

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Серія : Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

3/2016

Головний редактор д.т.н., професор Лега Ю. Г.

Редакційна колегія:

Заболотній С. В., д.т.н., доц.
(заступник головного редактора)
Астрелін І. М., д.т.н., проф.
Ващенко В. А., д.т.н., проф.
Волошин М. Д., д.т.н., проф.
Дідковський Р. М., д.т.н., проф.
Кажіс Р., д.т.н., проф. (Литва)
Канашевич Г. В., д.т.н., проф.
Котов В. М., д.т.н., проф. (Білорусь)
Кулик А. Я., д.т.н., проф.
Лужецький В. А., д.т.н., проф.
Лукашенко В. М., д.т.н., проф.
Мальований М. С., д.т.н., проф.
Мінаєв Б. П., д.х.н., проф.
Мусієнко М. П., д.т.н., проф.
Осипенко В. І., д.т.н., проф.
Палагін В. В., д.т.н., проф.
Паламарчук І. П., д.т.н., проф.
Первунінський С. М., д.т.н., проф.
Петрищев О. М., д.т.н., проф.
Положаєнко С. А., д.т.н., проф.
Рибін О. І., д.т.н., проф.
Рудницький В. М., д.т.н., проф.
Сетлак Г., д.ф.н. (Польща)
Слатінеану Л., д.т.н., проф. (Румунія)
Снитюк В. Є., д.т.н., проф.
Столяренко Г. С., д.т.н., проф.
Тесля Ю. М., д.т.н., проф.
Тимченко А. А., д.т.н., проф.
Хоменко О. М., к.х.н., доц.
Мельник І. В. (відповідальний секретар редакції)

☐ КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ
І КОМПОНЕНТИ,
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

☐ МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ
ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ

☐ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА
І АВТОМАТИКА

☐ МАШИНОБУДУВАННЯ

☐ ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
І ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Електронна версія: vtn.chdtu.edu.ua
<https://chdtu.edu.ua>

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:
ЧДТУ, II корпус, к. 246,
бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 73-02-29
chstu@chstu.cherkassy.ua

ЗАСНОВНИК –
Черкаський державний
технологічний університет

3 • 2016

ВІСНИК
Черкаського державного
технологічного університету

СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ

Свідоцтво про державну
реєстрацію друкованого засобу
масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002 р.

Друкується за рішенням
Вченої ради Черкаського
державного технологічного
університету, протокол № 6
від 15.12.2016 р.

Затверджено наказом
Міністерства освіти і науки України
№ 1328 від 21.12.2015
як фахове видання з технічних наук

Точка зору редколегії не завжди
збігається з позицією авторів.

При повному або частковому
передрукуванні матеріалів
посилання на “Вісник ЧДТУ”
є обов’язковим.

ЗМІСТ

Лукашенко В. М., Уткіна Т. Ю., Лукашенко А. Г., Міценко С. А., Дубіцький К. О. Оптимізація процедури вибору датчиків для лазерного технологічного обладнання	5
Карапетян А. Р. Аналіз методів оптимізації маршрутизації потоків даних	11
Лисенко О. М. Особливості розробки інтегрованих систем менеджменту на основі міжнародних стандартів в Україні	17
Петрищев О. Н., Базило К. В. Определение электрического импеданса пьезокерамического диска и его расчет в области низких частот.....	24
Петрищев О.Н., Базило К.В. Определение электрического импеданса пьезокерамического диска и его расчет в области средних и высоких частот	36
Медушевський С. В., Єфіменко Н. А. Аналіз фаз життєвого циклу автоматизованої інформаційної системи в рамках виконання валідаційних робіт	50
Бас Д. В. Арт-проекти, їх особливості та визначення	57
Найдьонов І. М. Проблема голосової взаємодії в задачах управління дистрибуцією	63
Манько В. М., Зотов В. М. Побудова та дослідження фізичної моделі ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів	72
Прокопенко Т. О., Крезуб В. І. Математична модель оцінювання ефективності підприємств хімічної промисловості.....	78
Битько Н. М., Кузнецова О. В., Бойко В. В. Напряженно-деформированное состояние бетонов при кратковременном центральном сжатии, исходя из его идеализированных структурных схем.....	84
Коцюба І. Г. Аналіз забруднення ґрунтів навколо міського сміттєзвалища міста Житомира	90
Яценко І. В., Гордієнко В. І., Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Визначення термоударних зовнішніх дій на ІЧ-прилади при їх експлуатації	95
До 20-річчя заснування «Вісника ЧІТІ – ЧДТУ»	
Пам'яті професора В. М. Шарапова (<i>зі спогадів колег</i>)	103

CONTENTS

Lukashenko V. M., Utkina. T. Yu., Lukashenko A. G., Mitsenko S. A. , Dubitskiy K. O. Optimization of the procedure for selecting sensors in laser technological equipment	5
Karapetyan A. R. The analysis of methods of optmization of data flows routing	11
Lysenko O. M. Peculiarities of integrated management systems development based on international standards in Ukraine.....	17
Petrishchev O. N., Bazilo C. V. Determination of electrical impedance of piezoceramic disk and its calculation in low-frequency region	24
Petrishchev O. N., Bazilo C. V. Determination of electrical impedance of piezoceramic disk and its calculation in medium and high frequency regions	36
Medushevskiy S. V., Efimenko N. A. Phase analysis of the life cycle of automated information system within the framework of validation works	50
Bas D. V. Art projects, their features and definitions.....	57
Naydonov I. M. The problem of voice interaction in distribution management tasks	63
Manko V. M., Zotov V. M. Construction and study of physical model of stator winding insulation in electrical machines of printing complexes	72
Prokopenko T. O., Krezub V. I. Mathematical model of evaluating the effectiveness of chemical industry enterprises	78
Bitko N. M., Kuznetsova O. V., Boiko V. V. Experimental and theoretical studies of stress- strain state of concrete at short-term axial compression based on its idealized structural schemes	84
Kotsiuba I. G. The analysis of soil pollution around a city landfill of Zhytomyr	90
Yatsenko I. V., Gordienko V. I., Kirichenko O. V., Vaschenko V. A., Tsybulin V. V. Determination of thermal shock external influences on IR-devices at their operation	95
TO THE 20TH ANNIVERSARY OF «VISNYK CHITI – CHDTU» FOUNDATION	
Two sides of one person (<i>commemorating the professor Valeriy Mihailovich Sharapov</i>)	103

УДК 681.325

В. М. Лукашенко¹, д.т.н., професор,

e-mail: kafedra_ckc@ukr.net

Т. Ю. Уткіна¹, к.т.н., доцент,

e-mail: utia_chdtu@yahoo.com

А. Г. Лукашенко², к.т.н.,**С. А. Міценко¹**, аспірант,**К. О. Дубіцький¹**, магістрант¹ Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна² Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
вул. Боженка, 11, м. Київ-150, 03680, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ВИБОРУ ДАТЧИКІВ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В роботі проведено аналіз сучасних моделей інтегральних акселерометрів сучасних фірм-виробників MEMS для лазерного технологічного обладнання. Необхідною ланкою для будь-якого контуру управління, що дозволяє забезпечити сигналом зворотного зв'язку електроніку, яка керує виконавчим пристроєм, є датчики фізичної величини. Акселерометри реагують на прискорення або силу, що діє на сенсорний елемент датчика. Створено узагальнену математичну модель за основними технічними параметрами акселерометрів. На базі властивостей теорії розмірностей, безрозмірних степеневих комплексів та евристичного методу розроблено багатопараметричні критерії якості та визначено їх фізичне тлумачення. Запропоновано процедуру оптимізації вибору датчиків з множини існуючих за рахунок розробки критеріїв якості та візуалізації запропонованої знакової моделі залежностей багатопараметричних критеріїв якості множини сучасних акселерометрів у чотирьох квадрантах. В результаті функціонального аналізу знакової моделі з множини сучасних акселерометрів визначено найпридатнішу модель за багатьма параметрами одночасно.

Ключові слова: акселерометр, знакова модель, критерії якості, теорія розмірностей.

Постановка проблеми. Область застосування інтегральних датчиків є надзвичайно широкою: від аерокосмічної техніки до автомобільної та робототехніки.

Одним із поширених типів датчиків є інтегральні акселерометри, що виготовляються за технологією MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Для ринку промисловості MEMS-акселерометрів, за даними французької консалтингової організації Yole Développement, характерне домінування 30 найбільших компаній-виробників, а саме: Bosch, STMicroelectronics, Texas Instruments, Avago Technologies Inven Sense, Qorvo, Knowles Electronics та ін. [1–2].

Дійсно, сьогодні технології MEMS сягнули такого рівня, який допускає не тільки виробництво недорогих компонентів у масових обсягах, а й масоване розширення кола їх застосувань, у тому числі й у лазерному технологічному обладнанні [1–12]. Тому на при-

кладі цих інтегральних акселерометрів проводяться наступні дослідження.

Аналіз останніх досліджень. Питанням побудови, управління й застосування акселерометрів присвячено ряд робіт А. Юдіна, О. Коленченко, С. Сисоевої, Ю. Петропавловського, Д. Ларіонова, О. Казакевича, А. Лебедева, І. Петрова, О. Тузова, В. Scannell, V. Lara, Ch. J. Fisher та ін. Однак у цих роботах недостатньо відображено, як з безлічі сучасних моделей акселерометрів швидко визначити таку, яка найбільш задовольнить замовника за відповідними параметрами.

Дослідження сучасних моделей акселерометрів за багатьма параметрами при відсутності математичного опису взаємозв'язків між ними не дозволяє оптимізувати процедуру з використанням ПК і займає багато часу. Тому задача швидкого визначення моделі акселерометра з множини існуючих за багатьма параметрами є актуальною.

Метою роботи є оптимізація процедури вибору моделі акселерометра з множини існуючих за рахунок моделювання та розробки багатопараметричних критеріїв якості.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- скласти перелік фізичних моделей інтегральних акселерометрів сучасних фірм-виробників MEMS за основними технічними параметрами;

- створити узагальнену математичну модель за основними технічними параметрами акселерометрів;

- визначити вид моделювання;

- розробити багатопараметричні критерії якості й визначити їх фізичне тлумачення;

- візуалізувати процес вибору датчиків із множини сучасних моделей акселерометрів за визначеними основними технічними параметрами;

- визначити найпридатнішу модель датчика на підставі функціонального аналізу їх множини.

Виклад основного матеріалу. Аналіз сучасних моделей акселерометрів різних фірм-виробників MEMS показав, що основними їх технічними параметрами, які впливають на експлуатаційні властивості, є: діапазон робочих температур, кількість діапазонів вимірюваних прискорень, максимальна частота передачі даних на вихід, час затримки, максимальне і мінімальне значення допустимого струму живлення.

Перелік сучасних моделей акселерометрів різних компаній-виробників та їх основні технічні параметри наведено в табл. 1.

Узагальнена математична модель за основними технічними параметрами акселерометрів, що подані в табл. 1, має такий вигляд:

$$F(Q_{\max}, Q_{\min}; f, t; K_G; I_{\max}, I_{\min}) = 0, \quad (1)$$

де $Q_{\max}, Q_{\min}$ – максимальні та мінімальні значення робочої температури;

f – максимальна частота передачі даних на вихід;

t – час затримки;

K_G – кількість діапазонів вимірюваних прискорень акселерометра;

$I_{\max}, I_{\min}$ – максимальні та мінімальні значення допустимого струму живлення.

Аналіз узагальненої математичної моделі (1) підтверджує відсутність аналітичного зв'язку між наведеними параметрами. Тому визначається умовне моделювання і розробляються умовні критерії якості. Для цього на базі даних табл. 1, властивостей теорії розмірностей, безрозмірних степеневих комплексів та евристичного методу створюються багатопараметричні критерії якості і визначається їх фізичне тлумачення [9–12].

Розроблено багатопараметричні критерії якості та їх фізичне тлумачення, які мають вигляд:

$$K_Q = \left(\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max}} \right) - \text{безрозмірна величина, що характеризує робочий температурний діапазон акселерометра, найкраща при } K_Q \rightarrow 1;$$

K_Q – безрозмірна величина, яка характеризує швидкодію акселерометра. Враховуючи, що $f = \text{const}$ і швидкість залежить від часу затримки t , найкращою величиною є мінімальне значення;

$K_F = (f \cdot t)$ – безрозмірна величина, яка характеризує швидкодію акселерометра. Враховуючи, що $f = \text{const}$ і швидкість залежить від часу затримки t , найкращою величиною є мінімальне значення;

K_G – величина, яка характеризує кількість діапазонів вимірюваних прискорень акселерометра, найкращою є максимальна;

$$K_I = \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \right) - \text{безрозмірна величина, яка характеризує робочий діапазон струму живлення, найкраща при } K_I \rightarrow 1.$$

Результати розрахунку критеріїв якості наведені в табл. 1.

Відомо, що візуалізація прискорює процес вибору датчиків із множини сучасних моделей акселерометрів. Тому на підставі розроблених критеріїв якості критеріальне рівняння набирає такого вигляду:

$$\psi = (K_Q; K_F; K_G; K_I) = 0. \quad (2)$$

На базі критеріального рівняння (2), властивостей π -теорема та багатопараметричних критеріїв якості (табл. 1) будується знакова модель залежностей критеріїв якості за основними технічними параметрами в чотирьох квадрантах, яка зображена на рис. 1.

