142
Pulyaev A., Zolotareva A., Chumachenk V. o, Bohdan V., Bielik M. A computer simulation formation of cast pistons for internal combustion engines.....	147

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія:

Механіко-технологічні системи та комплекси

№ 50(1222) 2016

Наукові редактори: д-р техн. наук, проф. Д. О. Дьомін
д-р техн. наук, проф. О. В. Акімов
Технічний редактор П. С. Пензев

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра ливарного виробництва.
Тел. (057) 707-68-54; e-mail: c7508990@gmail.com

Обл.-вид. №16-16

Підп. до друку 14.12.2016р. Формат 60x84/16. Надруковано на різнографі
Gestetner 6123CP. Ум.-друк. арк. 8. Облік.вид.арк. 8,75.
Наклад 100 прим. Зам. № 32-16. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК №3657 від 24.12.2009
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня "Технологічний Центр"
Свідоцтво про державну реєстрацію №1 480 120 0000 021055 від 02.04.2002
Адреса: 61145, м. Харків, вул. Шатилова дача,4, тел. (057)750-89-90