Таблиця 1

Перелік сучасних моделей акселерометрів з основними технічними параметрами та критеріїв якості

№	Модель	Q_{max} , К	Q_{min} , К	Діапазони вимірюваних прискорень	f , кГц	t , мс	I_{max} , мА	I_{min} , мА	Критерії якості			
									K_Q	K_F	K_G	K_I
Analog Devices												
1	ADXL313	233	378	$\pm 0,5/\pm 1/\pm 2/\pm 4$	2	1,4	0,3	0,1	0,38	4,48	4	0,67
2	ADXL345	243	358	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$	2	2	0,14	0,03	0,32	6,4	3	0,79
Bosch Sensortec												
3	BMA280	233	358	$\pm 2/\pm 4/\pm 8$	2	3	0,13	0,066	0,35	6	3	0,49
4	BMA250E	243	348	$\pm 2/\pm 4$	2	4	0,13	0,066	0,30	8	2	0,49
Murata												
5	SCA830-D06	243	398	$\pm 1/\pm 2$	2	100	6,3	5	0,39	200	2	0,21
6	SCA3100-D07	243	393	$\pm 5/\pm 6$	2	110	5	3	0,38	220	2	0,4
STMicroelectronics												
7	AIS326DQ	243	378	$\pm 2/\pm 6$	2	1,95	0,8	0,67	0,36	3,9	2	0,16
8	LIS2DS12	243	358	$\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$	2	1,2	0,15	0,013	0,32	4,8	4	0,92

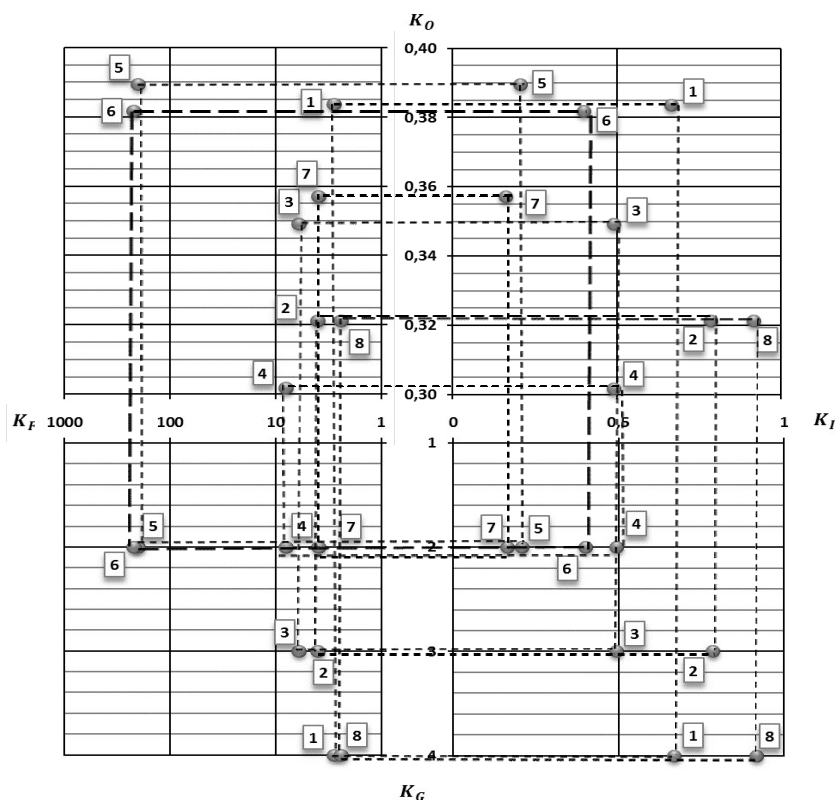


Рис. 1. Знакова модель оптимізації вибору датчиків з множини моделей акселерометрів у безрозмірних координатах

Примітка: цифри 1, 2, ..., 8 відповідають цифрам у табл. 1.

З рис. 1 видно, що найкращою моделлю акселерометра є № 6 SCA3100-D07 фірми Murata.

Отже, візуалізація знакової моделі в чотирьох квадрантах прискорює вибір та визначення найкращих моделей датчиків з множини існуючих завдяки одночасному аналізу за багатьма параметрами.

Висновки. Шляхом аналізу об'єкта дослідження встановлено, що побудова його з визначеними найпридатнішими моделями компонентів підвищує якість самого об'єкта.

1. Визначено умовне моделювання, що дозволило провести дослідження за багатьма параметрами при відсутності аналітичного виразу взаємозв'язків між ними.

2. Розроблено безрозмірні критерії якості за сімома основними технічними параметрами, на основі яких побудована знакова модель у чотирьох квадрантах.

Отже, за результатом візуалізації знакової моделі та функціонального аналізу одночасно за сімома параметрами визначено, що найпридатнішою моделлю є акселерометр Murata SCA3100-D07.

Перспективою подальших досліджень є розробка узагальненого показника якості сучасних моделей акселерометрів для лазерного технологічного обладнання.

Список літератури

1. The MEMS industry: desperately seeking a second wind, available at: <http://www.i-micronews.com/mems-sensors/7185-the-mems-industry-desperately-seeking-a-second-wind.html>
2. 2015: A year of contrasts for MEMS companies, available at: <http://www.i-micronews.com/mems-sensors/7174-2015-a-year-of-contrasts-for-mems-companies.html>
3. Петропавловский Ю. Современные МЭМС-продукты компании Analog Devices. Часть 1 / Ю. Петропавловский // Элементы и компоненты. – 2015. – № 6. – С. 40–45.
4. Петропавловский Ю. Современные МЭМС-продукты компании Analog Devices. Часть 2 / Ю. Петропавловский // Элементы и компоненты. – 2015. – № 7. – С. 24–29.
5. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Инерциальные системы – от low-end до high-end сегментов

/ С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С. 22–30.

6. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов. Акселерометры / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3. – С. 20–26.
7. Юдин А. Новые акселерометры компании STMicroelectronics / А. Юдин // Компоненты и технологии. – 2009. – № 2. – С. 28–31.
8. Лебедев А. Цифровые МЭМС-акселерометры в automotive исполнении / А. Лебедев // Современная электроника. – 2008. – № 5. – С. 12–15.
9. Рудаков К. С. Двоквадрантная образно-знаковая модель визначення ефективного маршрутизатора / К. С. Рудаков, В. М. Лукашенко, Т. Ю. Уткіна // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2015. – № 2. – С. 150–156.
10. Лукашенко В. М. Метод розширення функціональних можливостей сучасних мікроконтролерів / В. М. Лукашенко, М. В. Чичужко, Д. А. Лукашенко // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2013. – № 6. – С. 186–189.
11. Determination method of efficiency units for conditional similarity criterion / V. M. Lukashenko, M. V. Chichuzhko, D. A. Lukashenko, V. A. Lukashenko // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2013. – № 2. – С. 44–47.
12. Методика функціонального аналізу множини моделей акселерометрів / В. М. Лукашенко, Т. Ю. Уткіна, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, К. О. Дубіцький // Prospects of World Science – 2016: materials of the XII International scient. and pract. conf. (July 30 – August 7, 2016). – Sheffield: Science and education ltd, 2016. – Vol. 17. – С. 103–108.

References

1. The MEMS industry: desperately seeking a second wind, available at: <http://www.i-micronews.com/mems-sensors/7185-the-mems-industry-desperately-seeking-a-second-wind.html>
2. 2015: A year of contrasts for MEMS companies, available at: <http://www.i-micronews.com/mems-sensors/7174-2015-a-year-of-contrasts-for-mems-companies.html>
3. Petropavlovskiy, Yu. (2015) Modern MEMS products of Analog Devices company. Part 1, *Elements & Components*, No. 6, pp. 40–45 [in Russian].

4. Petropavlovskiy, Yu. (2015) Modern MEMS products of Analog Devices company. Part 2, *Elements & Components*, No. 7, pp. 24–29 [in Russian].
5. Sysoeva, S. (2010) The key segments of MEMS components market. Inertial systems – from low-end to high-end segments, *Components & Technologies*, No. 5, pp. 22–30 [in Russian].
6. Sysoeva, S. (2010) The key segments of MEMS components market. Accelerometers, *Components & Technologies*, No. 3, pp. 20–26 [in Russian].
7. Yudin, A. (2009) New accelerometers of STMicroelectronics company, *Components & Technologies*, No. 2, pp. 28–31 [in Russian].
8. Lebedev, A. (2008) Digital MEMS accelerometers in automotive performance, *Modern Electronics*, No. 5, pp. 12–15 [in Russian].
9. Rudakov, K. S., Lukashenko, V. M. and Utkina, T. Yu. (2015) A two-quadrant shape-sign model of effective router determination, *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universyte-tu, Tehnichni nauky*, No. 2, pp. 150–156 [in Ukrainian].
10. Lukashenko, V. M., Chichuzhko, M. V. and Lukashenko, D. A. (2013) The method of expansion of functional possibilities of modern microcontrollers, *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Tehnichni nauky*, No. 6, pp. 186–189 [in Ukrainian].
11. Lukashenko, V. M., Chichuzhko, M. V., Lukashenko, D. A. and Lukashenko V. A. (2013) Determination method of efficiency units for conditional similarity criterion, *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 2, pp. 44–47.
12. Lukashenko, V. M., Utkina, T. Yu., Lukashenko, A. G., Lukashenko, D. A. and Dubitskiy, K. O. (2016) Procedure of functional analysis of the set of accelerometers models. In: *Prospects of World Science – 2016: materials of the XII International scient. and pract. conf.* (July 30 – August 7), Sheffield, vol. 17, pp. 103–108 [in Ukrainian].

V. M. Lukashenko¹, Dr.Tech.Sc., professor,

e-mail: kafedra_ckc@ukr.net

T. Yu. Utkina¹, Ph.D., associate professor,

e-mail: utia_chdtu@yahoo.com

A. G. Lukashenko², Ph.D.,

S. A. Mitsenko¹, postgraduate student,

K. O. Dubitskiy¹, undergraduate

¹Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²Institute of Electric Welding named after E. O. Paton

Bozhenko str., 11, Kyiv-150, 03680, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE PROCEDURE FOR SELECTING SENSORS IN LASER TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Introduction. Automated and automatic control systems are an integral part of modern high-tech production. Physical quantity sensors are an essential element for every control loop, which allows providing the feedback signal of electronics by control on actuator device. Accelerometers are responsive to acceleration or force acting on the sensor element.

The purpose of scientific work. The objective of this research is to optimize the procedure for determining the most suitable accelerometer model from a variety of existing ones through the design and development of multiparameter quality criteria.

Formulation of the problem. Most of integrated accelerometers, manufactured by MEMS technology, combine the functions of forward and reverse electromechanical conversion with built-in intelligence. The area of integrated accelerometers application is very wide: from aerospace equipment to automotive one and robotics, which makes a wide range of requirements put forward to them.

Today MEMS technologies have reached a level that allows not only the production of inexpensive components in mass quantities, but also the massive expansion of their applications, including in laser technological equipment.

The investigation of current accelerometers models on many parameters without mathematical description of relationships between them doesn't allow to optimize the procedure using a PC and takes time. Therefore, the task of rapid determination of accelerometer model from a variety of existing ones on many parameters is important.

The main material. *The authors have conducted the analysis of modern accelerometers models of different MEMS manufacturing companies. As a result, the main technical parameters that affect the performance properties of accelerometers are determined. In this paper the quality criteria for key indicators are calculated. A generalized mathematical model is created. Based on the properties of dimensions theory, dimensionless power complexes and heuristic method, multiparameter quality criteria are developed and their physical interpretation is determined.*

Conclusions. *The procedure for optimization of selecting sensors in laser technological equipment from a variety of existing ones due to the development of quality criteria and the visualization of the proposed sign model of the dependencies of multiparameter quality criteria of many modern accelerometers is offered. As the result of functional analysis of sign model the most suitable model from many modern accelerometers by many parameters at the same time is determined.*

Keywords: *accelerometer, sign model, quality criteria, dimensions theory.*

Статтю представляє д.т.н., професор В. М. Лукашенко, Черкаський державний технологічний університет.

А. Р. Карапетян, старший викладач

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка 460, к. 603, м. Черкаси, 18006, Україна
e-mail: anait.r.karapetyan@gmail.com

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ПОТОКІВ ДАНИХ

Розвиток мереж передачі даних і проблеми керування потоками в них вимагають нових методів оптимізації процесів маршрутизації потоків даних. Для розв'язання цієї проблеми, в рамках розвитку сучасної науки, можна використовувати моделі і методи адаптивної і нейромережової маршрутизації. У статті розглянуто методи оптимізації адаптивної маршрутизації інформаційних потоків. Представлено моделі адаптивної маршрутизації та існуючі підходи і методи обробки інформації. Проаналізовано основні особливості та задачі маршрутизації потоків даних зі змінною динамікою. Розглянуто можливість формалізації задачі пошуку оптимального шляху. Обґрунтовано необхідність розробки нових методів адаптивної маршрутизації. Розглянуто можливість використання еволюційних методів для визначення оптимального маршруту в мережах з адаптивною маршрутизацією. Головною проблемою у використанні цих методів є великий обсяг обчислень.

Ключові слова: маршрутизація, адаптивна маршрутизація, багатокритеріальна оптимізація, нейронні мережі, мережа Хопфілда, генетичний алгоритм.

Постановка проблеми. У зв'язку зі зростанням вимог до швидкості передачі даних і до якості сигналу завдання підвищення ефективності використання мережевих ресурсів стає все більш актуальним. Одне з ключових завдань на сьогоднішній день – маршрутизація даних. Завдання вибору маршруту, а також планування роботи мережевих пристроїв відносять до класу комбінаторно-оптимізаційних задач, для яких не можна знайти прості аналітичні розв'язки. Досягти рівня адекватності математичного опису мережі можливо лише в рамках моделей, що враховують особливості динамічного функціонування системи.

Через складність структур сучасних комп'ютерних мереж задача маршрутизації не вирішується повною мірою. У більшості випадків це пов'язано з маршрутизаторами, які не справляються з підтриманням таблиць маршрутизації і вибором оптимальних маршрутів для даного класу трафіку. Тому виникає завдання дослідження існуючих алгоритмів маршрутизації з метою поліпшення їх характеристик або створення нових алгоритмів маршрутизації.

Аналіз останніх досліджень. До недавнього часу теоретичну базу для проектування і моделювання систем розподілу інформаційних потоків забезпечувала теорія телетрафіку, що набула свого розвитку в роботах ряду

авторів: Л. Клейнрока, Г. П. Башарина та ін. [1]. Найбільш поширеною моделлю потоку викликів у теорії телетрафіку є стаціонарний пуассонівський потік, відповідний для мереж з комутацією каналів. У роботах зарубіжних дослідників (W. Leland, D. Wilson, I. Noros) стверджується, що трафік у мережах з комутацією пакетів має так звану властивість «самоподібності» [2]. У результаті теоретичні розрахунки характеристик сучасних систем розподілу інформації за класичними формулами дають некоректні результати щодо довжин черг і часу затримок пакетів [3].

Таким чином, розробка моделей і алгоритмів маршрутизації, що враховують завантаженість ліній і «самоподібність» трафіку, є актуальною.

Метою роботи є аналіз існуючих методів маршрутизації та дослідження ефективності використання мережних ресурсів у розподілених мережах за допомогою еволюційних алгоритмів.

Виклад основного матеріалу. Задача управління трафіком розпадається на дві взаємопов'язані задачі:

- планування, оптимізація та адаптація маршрутів передачі потоків даних між вузлами мережі;
- керування передачею потоків даних по заданому маршруту з адаптацією до трафіку,

що змінюється, можливим перевантаженням або зміною топології чи параметрів мережі.

Статична постановка задачі планування й оптимізації маршрутів передачі даних ґрунтується на припущенні, що структура мережі є відомою і незмінною, а в ролі зовнішнього агента-користувача виступає один клієнт, який формує запит до одного з вузлових комп'ютерів мережі. Динамічна постановка задачі виходить з того, що структура мережі може змінюватися з часом, але залишається відомою. При цьому мережева інформація автоматично оновлюється, що приводить до зміни оптимальних маршрутів.

При адаптивній постановці задачі маршрутизація здійснюється в умовах невизначеності, коли топологія і параметри каналів зв'язку, а також трафік можуть непередбачувано змінюватися. При цьому доступна інформація має локальний характер. Моніторинг та оновлення мережевої інформації дозволяють адаптивно скорегувати маршрути.

Динамічна модель мережі зі змінною структурою та змінними параметрами описується графом

$$G(t) = G(A(t), R(t), W(t)), t \in [t_0, t_n],$$

де A – вузли, R – канали зв'язку, W – ваги каналів зв'язку, які можуть змінюватися з плином часу на заданому інтервалі $[t_0, t_n]$.

Необхідність у динамічній та адаптивній маршрутизації потоків даних виникає в таких випадках:

- зміна вартості каналів зв'язку;
- відмова одного чи декількох каналів або вузлів зв'язку;
- додавання каналів або вузлів зв'язку;
- перевантаження каналів або вузлів зв'язку.

Обробка інформаційних потоків вимагає розробки методів динамічної й адаптивної маршрутизації в умовах багатоадресної передачі і колективного використання мережі. Кількість запитів може непередбачувано змінюватися з плином часу.

Моделі адаптивної маршрутизації і методи обробки інформації. Переваги адаптивної маршрутизації потоків даних:

- забезпечення працездатності та надійності при непередбачуваних змінах структури або параметрів мережі;
- більш рівномірне завантаження вузлів і каналів зв'язку за рахунок «вирівнювання» навантаження;

- спрощення керування при мережевих перевантаженнях;
- збільшення часу безвідмовної роботи при непередбачуваних змінах параметрів і структури мережі.

Принцип адаптивної маршрутизації ґрунтується на передачі локальної інформації від сусідніх вузлів або глобальної інформації від усіх вузлів мережі.

Моделі і принципи адаптивної маршрутизації потоків даних у глобальних мережах можна розбити на три класи:

- ієрархічна маршрутизація;
- розподілена маршрутизація;
- мультиагентна маршрутизація.

Принцип ієрархічної маршрутизації полягає в тому, що кожний вузол мережі передає інформацію про свій стан центральному вузлу-маршрутизатору, який обчислює оптимальний маршрут. Принцип розподіленої маршрутизації ґрунтується на обміні локальною інформацією між вузлами мережі для обчислення локально-оптимального маршруту [4].

Мультиагентна маршрутизація є своєрідним компромісом між ієрархічною і розподіленою маршрутизацією. Вона ґрунтується на багатоадресній або багатопотоковій маршрутизації, адаптації до чинників невизначеності та аналізі можливих мережевих конфліктів з метою їх запобігання або вирішення в процесі керованої передачі пакетів даних за безліччю оптимальних маршрутів.

Основні функції обробки інформації, самоорганізації та управління інформаційними потоками за запитами зовнішніх агентів-користувачів глобальної мережі розподіляються між внутрішніми агентами, роль яких виконують мережеві або нейромережеві агенти. Архітектура цих внутрішніх агентів аналогічна архітектурі мережі.

Розроблено моделі нейромережі для адаптивної маршрутизації. Програмна реалізація та імітаційне моделювання свідчать про їх ефективність і переваги.

Багатопотокова маршрутизація і відмовостійкість у глобальних мережах. Основними недоліками однопотокової маршрутизації в мережах є такі:

- несправність або відмова хоча б одного вузла чи каналу зв'язку, через які проходить оптимальний маршрут передачі пакетів даних, вимагають трудомісткого перерахунку оптимального

маршруту з урахуванням несправних вузлів або каналів зв'язку;

- спланований маршрут між будь-якими заданими вузлами мережі може призвести до мережових перевантажень у той час, коли інші вузли і канали зв'язку можуть бути вільними або недовантаженими.

Для подолання цих труднощів доцільно використовувати багатопотокову маршрутизацію. При цьому одночасно планується не один маршрут передачі пакетів даних. Внаслідок цього збільшується надійність і відмовостійкість глобальної мережі

При ієрархічній багатопотоковій маршрутизації здійснюється планування оптимальних маршрутів за наявною (фіксованою) або оновленою (динамічною) інформацією про стан мережі. При розподіленій маршрутизації в кожному наступному вузлі маршруту, починаючи з вузла-джерела, планується k оптимальних маршрутів передачі пакетів даних до вузла-одержувача. Такий метод планування вимагає спеціального механізму запобігання замкнутим маршрутам.

Головна перевага цього методу маршрутизації полягає в тому, що він забезпечує автоматичний «обхід» вузлів або каналів зв'язку, що відмовили. Це дозволяє швидко оновлювати інформацію про поточний стан мережі і вносити необхідні корективи в таблиці маршрутизації.

Оптимізаційні методи динамічної, адаптивної, нейромережевої та мультиагентної маршрутизації інформаційних потоків для глобальних мереж нового покоління є важливим кроком у напрямку створення теорії адаптивного мультиагентного обслуговування глобальних мереж.

Нейромережева маршрутизація. Нейронні мережі є ефективною обчислювальною моделлю апроксимування функцій будь-якої складності, ґрунтуючись на неповній інформації, розміщеній у навчальній БД. Властивість нейронних мереж одержувати потрібний результат при зашумлених вхідних параметрах вельми корисна при маршрутизації в мережі з топологією і трафіком, що змінюються.

Одним із підходів до розв'язання задачі маршрутизації є використання нейронних мереж [5].

Для розв'язання задачі оптимізації маршрутизації обрано алгоритм нейронної мережі Хопфілда з використанням функції енергії

Ляпунова. Мережі Хопфілда є рекурентними мережами або мережами зі зворотними зв'язками і якнайкраще підходять для пошуку оптимального маршруту [6].

При дослідженні можливостей нейронних мереж для розв'язання задач маршрутизації було показано необхідність використання нейронної мережі Хопфілда [7].

Аналіз робіт, присвячених використанню нейронних мереж при розв'язанні задачі маршрутизації, і близькість отриманих результатів до оптимальних свідчать про працездатність таких моделей.

Метод оптимізації інформаційних потоків генетичними алгоритмами. Генетичні та еволюційні алгоритми ґрунтуються на використанні механізмів природної еволюції. Еволюція, за Дарвіном, здійснюється в результаті взаємодії трьох основних факторів: мінливості, спадковості, природного відбору. Мінливість є основою утворення нових ознак і особливостей в будові і функціях організму. Спадковість закріплює ці ознаки. Природний відбір усуває організми, погано пристосовані до умов існування.

Концепцію побудови генетичних алгоритмів (ГА) схематично можна представити таким чином:

- 1) згенерувати випадковим чином популяцію розміру P ;
- 2) обчислити цільову функцію (фітнес-функцію);
- 3) виконати операцію селекції;
- 4) виконати операцію схрещування;
- 5) виконати операцію мутації;
- 6) якщо критерій зупинки не досягнутий, перейти до кроку 2), інакше завершити роботу.

Для того щоб використовувати ГА для розв'язання певної задачі, необхідно:

- вибрати спосіб кодування розв'язку;
- над отриманим простором рішень визначити операції схрещування і мутації;
- визначити стратегію вибору аргументів для цих операцій на кожному кроці алгоритму;
- визначити фітнес-функцію над розв'язком, що визначає якість і коректність розв'язку;
- визначити стратегію відбору розв'язків у новій популяції на черговому кроці алгоритму (операція селекції) з ураху-

ванням значень фітнес-функції для кожного рішення.

Нині розроблено велику кількість різних варіантів виконання операцій ГА. Операції схрещування і мутації визначають механізм пошуку нових розв'язків. Операція схрещування використовує властивості розв'язків, вже наявних у популяції, у той час як операція мутації дозволяє отримувати розв'язки, які не є композицією розв'язків, наявних у популяції. Основною проблемою ГА є проблема збереження балансу: необхідно домогтися балансу між збільшенням різноманітності популяції і поліпшенням якості рішення.

Ці алгоритми мають такі переваги:

- при правильному налаштуванні параметрів ГА мають високий ступінь адаптації до характеристик функції, що оптимізується;
- ці алгоритми мають високу швидкість збіжності;
- існує можливість налаштування параметрів алгоритму на задачах невеликих розмірностей і перенесення їх у подальшому на завдання більшої розмірності;
- при одному запуску алгоритму можливе одночасне отримання кількох варіантів розв'язків.

ГА алгоритм працює з сукупністю індивідів – популяцією, кожен з яких представляє можливий розв'язок проблеми. В процесі роботи ГА, у рамках виділеного ресурсу, досліджує простір пошуку шляхом інформаційного обміну з зовнішнім середовищем, тобто популяція еволюціонує у відповідному середовищі.

В цілому ж еволюція – це наявність двох головних аспектів: збереження і зміни. Для ефективної реалізації першого аспекту популяція повинна бути стійкою, стабільною, незмінною, тобто інформаційно дистанціюватися від середовища. З другого боку, без тісного інформаційного контакту з середовищем неможливий пошук розв'язку. Популяція має еволюціонувати, бути інформаційно чутливою до зміни середовища. Таким чином, вимоги еволюції, з точки зору інформаційного обміну популяції із середовищем, є суперечливими.

Для реалізації першого аспекту використовується оператор селекції спільно з принципом елітизму, а для другого аспекту застосовуються оператори рекомбінації і мутації.

Вперше ідею використання ГА для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації запропонував у своїх роботах Розенберг [8]. Практичний метод був розроблений пізніше Шаффером [9], який модифікував стандартний ГА однокритеріальної оптимізації.

Незалежно від цих робіт, був розроблений нейронно-еволюційний алгоритм для розв'язання проблеми визначення максимального потоку в зваженому графі. У дослідженнях [10, 11] використовується головна ідея гібридизації генетичних алгоритмів і спільне їх використання як з нейронними мережами, так і з вибраними аналітичними методами оптимізації. Такий гібридний нейронно-генетичний алгоритм представлений в [10]. У ньому для знаходження субоптимальних рішень багатокритеріальної задачі використовується нейронна мережа Хопфілда.

Висновок. На основі виконаного аналізу моделей та оптимізаційних методів зроблено висновок, що еволюційні алгоритми є досить потужним інструментом і можуть з успіхом застосовуватися для розв'язання широкого класу прикладних задач, включаючи ті, які важко або навіть взагалі неможливо вирішити іншими методами. Вони можуть бути корисні для організації адаптивного обслуговування GRID-інфраструктур різного масштабу. Перспективним напрямком є використання генетичних алгоритмів оптимізації для створення сучасних протоколів маршрутизації, які враховують як характеристики мережових з'єднань, так і обладнання. Сформовані підходи дозволяють значно спростити (а для деяких окремих випадків є єдиним варіантом) розв'язання задачі маршрутизації у складних комп'ютерних системах.

Список літератури

1. Клейнрок Л. Коммуникационные сети. Стохастические потоки и задержки сообщений / Л. Клейнрок. – Наука, 1970. – 255 с.
2. Wieselthier J. E. Neural networks approach to routing without interference in multihop networks / J. E. Wieselthier, C. M. Barnhart, A. A. Ephremides // IEEE Transactions on Comm. – 1994. – Vol. 42. – No. 1. – P. 166–177.
3. Hajek B. Scheduling in polynomial time / B. Hajek, G. Sasaki // IEEE Trans. Inform. Theory. – Sept. 1998. – Vol. 34. – P. 910–917.

4. Погорілий С. Д. Генетичний алгоритм розв'язання задачі маршрутизації в мережах / С. Д. Погорілий, Р. В. Білоус // Проблеми програмування. – 2010. – № 2-3. – Спец. вип. – С. 171–178.
5. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссерман. – М.: Мир, 1990.
6. Павленко М. А. Анализ возможностей искусственных нейронных сетей для решения задач однопутевой маршрутизации в ТКС / М. А. Павленко // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 118–127.
7. Комашинский В. И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В. И. Комашинский, Д. А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
8. Rosenberg R. S. Simulation of genetic populations with biochemical properties / R. S. Rosenberg // Mathematical Biosciences. – 1989. – P. 223–257.
9. Schaffer J. D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithm / J. D. Schaffer // Genetic algorithms and their applications: Proc. of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms, J. J. Grefenstete (Ed.), Hillsdale, NJ: L. Erlbaum, 1985. – P. 93–100.
10. Колесніков К. В. Генетичні алгоритми для задач багатокритеріальної оптимізації в мережах адаптивної маршрутизації даних / К. В. Колесніков, А. Р. Карапетян, Т. А. Царенко // Вісник НТУ «ХПІ» (Харків). – 2013. – № 56 (1029). – С. 44–50.
11. Колесніков К. В. Використання нейромережевих моделей для знаходження оптимального шляху в мережах з адаптивною маршрутизацією пакетів даних / К. В. Колесніков, О. Г. Нікулін, А. Р. Карапетян // Вісник. Нові рішення в сучасних технологіях. – № 56. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 50–56.
2. Wieselthier, J. E., Barnhart, C. M. and Ephremides A. A. (1994) Neural networks approach to routing without interference in multihop networks. *IEEE Transactions on Comm.*, 42 (1), pp. 166–177.
3. Hajek, B. and Sasaki, G. (1998) Scheduling in polynomial time. *IEEE Trans. Inform. Theory*, Sept., vol. 34, pp. 910–917.
4. Pohorilyi, S. D. and Bilous, R. V. (2010) Genetic algorithm for the solution of routing task in networks. *Problemy prohramuvannia. Spets. vyp.*, No. 2-3, pp. 171–178 [in Ukrainian].
5. Uosserman, F. (1990) Neurocomputer engineering: Theory and practice. Moscow: Mir [in Russian].
6. Pavlenko, M. A. (2011) The analysis of possibilities of artificial neural networks for the solution of single-lane routing in TCS. *Problemy telekommunikatsiy*, No. 2 (4), pp. 118–127 [in Russian].
7. Komashinskyi, V. I. and Smirnov, D. A. (2003) Neural networks and their use in control and communication systems. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom [in Russian].
8. Rosenberg, R. S. (1989), Simulation of genetic populations with biochemical properties. *Mathematical Biosciences*, pp. 223–257.
9. Schaffer, J. D. (1985) Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithm. *Genetic algorithms and their applications: Proc. of the First Int. Conf. on Genetic Algorithms*, J. J. Grefenstete (Ed.), Hillsdale, NJ: L. Erlbaum, pp. 93–100.
10. Kolesnikov, K. V., Karapetyan, A. R. and Tsarenko, T. A. (2013) Genetic algorithms for multicriterion optimization problems in the networks of data adaptive routing. *Visnyk NTU «KhPI»* (Kharkiv), No. 56 (1029), pp. 44–50 [in Ukrainian].
11. Kolesnikov, K. V., Nikulin, O. H. and Karapetyan, A. R. (2013) The use of neural network models for finding the optimal path in the networks with adaptive routing of data bursts. *Visnyk. Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, No 56, Kharkiv: NTU «KhPI», pp. 50–56 [in Ukrainian].

References

1. Kleinrok, L. (1970) Communicative networks. Stochastic flows and communications. Nauka, 255 p. [in Russian].

A. R. Karapetyan, *senior lecturer*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
e-mail: anait.r.karapetyan@gmail.com

THE ANALYSIS OF METHODS OF OPTMIZATION OF DATA FLOWS ROUTING

The development of the data transformation networks and the problems of directing streams within them demand new methods of optimization of data flows routing processes. To solve this problem in the framework of modern science development it is possible to use models and methods of adaptive and neural network routing. The article studies the methods of optimization of adaptive information flows routing. The methods of adaptive routing of information streams and the existing approaches and methods of data processing are presented. The major specific features and tasks of data flows routing with changeable dynamics are analyzed.

Due to increasing demands to the speed of data transmission and to the signal quality the task of increasing the efficiency of network resources grows more and more topical. Data routing is one of the key tasks up to date.

The object of the study is to analyze the existing routing methods and to research the efficiency of the use of net resources in distributed networks by means of evolutionary algorithms. The use of genetic optimization algorithms for creating modern routing information protocols, which consider both network connections characteristics and equipment, is the promising direction. The established approaches allow to significantly simplify (and are the only variant in some individual cases) the solving of routing task in complex computer systems.

The possibility of formalization of optimization task is studied. The necessity of the development of new adaptive routing methods is grounded. The possibility of the use of evolutionary methods for route optimization in the networks with adaptive routing is studied. The main problem in using these methods consists in big volume of calculations.

Keywords: *routing, adaptive routing, multiobjective optimization, neural networks, Hopfield net, genetic algorithm.*

*Рецензенти: В. М. Рудницький, д.т.н, професор,
В. І. Кудін, д.т.н, професор*

О. М. Лисенко, к.пед.н., доцент

Черкаський національний університет імені Б. Хмельницького,

б-р Шевченка, 81, м. Черкаси, 18000, Україна

e-mail: lysenko-nek@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ІНТЕГРОВАНІХ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТУ НА ОСНОВІ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ В УКРАЇНІ

У статті проаналізовано сутність інтегрованої системи менеджменту, необхідність і доцільність її впровадження. Визначено підходи до її розробки, етапи побудови та методологію впровадження. Розглянуто головні цілі сертифікації систем управління якістю, систем екологічного управління, систем управління гігієною та безпекою праці, систем управління безпечністю харчових продуктів. Досліджено основні переваги та потенційні вигоди від впровадження інтегрованих систем менеджменту. Проаналізовано стан впровадження систем управління за даними Реєстру системи сертифікації УкрСЕПРО 2012-2014 років.

Ключові слова: інтегрована система менеджменту, міжнародний стандарт, процесний підхід, система управління якістю, система екологічного управління, система управління гігієною і безпекою праці, система управління безпечністю харчових продуктів.

Постановка проблеми. Із метою інтегрування у світовий ринок українським підприємствам потрібно працювати за його правилами не лише у сфері технології виробництва, а й у сфері управління суб'єктом господарювання. Разом із технологічними можливостями вітчизняні компанії мають демонструвати позитивний вплив на сучасне суспільство, зокрема враховувати у своїй діяльності питання екології, безпеки праці, соціальної відповідальності, безпеки харчової продукції, управління персоналом тощо. Вирішити поставлені завдання можливо за рахунок впровадження сучасних інтегрованих систем менеджменту, що базуються на практиці та досвіді успішних міжнародних компаній.

Аналіз досліджень і публікацій. Розробка і впровадження інтегрованих систем менеджменту (ІСМ) є предметом особливої уваги багатьох українських і зарубіжних науковців. Зокрема, проблеми функціонування й удосконалення інтегрованих систем досліджували В. Корешков [1], В. Лук'яненко [2], С. Решемділова [3], С. Тельнов [3] та інші вчені. Незважаючи на зростання кількості публікацій з означеної проблеми, варто підкреслити, що є низка проблемних питань стосовно впровадження сучасних інтегрованих систем менеджменту на підприємствах. Потребують дослідження нові вимоги, визначені у версіях 2015 р. стандартів ISO 9001 та ISO 14001, а також надання практичних рекомендацій і

роз'яснень суб'єктам господарювання щодо створення ІСМ.

Мета роботи – дослідити необхідність і доцільність впровадження інтегрованих систем менеджменту на українських підприємствах, порядок їхньої розробки, визначити основні переваги та потенційні вигоди.

Виклад основного матеріалу. У ринкових умовах організації і підприємства України все частіше впроваджують одразу кілька систем менеджменту на відповідність вимогам міжнародних стандартів: ISO 9001 – система управління якістю, ISO 14001 – система екологічного управління, OHSAS 18001 – система управління гігієною та безпекою праці й інші. Такі системи отримали назву інтегрованих систем менеджменту [1]. У тому разі, якщо система управління якістю впроваджена раніше, інші системи можуть бути інтегровані в неї, оскільки вони розроблені за єдиним принципом і сумісні одна з одною. Однак одночасна розробка і впровадження кількох систем допоможе значно спростити процеси сертифікації, ресертифікації і внутрішніх аудитів.

Перш ніж інтегрувати систему менеджменту, підприємству потрібно визначити пріоритетні цілі своєї діяльності. Приймаючи таке рішення, керівник підприємства повинен враховувати його вплив на досягнення поставлених цілей, зокрема стосовно фінансового становища, якості, кадрів, навколишнього середовища тощо. Для вирішення цих завдань

ICM має враховувати інтереси всіх зацікавлених сторін організації. Краще розуміння очікувань зацікавлених сторін може бути забезпечено за допомогою внутрішнього аналізу фахівцями організації. При цьому кожна організація визначає для себе цілі, що відображають її місію і систему цінностей.

Якщо організація прагне оцінити свою спроможність дбати про навколишнє середовище, то вона може інтегрувати систему екологічного управління відповідно до ДСТУ ISO 14001:2015 «Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування». Нова версія національного стандарту набула чинності 1 липня 2016 р. і значно відрізняється від попередньої. Зокрема, зміни стосуються структури, термінології, впровадження ризик-менеджменту (як і в новій версії ISO 9001), аналізу екологічної безпеки продукції протягом усього життєвого циклу тощо. Також наголошено на необхідності надання зовнішньої звітності про проблеми екологічної безпеки і методи їхнього вирішення, розроблені учасниками системи ISO 14001 [4].

Для промислових підприємств доцільно інтегрувати систему управління гігієною і безпекою праці згідно з вимогами ДСТУ OHSAS 18001:2010 «Системи управління гігієною та безпекою праці. Вимоги». Застосування цього стандарту в управлінській практиці допоможе підприємствам звести до мінімуму або й навіть повністю виключити професійні захворювання на виробництві, нещасні випадки, зокрема зі смертельними наслідками [5].

Підприємствам харчової промисловості для гарантування безпеки харчових продуктів рекомендується впроваджувати систему управління відповідно до ДСТУ ISO 22000:2007 «Системи управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги до будь-яких організацій харчового ланцюга». Вимоги цього стандарту розроблені на основі міжнародних принципів безпеки харчових продуктів HACCP [6].

Всі системи управління умовно поділяються на прості й складні. Прості – це системи управління якістю, складні – системи менеджменту, які інтегруються до стандартів іншої сфери відповідальності, наприклад екології, менеджменту безпеки праці, соціальної відповідальності та/або інформаційної безпеки.

Інтегрована система менеджменту розробляється за двома варіантами [2]:

1. Побудова адитивної моделі ICM. У процесі розробки цієї моделі впроваджується спочатку базова система – система управління якістю (СУЯ), що може враховувати вимоги HACCP або GMP (залежно від галузі діяльності підприємства). Після того до неї поступово додаються система екологічного управління (СЕУ), система управління гігієною та безпекою праці (СУГБП) чи інша обрана система (рис. 1).

Система СУГБП		
СЕУ		
СУЯ (HACCP, GMP)		

Рис. 1. Адитивна модель створення ICM

У разі впровадження кожної з систем окремо документація розробляється за кожною системою відповідно до вимог обраного міжнародного стандарту. Це є значним недоліком, тому що чимало документів дублюються, зростає кількість внутрішніх і зовнішніх зв'язків.

2. Побудова повністю інтегрованої моделі, за якої всі системи управління впроваджуються комплексно й одночасно (рис. 2). Розробка інтегрованої системи менеджменту за цим варіантом дає змогу:

- створити єдину систему управління на основі вимог різних стандартів;
- зменшити обсяг документації;
- розробити єдину систему документообігу та звітності на основі спільних принципів;
- забезпечити узгодженість між різними стандартами шляхом оптимізації процесів управління;
- зменшити витрати на розробку і впровадження ICM порівняно з розробкою і впровадженням її окремих складових.

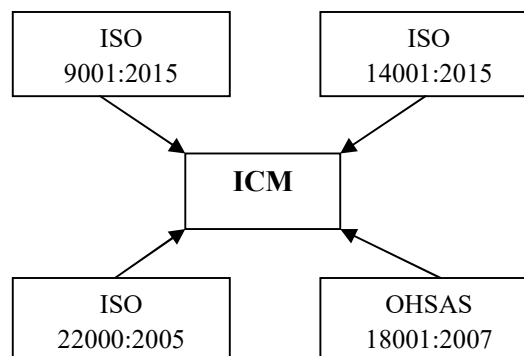


Рис. 2. Модель одночасного інтегрування

Незважаючи на беззаперечні організаційні і економічні вигоди останньої моделі, вона зустрічається ще досить рідко, що пов'язано зі складністю робіт та потребою у висококваліфікованому персоналі.

Міжнародна практика свідчить, що більш прийнятною все ж таки є адитивна модель інтегрування систем менеджменту, хоча вона й вимагає більше часу на впровадження. Тому детальніше розглянемо саме механізм розробки інтегрованої системи адитивним способом.

Розпочинати доцільно з впровадження системи менеджменту за вимогами ISO 9001. Очевидно, що під час розробки інтегрованої системи менеджменту потрібно мати на увазі, що в організації буде функціонувати одна система менеджменту, а не кілька незалежних систем. Тому для інтеграції систем управління різними специфічними сферами (інформаційною безпекою, екологією, охороною праці тощо), передусім, потрібно побудувати певну базову систему.

Розробка системи управління якістю має стати основою і необхідною умовою для побудови інтегрованої системи менеджменту, де вимоги спеціальних стандартів будуть додатковими до вимог ISO 9001.

Основною задачею СУЯ є забезпечення стабільності виробництва продукції згідно з встановленими вимогами і з урахуванням потреб замовників [7].

Наявність СУЯ дає змогу:

- більш повно і системно вивчати вимоги й потреби замовників;
- забезпечити виконання й узгодження вимог нормативних документів і замовників;
- контролювати задоволеність замовника;
- документально підтверджувати, що вимоги до якості враховуються на всіх етапах виробництва;
- виключити можливість помилки під час планування, управління й безпосереднього виконання робіт на кожному робочому місці;
- з'ясовувати і усувати невідповідності на більш ранніх стадіях, а також призначати заходи для усунення їхніх причин і можливо повторення;
- постійно контролювати ефективність заходів щодо управління якістю і здійснювати поліпшуючі заходи.

Переходячи до інтеграції за ISO 14001, перш за все, потрібно визначити екологічні аспекти, адаптувати політику в сфері якості до політики з екологічного управління в єдиний документ, деталізувати готовність до аварійних ситуацій та реагування на них, відпрацювати систему поводження з відходами.

Аналогічним є алгоритм інтегрування й у інших систем управління (OHSAS 18001, SA 8000, ISO 27001). За своєю суттю, йдеться про реалізацію процесного підходу відповідно до вимог стандарту ISO 9001:2015. Кожна система додає специфічні процеси, характерні для відповідної сфери застосування стандарту.

Безумовно, різні компанії мають свій підхід до структури процесів, однак варто пам'ятати і про те, що необґрунтоване додавання процесів, які належать до структури управління, не просто збільшує витрати компанії, але й призводить до втрати пріоритетів і керованості загалом.

За час дії попередньої версії (2008 р.) стандарту ISO 9001 організації вдосконалили чимало практик менеджменту, зокрема стосовно компетентності персоналу, інновацій, управління витратами, запобігання ризиків. Нова версія ISO 9001, що набула чинності в Україні 1 липня 2016 р., має на меті об'єднати всі актуальні досягнення різних організацій задля сприяння кращому розумінню компаніями вимог ринку і, як наслідок, покращувати свої результати.

Серед практик менеджменту, впроваджених в нову версію стандарту ISO 9001:2015, значна роль належить управлінню ризиками. Нова структура стандарту гармонізована з іншими стандартами, такими як ISO 14001:2015 та ISO 45001 (чинний OHSAS 18001), що полегшить інтеграцію різних систем менеджменту.

Сертифікована і впроваджена ICM дає можливість максимально оптимізувати, контролювати й адекватно оцінювати всі виробничі процеси підприємства за зручною і простою схемою. Це позитивно впливає не лише на контрольовані процеси, а й на діяльність підприємства загалом. Тактика інтегрованої системи менеджменту виражається в таких діях:

- 1) виявляти й усувати дефекти, недоліки, слабкі місця, попереджати їхню появу;
- 2) в роботу залучати весь персонал, який відповідно орієнтований на періодичний самоконтроль і відповідальність;

3) розробляти чітку стратегію управління;

4) постійно удосконалювати всі процеси;

5) застосовувати науковий підхід до вирішення завдань;

6) проводити регулярну самооцінку.

Є й інші аргументи на користь інтегрованої системи, оскільки всі системи, побудовані за міжнародними стандартами, мають загальні компоненти:

1) процесний і системний підходи;

2) структура планування (політика, цілі, плани);

3) структура документації з вимогами до управління задокументованою інформацією;

4) підходи до управління персоналом;

5) єдині підходи до внутрішніх аудитів;

6) використання циклу управління PDCA (Plan-Do-Check-Action);

7) застосування методології ризик-менеджменту.

Під час створення ІСМ вагому роль відіграють оцінювання та управління ризиками організації, пов'язані з аспектами її діяльності. Для СУЯ – це оцінювання і менеджмент ризику незадоволеності споживачів (замовників), економічних втрат, пов'язаних із виробництвом продукції або послуг тощо [7]. Для СЕУ – ризики негативного впливу на навколишнє середовище і невідновлювальні втрати природних ресурсів [4]. Для СУГБП – ризик завдати шкоди здоров'ю персоналу [5].

Порядок створення ІСМ може бути таким же, як і під час розробки СУЯ відповідно до вимог стандарту ISO 9001. Загальна схема передбачає послідовне виконання етапів, зображених на рис. 3.

На етапі впровадження важливо досягти, щоб розроблена інтегрована система запрацювала і ввійшла в режим стабільного функціонування. При цьому першочергову роль починає відігравати самоперевірка (внутрішній аудит), головною метою якої стає оцінювання ступеня практичного виконання вимог, визначених і задокументованих в інтегрованій системі. Для вирішення цього завдання потрібно адаптувати рекомендації ISO 19011 до всієї діяльності, що охоплюється інтегрованою системою менеджменту.

За останні роки українські підприємства все більше впроваджують системи менеджменту з метою активного розвитку на спожив-

чому ринку і підвищення рівня конкурентоспроможності.

Наприклад, на черкаському ПАТ «Азот» ІСМ функціонує відповідно до вимог стандартів ISO 9001, ISO 14001 та OHSAS 18001 і відповідно складається з трьох підсистем [8]. При цьому СУЯ була розроблена як базова у 2005 р., а СЕУ та СУГБП інтегрувалися одночасно у 2006 р. Процеси за останніми системами додавалися до вже розробленої СУЯ.

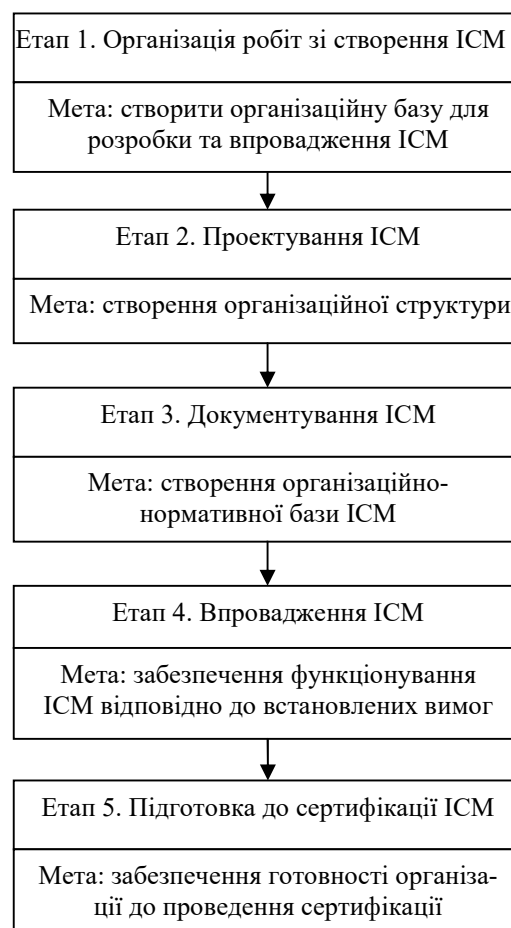


Рис. 3. Схема впровадження інтегрованої системи менеджменту

Впровадження інтегрованої системи менеджменту дає можливість підприємству отримувати безпосередні економічні та соціальні вигоди:

- забезпечення постійної практики безпечної роботи;
- підприємство краще підготоване до раптових проблем;
- економія сировини, матеріалів, енергії;

- зменшення платежів за забруднення навколишнього середовища;
- зменшення ризику юридичної відповідальності (ймовірності судових позовів, штрафних санкцій);
- зменшення витрат, пов'язаних зі здоров'ям працівників (нещасні випадки, професійні захворювання);
- налагоджені зв'язки з громадськістю;
- відповідність вимогам інвесторів;
- покращення репутації та просування на ринок;
- поліпшення взаємовідносин підприємства з виконавчими органами та інспекціями;
- підвищення ефективності прогнозування та оперативності вирішення проблем у сфері охорони навколишнього середовища та безпечності виробництва.

Дані Реєстру системи сертифікації УкрСЕПРО свідчать, що впродовж 2012 – 2014 рр., окрім сертифікації ISO 9001, популярності набувають інші системи управління [9]. Зокрема, за аналізований період впроваджено 100 систем екологічного управління і 28 систем управління гігієною та безпекою праці (табл. 1).

Таблиця 1

**Дані Реєстру УкрСЕПРО щодо
впровадження систем управління
у 2012 – 2014 рр.**

Система управління	2012	2013	2014
ISO 9001	718	766	520
ISO 14001	41	33	26
OHSAS 18001	10	14	4

Системи екологічного управління регламентують порядок планування роботи з охорони навколишнього середовища, систему контролю за дотриманням природоохоронного законодавства, норми дозволених викидів у навколишнє середовище. Окрім того, СЕУ визначає порядок організації обліку звітності з охорони навколишнього середовища, аналізу стану дотримання природоохоронного законодавства в структурних підрозділах та загалом на підприємстві, оцінювання ефективності функціонування СЕУ.

Система управління гігієною та безпекою праці сприяє створенню безпечного та здорового робочого середовища, що дає можливість підприємству постійно виявляти й контролювати стан здоров'я та ризику для

безпеки працівників, попереджати можливі аварії, підвищувати загальну продуктивність персоналу.

Загальна мета стандарту ISO 45001, публікація якого планується наприкінці 2016 р., залишається такою ж, як і OHSAS 18001:2007. Проте стандарт ISO 45001 має нову структуру і форму, що повною мірою враховує нові правила розробки стандартів на системи управління відповідно до додатка SL Директиви ISO / ІЕС 2013 р.

Суттєвими змінами в першій редакції міжнародного стандарту ISO 45001, на відміну від британського OHSAS 18001:2007, є: нові розділи «Контекст організації»; «Лідерство»; вимоги до управління змінами, аутсорсингу, уточнення вимог до постійного поліпшення. У проекті стандарту ISO 45001 пропонується визначати не лише ризики погіршення системи менеджменту OHSAS, але й можливості її поліпшення [10].

Висновки. Для того щоб відповідати законодавчим та ринковим вимогам, займати лідерські позиції, українські підприємства впроваджують кілька систем менеджменту на основі міжнародних стандартів – ISO 9001, НАССР, ISO 14001, OHSAS 18001 й інших. Інтегрована система менеджменту стає ефективним інструментом для розвитку бізнесу, дає можливість підприємству успішно працювати на ринку, гуртує всі зацікавлені сторони навколо єдиної мети, і в підсумку – компанія ефективно функціонує в жорсткому конкурентному середовищі.

Базою для створення ICM має бути впровадження системи управління якістю, а вимоги спеціальних стандартів стануть додатковими до вимог ISO 9001.

Список літератури

1. Інтегровані системи менеджменту організації. Особливості, проблеми і шляхи вирішення / В. Корешков, В. Назаренко, М. Кусакін, І. Осмола // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2007. – № 1. – С. 54–61.
2. Лук'яненко В. М. Інтегровані системи менеджменту / В. М. Лук'яненко, І. В. Галич, О. В. Афанасьєва // Якість технологій та освіти. – 2011. – № 2. – С. 67–70.
3. Тельнов А. С. Тенденції та суперечності розбудови інтегрованих систем управління якістю / А. С. Тельнов, С. Л. Решміділова //

- Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 5, т. 2. – С. 149–155.
4. ISO 14001:2015 (en) Environmental management systems – Requirements with guidance for use [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:en>
 5. Системи управління гігієною та безпекою праці. Вимоги : ДСТУ OHSAS 18001:2010. – [Чинний від 2011-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2011. – 32 с. – (Національний стандарт України).
 6. Системи керування безпечністю харчових продуктів. Вимоги до будь-яких організацій харчового ланцюга : ДСТУ ISO 22000:2007. – [Чинний від 2007-08-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 38 с. – (Національний стандарт України).
 7. ISO 9001:2015 (en) Quality management systems – Requirements [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en>
 8. Інтегрована система управління ПАТ«Азот» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.azot.cherkassy.net/content/news2/>
 9. Моніторинг систем управління [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://uas.org.ua/index.php?option=com_content&task=category§ionid=8&id=46&Itemid=70
 10. Цопа В. Новый стандарт ISO 45001 по управлению охраной труда / В. Цопа // Охрана труда. – 2015. – № 2. – С. 22–26.
 - Standartyzatsiya, sertyfikatsiya, yakist'*, (1), pp. 49–53 [in Ukrainian].
 2. Lukyanenko, V. M., Galych, I. V. and Afanasyeva, O. V. (2011) Computer-integrated management systems. *Yakist' tekhnolohiy ta osvity*, (2), pp. 67–70 [in Ukrainian].
 3. Telnov, A. S. and Reshmidilova, S. L. (2014) Tendencies and contradictions of the development of computer-integrated systems of quality management. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, No. 5 (2), pp. 149–155 [in Ukrainian].
 4. ISO 14001:2015 (en) Environmental management systems. Requirements with guidance for use, available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:en>
 5. Systems of management by worker health and safety. Requirements (2011) DSTU OHSAS 18001:2010 as on January, the 1st. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 32 p. [in Ukrainian].
 6. Systems of management by foodstuffs safety. Requirements to any food chain organizations (2007). DSTU ISO 22000:2007 as on August, the 1st. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 38 p. [in Ukrainian].
 7. ISO 9001:2015 (en) Quality management systems. Requirements, available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en>
 8. Integrated system of PAT«Azot» management, available at: <http://www.azot.cherkassy.net/content/news2/>
 9. Management systems monitoring, available at: http://uas.org.ua/index.php?option=com_content&task=category§ionid=8&id=46&Itemid=70
 10. Tsopa, V. (2015) New standard ISO 45001 on management by worker health and safety. *Ohrana truda*, (2), pp. 22–26 [in Russian].

References

O. M. Lysenko, *Ph.D. in Pedagogic Sciences, associate professor*
 Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy
 Shevchenko blvd, 81, Cherkasy, 18000, Ukraine
 e-mail: lysenko-nek@ukr.net

PECULIARITIES OF INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS DEVELOPMENT BASED ON INTERNATIONAL STANDARDS IN UKRAINE

In order to integrate into the global market Ukrainian enterprises need to work according to its rules not only in manufacturing industry, but also in the field of management. Domestic companies should impact modern society in a positive way, take into account environmental issues, safety, social

responsibility, food safety, human resources etc. in the course of their business activity. These issues can be solved by the introduction of modern integrated management system based on international standards.

The aim of the research is to study the need and rationale for the implementation of integrated management systems at Ukrainian enterprises, procedures and models of their development.

In order to comply with legal requirements and occupy leading positions in the market, Ukrainian companies are increasingly implementing management systems based on international standards – ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001 and others. Thus, 2004 quality management systems, 100 environmental management systems and 28 health and safety management systems were certified during the period of 2012 – 2014. The results show that additive model of management systems integrating is the most appropriate one at this stage.

The integrated management system becomes fundamental for enterprise activity improving, allows to successfully operate in the future and obtain the potential benefits, unites all concerned parties around a common goal and as a result – the company operates efficiently in intense competitive environment.

Keywords: *integrated management system, international standard, process approach, quality management system, environmental management system, health and safety management system, food safety management system.*

*Рецензенти: С. В. Голуб, д.т.н., професор,
В. М. Рудницький, д.т.н., професор*

О. Н. Петрищев¹, д.т.н., профессор,
К. В. Базило², к.т.н., доцент

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

²Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченко, 460, Черкасы, 18006, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ДИСКА И ЕГО РАСЧЕТ В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ЧАСТОТ

При достаточно общих начальных предположениях получено математическое описание электрического импеданса колеблющегося в вакууме пьезокерамического тонкого диска со сплошным электродированием торцевых поверхностей. Показано, что электрический импеданс диска определяется усредненными значениями аксиального и радиального компонентов вектора смещения материальных частиц деформируемой пьезокерамики. Выполнено оценку электрического импеданса пьезокерамического диска в области низких частот, когда реализуется режим постоянства (равенства нулю) механических напряжений в объеме колеблющегося диска.

Ключевые слова: тонкий диск, пьезокерамика, электрический импеданс, радиальный и аксиальный компоненты вектора смещения материальных частиц пьезокерамики.

Введение. Конечной целью математического моделирования физического состояния колеблющихся пьезокерамических элементов является качественное и количественное описание характеристик и параметров существующих в них электрических и упругих полей. Совершенно ясно, что получение содержательных и достоверных количественных оценок параметров физического состояния пьезоэлектрических (пьезокерамических) элементов не представляется возможным без достоверных данных о величинах физико-механических констант материалов.

Академик А. А. Харкевич в заключительной статье к своей работе «Теория преобразователей» [1] пишет: «По поводу экспериментального определения некоторых физических констант... дело идет о весьма существенных вещах, и страшно видеть, что они полностью игнорируются в целом ряде экспериментальных работ. Инженер-расчетчик или проектировщик, по меньшей мере, в затруднительном положении. Он не может обратиться к инженерным справочникам типа Хютте, так как подобных для данной отрасли техники не существует. Но он не может почерпнуть нужных ему данных даже в справочниках физических констант. Достаточно заметить, что в употребительном у нас справочнике Дорфмана и Фриша отдел пьезоэлектричества вообще отсутствует, а устарелые

данные по магнитострикции приведены в совершенно неудовлетворительном виде. Таким образом, инженеру приходится обращаться к новейшим оригинальным экспериментальным работам. Но и здесь он не находит того, что нужно.

В лучшем случае, читая между строк и подвергая данные автора дополнительной обработке, можно извлечь из них нечто более или менее достоверное и полезное для практики.

Такое положение необходимо в корне изменить, путем постановки заново экспериментов, отвечающих поставленным выше требованиям. ... Можно было бы привести ряд примеров нарушения элементарного требования: так, сумбур, царящий в области определения численных значений констант хотя бы той же сегнетовой соли, следует в значительной мере отнести за счет указанных методических погрешностей...».

Приведенная выше достаточно обширная цитата заимствована из монографии, которая была опубликована в 1948 г. Прошло почти семьдесят лет, но, данная А. А. Харкевичем характеристика того состояния экспериментального обеспечения теории пьезоэлектрических функциональных элементов вообще и теории пьезоэлектрических трансформаторов в частности вполне применима и к нынешнему положению вещей. Для того чтобы в этом убедиться, достаточно взглянуть

на ГОСТ 12370 – 80 (Материалы пьезокерамические. Методы испытаний) и пришедший ему на смену ОСТ 110444 – 87 (Материалы пьезокерамические. Технические условия). Справедливости ради надо сказать, что по материальным константам пьезоактивных кристаллов, которые используются в акустоэлектронике и акустооптике, есть вполне доброкачественные справочные данные [2]. Справочники такого уровня качества по пьезоэлектрическим керамикам отсутствуют.

Очевидно, что без знания материальных констант пьезокерамики нечего и думать о каком-либо осмысленном сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов в области теории и практики пьезоэлектрических функциональных элементов. Для того чтобы быть уверенным в достоверности цифр, полученных в результате математического моделирования реальной ситуации, необходимо быть уверенным в достоверности числовых значений материальных констант, которые во многом определяют не только количественное, но в ряде случаев и качественное содержание результатов вычислений. Таким образом, вопрос об экспериментальном определении физико-механических констант пьезоэлектрических керамики не теряет своей актуальности и по сей день.

Интенсивное и широкомасштабное практическое применение синтетических пьезоэлектриков (пьезокерамик) явилось новым импульсом, стимулирующим развитие экспериментальных методов определения физико-механических параметров пьезоактивных материалов.

Авторы справочного пособия [3], перечисляя существующие методы измерения материальных констант пьезоэлектрических керамики, приводят 11 названий динамических методов экспериментального определения модулей упругости и пьезомодулей. При ближайшем рассмотрении все это многообразие методов можно разбить на три группы, а именно:

- метод резонанса-антирезонанса и его модификации;
- метод круговых диаграмм и его модификации;
- ультразвуковые методы.

Ультразвуковые методы в своей теоретической основе опираются на формализм собственных чисел и собственных векторов тензора Кристоффеля [4] и предполагают измерение скоростей распространения плоских

волн различной поляризации [5, 6]. Недостатками этого метода экспериментальных исследований являются сложность подготовки образцов и сложность возбуждения плоских волн, которые должны распространяться в строго определенных в пространстве кристаллографических осях направлениях. При этом возбуждаемые волны должны иметь наперед заданную поляризацию. Помимо этого, обработка результатов измерения скоростей распространения плоских волн невозможна без знания числовых значений компонентов тензора диэлектрической проницаемости пьезоэлектрика и компонентов тензора пьезомодулей. В различных версиях ультразвукового метода эти величины предполагаются заранее известными. Так как в ультразвуковом методе диэлектрические проницаемости и пьезомодули не измеряются по определению, то его вообще нельзя рассматривать как самостоятельный и замкнутый метод экспериментального определения материальных констант пьезоэлектриков.

Метод круговых диаграмм и некоторые его модификации достаточно подробно описаны в монографии [7]. Этот метод базируется на математической модели электрического импеданса исследуемого образца. Достоверность результатов, которые получают с помощью этого метода, определяется степенью адекватности математической модели реальному объекту. Суть метода заключается в измерении действительной и мнимой частей электрического импеданса пьезокерамического образца на 20–30 частотах. По результатам этих измерений строится круговая диаграмма комплексного сопротивления или проводимости, и по характеристическим точкам на диаграмме определяются материальные константы пьезоэлектрических материалов. Метод круговых диаграмм требует дорогостоящей аппаратуры и большого объема измерений. Основной недостаток метода круговых диаграмм заключается в том, что для определения материальных констант пьезокерамики необходимо проводить измерения на образцах различной формы и различной поляризации. При этом возникают погрешности двух типов. Первый тип погрешности – это погрешность модельного представления напряженно-деформированного состояния колеблющегося образца. Эти погрешности поддаются оценке и могут быть учтены при определении доверительных интервалов числовых значений

измеряемых материальных констант. Второй тип погрешностей (их можно назвать погрешностями технологического происхождения) обусловлен тем, что электрическая поляризация образцов различной формы может быть, в принципе, различной. Это означает, что пьезоэлектрические константы и диэлектрические проницаемости различных по форме образцов, изготовленных из одинакового исходного сырья, могут, в принципе, отличаться друг от друга. Если, к тому же, различные по форме образцы поляризованы в различных направлениях, то числовые значения пьезомодулей этих образцов будут обязательно отличаться друг от друга. Этот тип погрешностей практически не поддается оцениванию, и вопрос о достоверности измеренных числовых значений материальных констант остается без ответа.

Метод резонанса-антирезонанса, по свидетельству У. Кэди [8], восходит к работам Уоррена Мэзона (1943 г.) и предполагает измерение частот электромеханических резонансов и антирезонансов установившихся колебаний исследуемых образцов. Как и в методе круговых диаграмм, теоретической основой является математическая модель электрического импеданса исследуемого образца. По этой причине все погрешности метода круговых диаграмм присущи и методу резонанса-антирезонанса. К тому же, надо добавить, что описанные в справочном пособии [3] модели построены с применением электромеханических аналогий, т. е. электрический импеданс исследуемого образца определялся по его эквивалентной схеме. Электромеханические аналогии и следующие из них эквивалентные схемы можно использовать лишь в случае однородного напряженно-деформированного состояния исследуемого образца. Не зависящие от значений координат точки наблюдения распределения напряжений и деформаций имеют место, как правило, на частотах, существенно меньших частоты первого электромеханического резонанса. Определение числового значения константы электромеханической связи как отношения разности частот антирезонанса и резонанса к частоте резонанса заимствовано без какого либо предварительного исследования и обоснования из анализа характеристик эквивалентной схемы кварцевого резонатора [8]. На это в свое время указали авторы монографии [9]. Добротность кварцевого резонатора существенно превосходит добротность колебательного контура, в котором используется

пьезоэлектрическая керамика, поэтому отмеченное выше заимствование является, по всей видимости, неправомерным.

Наиболее существенным недостатком всех без исключения версий метода резонанса-антирезонанса является неясность в порядке определения числовых значений диэлектрической проницаемости пьезокерамики. Рассуждения [3] о том, что этот параметр определяется по результатам измерения электрической емкости образца на очень высоких частотах, не вполне правомерны.

В работе [10] впервые была предпринята попытка разработки методики экспериментального определения физико-механических параметров пьезоэлектрической керамики, которая опиралась на основные представления механики деформируемого твердого тела с усложненными (пьезоэлектрическими) свойствами. Единственным слабым местом способа, описанного в работе [10], является склейка двух пьезокерамических дисков. Эта склейка обладает плохо воспроизводимыми (особенно на длительном интервале времени) характеристиками, которые хотя и в незначительной степени, но влияют на результаты экспериментального определения модулей упругости биморфного пьезокерамического элемента. Именно по этой причине представляется необходимым так изменить трехдиапазонный метод резонанса-антирезонанса [10], чтобы исключить из результатов эксперимента трудно прогнозируемое влияние параметров склеивающего слоя.

Известно [9], что при описании различных форм колебаний одного и того же объекта используются различные наборы материальных констант. Так, при описании толщинных колебаний поляризованной по толщине пьезокерамической пластинки требуется, как минимум, знание модуля упругости c_{33}^E (модуль упругости, измеряемый в режиме постоянства (равенства нулю) напряженности электрического поля), пьезомодуля e_{33} и диэлектрической проницаемости χ_{33}^E (диэлектрическая проницаемость, измеряемая в режиме постоянства (равенства нулю) деформации или, как иногда говорят, но это правильно лишь наполовину, проницаемость зажато пьезоэлектрика). При описании радиальных колебаний поляризованного по толщине пьезокерамического диска требуется знание гораздо большего числа материальных кон-

стант, а именно c_{11}^E , c_{12}^E , c_{13}^E , c_{33}^E , e_{31} , e_{33} и χ_{33}^E . Сопоставляя между собой результаты измерения модулей упругости c_{12}^E и c_{13}^E , несложно заметить, что они отличаются друг от друга на величину, которая редко превосходит уровень 0,3–0,5 % от номинального значения (см., например, таблицы, приведенные в монографиях [3, 9, 11]). В действительности, упругие свойства поляризованной по толщине пьезокерамической пластинки в плоскости, которая перпендикулярна кристаллографической оси Z , являются трансверсально изотропными. Этот факт дает основания для вывода, что оценка числовых значений модулей упругости $c_{\alpha\beta}^E$ может и должна производиться в предположении, что $c_{12}^E = c_{13}^E$. Более того, можно доказать путем формальных рассуждений, что напряженно-деформированное состояние пластинки в режиме толщинных колебаний описывается с помощью модуля упругости c_{33}^E только лишь в том случае, когда выполняется равенство $c_{12}^E = c_{13}^E$.

Таким образом, необходимо построить непротиворечивую методику экспериментального определения материальных констант пьезокерамики, которая доставляет достоверные значения минимум трех модулей упругости, двух элементов матрицы пьезомодулей и одного элемента матрицы диэлектрических проницаемостей, что и является целью работы.

Определение электрического импеданса диска из поляризованной по толщине пьезокерамики. Рассмотрим (рис. 1) диск, толщина которого α во много раз меньше радиуса R . Поверхности диска $z = 0$ и $z = \alpha$ (z – координатная ось цилиндрической системы координат ρ , φ , z , начало которой совмещено с центром нижней поверхности диска) электрофицированы – покрыты тонким (не более 10 мкм) слоем серебра. На верхнюю поверхность $z = \alpha$ подается электрический потенциал $U_0 e^{i\omega t}$ (U_0 – амплитудное значение электрического потенциала, величина которого выбирается из условия $U_0/\alpha \ll 0,1E_0$, где $E_0 \cong 2$ МВ/м – напряженность поляризующего материал диска электрического поля, что гарантирует отсутствие нелинейных эффектов; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; ω – круговая частота смены знака потенциала; t – время).

Нижняя электрофицированная поверхность $z = 0$ заземлена, т. е. имеет нулевой потенциал.

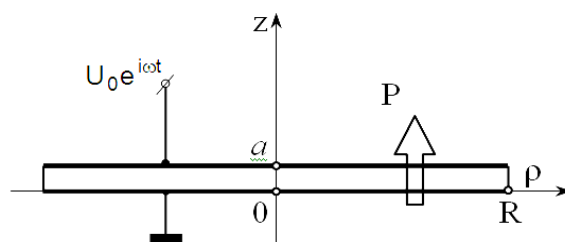


Рис. 1. Расчетная схема колеблющегося пьезокерамического диска

Приложенная к диску разность электрических потенциалов создает в его объеме электрическое поле, которое смещает ионы циркония, титана, свинца и кислорода из положения равновесия. В результате гармонически изменяющегося во времени деформирования диска в нем возникают поляризационные заряды, которые взаимодействуют на электрофицированных поверхностях с электрическими зарядами, которые доставляются на эти поверхности генератором разности электрических потенциалов. Результирующий электрический заряд $Qe^{i\omega t}$ на поверхности $z = \alpha$ своим электрическим полем формирует электрический ток $Ie^{i\omega t}$ в проводнике, который соединяет поверхность $z = \alpha$ с выходом электрического генератора. В любой момент времени $Ie^{i\omega t} = -\partial Q/\partial t = -i\omega Qe^{i\omega t}$, т. е. амплитуды тока и электрического заряда на поверхности $z = \alpha$ связаны линейной зависимостью $I = -i\omega Q$.

Очевидно, что электрический импеданс $Z_{эл}(\omega)$ колеблющегося диска должен подчиняться закону Ома для участка цепи, из чего следует, что

$$Z_{эл}(\omega) = \frac{U_0}{I} = -\frac{U_0}{i\omega Q}. \quad (1)$$

Амплитудное значение поверхностной плотности σ_0 электрического заряда определяется через амплитудное значение нормального этой поверхности компонента вектора электрической индукции $\vec{D}(\rho, \varphi, z)$. В рассматриваемой ситуации $\sigma_0 = D_z(\rho, z)$ и, поскольку все физические поля в колеблющемся пьезокерамическом диске а priori обладают осевой симметрией,

$$Q = \int_S \sigma_0 dS = \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho D_z(\rho, z) d\rho d\varphi = 2\pi \int_0^R \rho D_z(\rho, z) d\rho. \quad (2)$$

Электрическое состояние диска определяется законом электрической поляризации диэлектрика, который обладает пьезоэлектрическими свойствами [12] и в терминах амплитудных значений характеристик гармонически изменяющихся во времени физических полей записывается в следующем виде:

$$D_k = e_{knm} \varepsilon_{nm} + \chi_{kj}^e E_j, \quad k, n, m, j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где D_k – амплитудное значение k -го компонента вектора электрической индукции (размерность – кулон, деленный на метр квадратный); e_{knm} – компонент тензора пьезоэлектрических модулей (размерность – кулон, деленный на метр квадратный); ε_{nm} – амплитудное значение компонента тензора бесконечно малых деформаций (безразмерная величина); χ_{kj}^e – компонент тензора диэлектрической проницаемости, который экспериментально определяется в режиме постоянства (равенства нулю) упругих деформаций (верхний символ ε); E_j – амплитудное значение j -го компонента вектора напряженности электрического поля в объеме деформируемого пьезоэлектрика. При записи соотношения (3) по умолчанию предполагается, что выполняется соглашение о суммировании по дважды повторяющимся индексам. Между индексами координатных осей правосторонней декартовой системы координат и символами осей цилиндрической системы координат существует взаимно однозначное соответствие, а именно: $1 \Leftrightarrow \rho$; $2 \Leftrightarrow \varphi$ и $3 \Leftrightarrow z$.

Компоненты тензора бесконечно малых деформаций удовлетворяют обобщенному закону Гука для упругой среды с пьезоэлектрическими свойствами [12], который записывается следующим образом:

$$\sigma_{ij} = c_{ijk\ell}^E \varepsilon_{k\ell} - e_{kij} E_k, \quad (4)$$

где σ_{ij} – амплитудное значение компонента тензора механических напряжений (размерность – ньютон, деленный на метр квадратный или паскаль); $c_{ijk\ell}^E$ – компонент тензора модулей упругости, который экспериментально определяется в режиме постоянства (равенства нулю) напряженности электрического поля (верхний символ E) в объеме деформируемого пьезоэлектрика.

Упругие напряжения σ_{ij} и силы инерции, которые возникают в объеме динамически деформируемого твердого тела, связаны между собой вторым законом Ньютона в дифференциальной форме или, как чаще говорят, уравнениями движения, которые в случае осесимметричного, изменяющегося во времени по гармоническому закону напряженно-деформированного состояния записываются в цилиндрической системе координат следующим образом [13]:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_{\rho z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} (\sigma_{\rho\rho} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \rho_0 \omega^2 u_\rho = 0, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \sigma_{z\rho}) + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho_0 \omega^2 u_z = 0, \quad (6)$$

где ρ_0 – плотность пьезокерамики; u_ρ и u_z – амплитудные значения компонентов вектора смещения материальных частиц – бесконечно малых объемов пьезокерамики. Нормальные и касательные напряжения на поверхностях диска должны удовлетворять третьему закону Ньютона. Если диск колеблется в вакууме или, что, практически, то же самое, в воздухе, т. е. не имеет механических контактов с другими материальными объектами (рис. 1), то на поверхностях диска должны выполняться следующие условия:

$$\sigma_{z\rho}|_{z=0,\alpha} = \sigma_{zz}|_{z=0,\alpha} = 0 \quad \forall \rho \in [0, R], \quad (7)$$

$$\sigma_{\rho z}|_{\rho=R} = \sigma_{\rho\rho}|_{\rho=R} = 0 \quad \forall z \in [0, \alpha]. \quad (8)$$

Поскольку деформации определяются через компоненты вектора смещения (в рассматриваемой задаче это $\varepsilon_{\rho\rho} = \partial u_\rho / \partial \rho$, $\varepsilon_{\varphi\varphi} = u_\rho / \rho$, $\varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z$ и $\varepsilon_{\rho z} = (\partial u_\rho / \partial z + \partial u_z / \partial \rho) / 2$), постольку можно утверждать, что адекватное реальной ситуации математическое описание электрического импеданса предполагает адекватное математическое описание динамического напряженно-деформированного состояния колеблющегося пьезокерамического диска. Естественно, что на качественные и количественные характеристики напряженно-деформированного состояния в объеме диска оказывает существенное влияние электрическое поле, которое является алгебраической суммой электрическо-

го поля, созданного генератором разности электрических потенциалов (в дальнейшем – электрическое поле внешнего источника), и электрического поля, которое возникает из-за смещения ионов из положения равновесия (прямой пьезоэлектрический эффект). Это поле в дальнейшем будем называть внутренним электрическим полем.

Вектор напряженности $\vec{E}(\rho, \varphi, z)e^{i\omega t}$ суммарного электрического поля или, как ранее говорилось, электрического поля в объеме деформируемого пьезоэлектрика удовлетворяет уравнениям Максвелла, которые в терминах амплитудных значений характеристик гармонически изменяющихся во времени физических полей записываются в виде

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + i\omega \vec{D}, \quad (9)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -i\omega \vec{B}, \quad (10)$$

где $\vec{H}$ и $\vec{B}$ – амплитудные значения векторов напряженности и индукции переменного магнитного поля, причем $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума или магнитная постоянная); $\vec{J} = r\vec{E}$ – поверхностная плотность тока проводимости; r – удельная электрическая проводимость среды. Пьезоэлектрическая керамика является довольно хорошим изолятором электрического тока. Не впадая в излишнюю идеализацию, можно положить $r = 0$, после чего уравнение (9) принимает вид

$$\text{rot} \vec{H} = i\omega \vec{D}. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \left(e_{1nm} \varepsilon_{nm} - \frac{\chi_{1j}^e}{h_j} \frac{\partial \Phi}{\partial q_j} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(e_{2nm} \varepsilon_{nm} - \frac{\chi_{2j}^e}{h_j} \frac{\partial \Phi}{\partial q_j} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(e_{3nm} \varepsilon_{nm} - \frac{\chi_{3j}^e}{h_j} \frac{\partial \Phi}{\partial q_j} \right) = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где h_j – коэффициенты Ламе цилиндрической системы координат ($h_1 = 1$; $h_2 = \rho$; $h_3 = 1$); q_j ($q_1 = \rho$; $q_2 = \varphi$ и $q_3 = z$) – j -я координата цилиндрической системы координат. Решение этого уравнения для объекта, показанного на рис. 1, т. е. скалярный потенциал $\Phi(\rho, z)$ должен удовлетворять очевидным условиям:

$$\Phi(\rho, z)|_{z=0} = 0, \quad \Phi(\rho, z)|_{z=\alpha} = U_0. \quad (15)$$

На боковой поверхности диска $\rho = R$ должно выполняться приближенное условие [9]

Вычисляя дивергенцию от левой и правой части уравнения (11), приходим к выводу, что

$$\text{div} \vec{D} = 0. \quad (12)$$

Условие (12), определяющее аналитические свойства вектора электрической индукции, принято называть условием отсутствия свободных носителей электричества в объеме деформируемого пьезодиэлектрика.

В монографии [9] показано, что в частотном диапазоне порядка единиц мегагерц переменное магнитное поле в объеме деформируемой пьезокерамики настолько мало, что можно считать, что $\text{rot} \vec{E} \approx 0$. Из последнего равенства следует, что электрическое поле в объеме деформируемой пьезокерамики является безвихревым, т. е. потенциальным, и может быть описано с помощью скалярного электрического потенциала $\Phi(\rho, \varphi, z)e^{i\omega t}$. При этом амплитудное значение вектора напряженности электрического поля определяется через амплитудное значение скалярного потенциала стандартным образом:

$$\vec{E} = -\text{grad} \Phi. \quad (13)$$

Подставляя определение (13) в соотношения (3), а полученные результаты – в условие (12), получаем дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных, которое в цилиндрической системе координат записывается в следующем виде:

$$\left. \frac{\partial \Phi(\rho, z)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R} \cong 0. \quad (16)$$

Таким образом, аналитическое описание электрического импеданса $Z_{эл}(\omega)$ колеблющегося пьезокерамического диска предполагает решение граничной задачи динамической электроупругости, которая состоит из трех дифференциальных уравнений (5), (6) и (14) и граничных условий (7), (8) и (15), (16). Связующим звеном между упругой и электрической частями этой задачи являются

уравнения (3) и (4) физического состояния пьезоэлектрика.

Конкретное содержание уравнений физического состояния (3) и (4) определяется конструкцией матриц материальных констант пьезокерамики.

Для поляризованного в направлении оси z (направление поляризации показано на рис. 1 стрелкой, обозначенной символом P) пьезокерамического диска матрицы материальных констант записываются в следующем виде [14]:

- матрица модулей упругости

$$|c_{\beta\lambda}^E| = \begin{vmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22}^E & c_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44}^E & 0 & 0 \\ & & & & c_{55}^E & 0 \\ & & & & & c_{66}^E \end{vmatrix}, \quad (17)$$

где β и λ – индексы Фойгта, каждый из которых объединяет пару тензорных индексов по следующей схеме: $\beta \Leftrightarrow i, j$ и $\lambda \Leftrightarrow k, \ell$; между числовыми значениями индексов Фойгта ($\beta, \lambda = 1, 2, \dots, 6$) и тензорных индексов ($i, j, k, \ell = 1, 2, 3$) существует взаимно однозначное соответствие: $1 \Leftrightarrow (1, 1)$; $2 \Leftrightarrow (2, 2)$; $3 \Leftrightarrow (3, 3)$; $4 \Leftrightarrow (2, 3; 3, 2)$; $5 \Leftrightarrow (1, 3; 3, 1)$ и $6 \Leftrightarrow (1, 2; 2, 1)$. Между числовыми значениями элементов матрицы (17) существуют следующие соотношения: $c_{11}^E = c_{22}^E \neq c_{33}^E$; $c_{12}^E = c_{13}^E = c_{23}^E$; $c_{44}^E = c_{55}^E$; $c_{66}^E = (c_{11}^E - c_{12}^E)/2$;

- матрица пьезоэлектрических модулей $e_{kj} \Leftrightarrow e_{k\beta}$ (β – индекс Фойгта)

$$|e_{k\beta}| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (18)$$

где $e_{15} = e_{24}$; $e_{31} = e_{32} \neq e_{33}$; в работе [12] показано, что пьезомодули $e_{15} = e_{24} = (e_{33} - e_{31})/2$;

- матрица диэлектрических проницаемостей χ_{kj}^E

$$|\chi_{kj}^E| = \begin{vmatrix} \chi_{11}^E & 0 & 0 \\ & \chi_{22}^E & 0 \\ & & \chi_{33}^E \end{vmatrix}, \quad (19)$$

где $\chi_{11}^E = \chi_{22}^E \neq \chi_{33}^E$.

Рассмотрим качественный состав вектора электрической индукции $\vec{D}(\rho, z)$. В общем (неосесимметричном) случае вектор электрической индукции имеет три компонента D_ρ , D_ϕ и D_z . В рассматриваемой задаче физическое состояние диска обладает осевой симметрией, которая обеспечивается сплошным электродированием поверхностей $z = 0$ и $z = \alpha$, по этой причине $D_\phi \equiv 0$. Радиальный компонент вектора электрической индукции $D_\rho = 2e_{15}\epsilon_{\rho z} + \chi_{11}^E E_\rho$. Радиальный компонент вектора напряженности электрического поля равен нулю на поверхностях $z = 0$ и $z = \alpha$, а также на оси симметрии (оси Oz) диска и на боковой поверхности $\rho = R$. На этих же поверхностях и на оси Oz обращаются в нуль касательные напряжения $\sigma_{\rho z} = 2c_{55}^E \epsilon_{\rho z} - e_{15} E_\rho$, откуда следует, что сдвиговые деформации $\epsilon_{\rho z} = \epsilon_{z\rho}$ также обращаются в нуль на поверхностях $\rho = R$, $z = 0$, $z = \alpha$ и на оси Oz . Одновременное обращение в нуль сдвиговых деформаций $\epsilon_{\rho z}$ и радиального компонента E_ρ вектора напряженности электрического поля позволяет утверждать, что радиальный компонент $D_\rho = 0$ на поверхностях $\rho = R$, $z = 0$, $z = \alpha$ и на оси Oz . Можно показать, что в объеме диска существует плоскость $z > 0$, на которой обращаются в нуль $\epsilon_{\rho z}$ и E_ρ и, как следствие, компонент D_ρ . Если диск достаточно тонкий, то, принимая во внимание обилие областей, где $D_\rho = 0$, можно, в первом приближении, положить, что $D_\rho = 0 \forall (\rho, z) \in V$, где V – объем диска.

Таким образом, вектор электрической индукции в тонких дисках практически полностью определяется аксиальным компонентом $D_z(\rho, z)$, который, как это следует из условия (12), должен удовлетворять соотношению $\partial D_z / \partial z = 0$, что эквивалентно утверждению, что аксиальный компонент не зависит от значений координаты z , т. е. $D_z(\rho, z) \equiv D_z(\rho)$. Из определения (3) следует, что

$$D_z(\rho) = e_{31}\varepsilon_{\rho\rho} + e_{32}\varepsilon_{\varphi\varphi} + e_{33}\varepsilon_{zz} + \chi_{33}^\varepsilon E_z \equiv \\ \equiv e_{31}\left(\frac{\partial u_\rho}{\partial \rho} + \frac{u_\rho}{\rho}\right) + e_{33}\frac{\partial u_z}{\partial z} - \chi_{33}^\varepsilon \frac{\partial \Phi}{\partial z} = e_{31}\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \rho}[\rho u_\rho(\rho, z)] + e_{33}\frac{\partial u_z}{\partial z} - \chi_{33}^\varepsilon \frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (20)$$

При записи выражения (20) было использовано принятое в механике соглашение про обозначение одинаковыми символами численно равных материальных констант e_{31} и e_{32} .

Воспользуемся тем, что аксиальный компонент вектора электрической индукции не зависит от значений координаты z , и проинтегрируем соотношение (20) по переменной z в пределах от нуля до α :

$$\alpha D_z(\rho) = e_{31}\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \rho}\left[\rho \int_0^\alpha u_\rho(\rho, z)dz\right] + e_{33}[u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0)] - \\ - \chi_{33}^\varepsilon [\Phi(\alpha) - \Phi(0)]. \quad (21)$$

Введем обозначение

$$u_\rho^{(z)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha u_\rho(\rho, z)dz, \quad (22)$$

и будем называть величину $u_\rho^{(z)}(\rho)$ усреднен-

ным по толщине диска радиальным компонентом вектора смещения материальных частиц диска. Так как $\Phi(\alpha) - \Phi(0) \equiv U_0$, то выражение (21) можно представить в следующем виде:

$$D_z(\rho) = e_{31}\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \rho}[\rho u_\rho^{(z)}(\rho)] + \frac{e_{33}}{\alpha}[u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0)] - \chi_{33}^\varepsilon \frac{U_0}{\alpha}. \quad (23)$$

Предваряя подстановку выражения (23) в соотношение (2), введем обозначение

$$u_z^{(p)}(z) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho u_z(\rho, z) d\rho d\varphi = \frac{2}{R^2} \int_0^R \rho u_z(\rho, z) d\rho \quad (24)$$

и будем называть величину $u_z^{(p)}(z)$ усредненным по площади диска аксиальным компонентом вектора смещения материальных частиц диска.

Подставляя выражение (23) в определение (2) электрического заряда Q на поверхности $z = \alpha$, получаем с учетом определения (24) следующий результат:

$$Q = 2\pi e_{31} R u_\rho^{(z)}(R) + \frac{\pi R^2}{\alpha} e_{33} [u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)] - \frac{\pi R^2}{\alpha} \chi_{33}^\varepsilon U_0. \quad (25)$$

Введем обозначение

$$C_\partial^\varepsilon = \frac{\pi R^2}{\alpha} \chi_{33}^\varepsilon, \quad (26)$$

и будем называть величину C_∂^ε динамической электрической емкостью колеблющегося пьезокерамического диска. С учетом определе-

ния (26) выражение (25) можно представить в следующем виде:

$$Q = C_\partial^\varepsilon \Xi^{(\varepsilon)}(\omega), \quad (27)$$

где

$$\Xi^{(\varepsilon)}(\omega) = \frac{2e_{31}\alpha}{\chi_{33}^\varepsilon R} u_\rho^{(z)}(R) + \frac{e_{33}}{\chi_{33}^\varepsilon} [u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)] - U_0. \quad (28)$$

Подставляя соотношение (27) в определение (1), получаем выражение для расчета электрического импеданса колеблющегося диска

$$Z_{эл}(\omega) = \frac{U_0}{-i\omega C_\partial^\varepsilon \Xi^{(\varepsilon)}(\omega)}. \quad (29)$$

Выражение (29) справедливо в области высоких частот, когда одновременно существуют и радиальные, и аксиальные смещения

материальных частиц диска, т. е. когда длина упругой волны становится соизмеримой с толщиной диска.

Необходимо особо отметить то, что электрический импеданс диска определяется усредненными значениями компонентов вектора смещения материальных частиц. Это позволяет применить операции усреднения (22) и (24) к уравнениям (5) и (6) соответственно и тем самым преобразовать их в обыч-

новенные дифференциальные уравнения, которые, в принципе, всегда разрешимы с той или иной точностью. Тут же надо сказать, что система дифференциальных уравнений в частных производных (5) и (6) принципиально не разрешима в общем виде.

В области средних и низких частот из-за особенностей электроупругого состояния колеблющегося диска происходит изменение числовых значений динамической электрической емкости и аналитической конструкции $\Xi^{(e)}(\omega)$.

Рассмотрим последовательно электрический импеданс колеблющегося пьезокерамического диска в области низких, средних и высоких частот.

Электрический импеданс пьезокерамического диска в области низких частот. Низкими частотами будем называть тот диапазон частот, в котором длина упругой волны (масштабная единица пространственной неоднородности напряженно-деформированного состояния диска) существенно (на порядок и более) превышает радиальный размер R диска. При этом механические напряжения и упругие деформации практически не изменяются, а в пределе, при $\omega \rightarrow 0$, остаются постоянными в объеме пьезокерамического диска.

Из граничных условий (7) и (8) следует, что нормальные напряжения $\sigma_{\rho\rho}$ и, как следствие, $\sigma_{\varphi\varphi}$, а также σ_{zz} равны нулю как на поверхности, так и в любой точке объема пьезокерамического диска. То же утверждение справедливо и для касательных напряжений $\sigma_{\rho z}$, причем условие $\sigma_{\rho z} = 0 \forall (\rho, z) \in V$ при $E_p = 0$ эквивалентно условию $\varepsilon_{\rho z} = 0 \forall (\rho, z) \in V$. При таких предположениях из обобщенного закона Гука (4) следует система алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} c_{11}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} &= e_{31} E_z, \\ c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} &= e_{31} E_z, \\ c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{33}^E \varepsilon_{zz} &= e_{33} E_z. \end{aligned} \quad (30)$$

При записи системы уравнений (30) одинаковые по величине материальные константы обозначены одинаковыми символами.

Поскольку нормальные и касательные напряжения равны нулю, постольку уравнения (5) и (6) установившихся гармонических колебаний бесконечно малых объемов пьезокерамики выполняются с погрешностью, которая пропорциональна не учитываемой объемной плотности сил инерции.

Решение системы уравнений (30) относительно искомых деформаций сжатия-растяжения $\varepsilon_{\rho\rho}$, $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ и ε_{zz} записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\rho\rho} = \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{e_{31} c_{33}^E - e_{33} c_{12}^E}{\left[c_{33}^E (c_{11}^E + c_{12}^E) - 2(c_{12}^E)^2 \right]} E_z, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{e_{33} (c_{11}^E + c_{12}^E) - 2e_{31} c_{12}^E}{\left[c_{33}^E (c_{11}^E + c_{12}^E) - 2(c_{12}^E)^2 \right]} E_z. \end{aligned} \quad (31)$$

Подставляя соотношения (31) в формулу (20), приходим к заключению, что

$$D_z = \chi_{33}^\sigma E_z = -\chi_{33}^\sigma \frac{U_0}{\alpha}, \quad (32)$$

где χ_{33}^σ – диэлектрическая проницаемость пьезокерамики в режиме постоянства (равенства нулю) механических напряжений в объеме и на поверхности колеблющегося диска. Эта диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле

$$\chi_{33}^\sigma = \chi_{33}^e (1 + \Delta\chi_{33}^\sigma), \quad (33)$$

где

$$\Delta\chi_{33}^\sigma = \frac{2e_{31}^2 c_{33}^E - 4e_{31} e_{33} c_{12}^E + e_{33}^2 (c_{11}^E + c_{12}^E)}{\chi_{33}^e \left[c_{33}^E (c_{11}^E + c_{12}^E) - 2(c_{12}^E)^2 \right]}. \quad (34)$$

При типичных для пьезокерамик ЦТС значениях материальных констант ($c_{11}^E = 110$ ГПа; $c_{12}^E = 60$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²; $e_{31} = -8$ Кл/м² и $\chi_{33}^e = 1400\chi_0$; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума или диэлектрическая постоянная) счет по формуле (34) дает следующий результат: $\Delta\chi_{33}^\sigma = 0,844$, т. е. диэлек-

трическая проницаемость в области низких частот чуть ли не вдвое больше высокочастотной диэлектрической проницаемости χ_{33}^e .

При определении D_z формулой (32) функция $\Xi^{(\sigma)}(\omega) = -U_0$, а динамическая, правильнее сказать – квазистатическая электрическая емкость пьезокерамического диска $C_\theta^\sigma = \pi R^2 \chi_{33}^\sigma / \alpha$. При этом выражение (29)

принимает вид общеизвестной формулы для расчета реактивного сопротивления электрической емкости

$$Z_{эл}(\omega) = \frac{1}{i\omega C_{\sigma}^{\sigma}}.$$

Итак, в области низких частот, когда механические напряжения в пьезокерамическом диске практически равны нулю, а прямой пьезоэлектрический эффект практически не проявляется, электрический импеданс колеблющегося пьезокерамического диска имеет характер реактивного сопротивления конденсатора с электрической емкостью C_{σ}^{σ} .

Выводы. Основные результаты настоящей статьи можно зафиксировать следующим образом:

1. Впервые при достаточно общих начальных предположениях получено выражение для расчета электрического импеданса колеблющегося пьезокерамического диска, которое учитывает радиальный и аксиальный компоненты вектора смещения материальных частиц деформируемой пьезокерамики.

2. Показано, что электрический импеданс определяется усредненными значениями компонентов вектора смещения материальных частиц пьезокерамики. Усредняющее (интегрирующее) действие выполняют электроды, которые полностью покрывают торцевые поверхности диска.

3. Сделано предположение, что с помощью операций усреднения по толщине и по торцевой поверхности диска можно редуцировать систему дифференциальных уравнений динамической теории упругости к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, что дает возможность для выполнения численных оценок компонентов вектора смещения материальных частиц колеблющегося диска.

4. Впервые дана оценка диэлектрической проницаемости χ_{33}^{σ} в области низких частот через материальные константы, которые используются для описания высокочастотного напряженно-деформированного состояния пьезокерамики.

Список литературы

1. Харкевич А. А. Избранные труды : в 3 т. / А. А. Харкевич. – М. : Наука, 1973. – Т. 1. – 400 с.
2. Акустические кристаллы : справочник / [Блистанов А. А., Бондаренко В. С., Чкало-

- ва В. В. и др.] ; под ред. М. П. Шаскольской. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
3. Пьезокерамические преобразователи : справочник / [В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша и др.]. – Л. : Судостроение, 1984. – 256 с.
4. Лямов В. Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах / В. Е. Лямов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 223 с.
5. Богданов С. В. Определение упругих и пьезокерамических постоянных ромбических кристаллов акустическим методом / С. В. Богданов // Акустический журнал. – 1997. – Т. 43, № 3. – С. 304.
6. Богданов С. В. Акустический метод определения упругих и пьезоэлектрических постоянных кристаллов 6 mm- и 4 mm-классов / С. В. Богданов // Акустический журнал. – 2000. – Т. 46, № 5. – С. 609.
7. Шульга Н. А. Колебания пьезоэлектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев. – К. : Наукова думка, 1990. – 228 с.
8. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практические применения / У. Кэди. – М. : ИЛ, 1949. – 718 с.
9. Гринченко В. Т. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга. – К. : Наукова думка, 1989. – 280 с.
10. Дидковский В. С. К вопросу об определении физико-механических констант пьезокерамических материалов / В. С. Дидковский, О. Н. Петрищев, А. Н. Шаблатович // Электроника и связь. – 2004. – № 22. – С. 76–87.
11. Партон В. З. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел / В. З. Партон, Б. А. Кудрявцев. – М. : Наука, 1988. – 472 с.
12. Петрищев О. Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Ч. 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса-антирезонанса / О. Н. Петрищев. – К. : Аверс, 2012. – 300 с.
13. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 873 с.
14. Новацкий В. Электромагнитные эффекты в твердых телах / В. Новацкий. – М. : Мир, 1986. – 160 с.
15. Петрищев О. Н. Принципы и методы расчета передаточных характеристик дисковых

- пьезоэлектрических трансформаторов. Ч. 1. Принципы математического моделирования трансформаторов, работающих на планарных осесимметричных колебаниях пьезокерамических дисков / О. Н. Петрищев, К. В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 3. – С. 10–20.
16. Петрищев О. Н. Принципы и методы расчета передаточных характеристик дисковых пьезоэлектрических трансформаторов. Ч. 2. Методика расчета параметров и характеристик простейшего дискового пьезоэлектрического трансформатора / О. Н. Петрищев, К. В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 4. – С. 10–23.
- ### References
1. Kharkevich, A. A. (1973) Selected works in three volumes. Vol. 1. Moscow: Nauka, 400 p. [in Russian].
 2. Blistanov, A. A., Bondarenko, V. S., Chkalova, V. V. et al. (1982) Acoustic crystals. Moscow: Nauka, 632 p. [in Russian].
 3. Ganopol'skiy, V. V., Kasatkin, B. A., Legusha, F. F. et al. (1984) Piezoceramic transducers. Leningrad: Sudostroenie, 256 p. [in Russian].
 4. Lyamov, V. E. (1983) Polarization effects and anisotropy of acoustic waves' interaction in crystals. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 223 p. [in Russian].
 5. Bogdanov, S. V. (1997) Determination of elastic and piezoceramic constants of rhombic crystals by acoustic method. *Akusticheskiy zhurnal*, Vol. 43, No. 3, p. 304 [in Russian].
 6. Bogdanov, S. V. (2000) Acoustic method of elastic and piezoelectric constants definition of 6mm- and 4 mm-classes crystals. *Akusticheskiy zhurnal*, Vol. 46, No. 5, p. 609 [in Russian].
 7. Shul'ga, N. A. and Bolkisev, A. M. (1990) Fluctuations of piezoelectric solids. Kiev: Naukova dumka, 228 p. [in Russian].
 8. Cady, W. (1949) Piezoelectricity and its practical applications. Moscow: IL, 718 p. [in Russian].
 9. Grinchenko, V. T., Ulitko, A. F. and Shul'ga, N. A. (1989) Mechanics of related fields in structural elements. Vol. 5. Electroelasticity. Kiev: Naukova dumka, 280 p. [in Russian].
 10. Didkovskiy, V. S., Petrishchev, O. N., Shablantovich, A. N. (2004) On the definition of physical and mechanical constants of piezoceramic materials. *Elektronika i svyaz*, No. 22, pp. 76–87 [in Russian].
 11. Parton, V. Z. and Kudryavtsev, B. A. (1988) Electromagnetoelasticity of piezoelectric and electroconductive solids. Moscow: Nauka, 472 p. [in Russian].
 12. Petrishchev, O. N. (2012). Harmonic oscillations of piezoceramic elements. Part 1. Harmonic vibrations of piezoceramic elements in vacuum and a method of resonance – antiresonance. Kiev: Avers, 300 p. [in Russian].
 13. Novatskiy, V. (1975) Theory of elasticity. Moscow: Mir, 873 p. [in Russian].
 14. Novatskiy, V. (1986) Electromagnetic effects in solids. Moscow: Mir, 160 p. [in Russian].
 15. Petrishchev, O. N. and Bazilo, C. V. (2015) Principles and methods of the calculation of transfer characteristics of disk piezoelectric transformers. Part 1. Principles of mathematical modeling of transformers that operate on planar axisymmetric vibrations of piezoceramic disks. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 3, pp. 10–20 [in Russian].
 16. Petrishchev, O. N. and Bazilo, C. V. (2015) Principles and methods of the calculation of transfer characteristics of disk piezoelectric transformers. Part 2. The procedure of calculation of parameters and characteristics of the simplest disk piezoelectric transformer. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 4, pp. 10–23 [in Russian].

O. N. Petrishchev¹, *Dr.Tech.Sc., professor,*

C. V. Bazilo², *Ph.D. (Eng.), associate professor*

¹National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

²Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DETERMINATION OF ELECTRICAL IMPEDANCE OF PIEZOCERAMIC DISK AND ITS CALCULATION IN LOW-FREQUENCY REGION

The final goal of mathematical modeling of physical condition of vibrating piezoelectric elements is a qualitative and quantitative description of characteristics and parameters of existing electrical and elastic fields. It is clear that to obtain meaningful and reliable quantitative estimates of physical condition parameters of piezoelectric (piezoceramic) element is not possible without reliable data on the values of physical and mechanical constants of the materials.

Thus, it is necessary to build noncontradictory method of material constants experimental determination of piezoelectric ceramics, which delivers reliable values of at least three modules of elasticity, two elements of the matrix of piezoelectric coefficients and one element of the matrix of dielectric constants, which is the purpose of the work.

The main results of this paper can be written as follows:

– at sufficiently general initial assumptions a mathematical description of electrical impedance of oscillating thin piezoceramic disk with end surfaces continuous covering by electrodes in vacuum is obtained;

– it has been shown that electrical impedance of the disk is determined by average values of axial and radial components of material particles displacement vector of deformed piezoceramics;

– the evaluation of electrical impedance of piezoceramic disk at low frequencies is completed, when persistence mode (equal to zero) of mechanical stresses in an oscillating disk volume is realized.

Keywords: *thin disk, piezoelectric ceramics, electrical impedance, radial and axial components of vector of piezoceramic material particles displacement.*

Статтю представляє д.т.н., професор О. М. Петрищев, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

О. Н. Петрищев¹, д.т.н., профессор,
К. В. Базило², к.т.н., доцент

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

²Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченко, 460, Черкасы, 18006, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ДИСКА И ЕГО РАСЧЕТ В ОБЛАСТИ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

При достаточно общих начальных предположениях получено математическое описание электрического импеданса колеблющегося в вакууме пьезокерамического тонкого диска со сплошным электродированием торцевых поверхностей. Построено выражение для расчета электрического импеданса колеблющегося пьезокерамического диска в области средних частот, где вектор смещения материальных частиц диска практически полностью определяется радиальным компонентом. С помощью метода усреднения решена система дифференциальных уравнений в частных производных и на этом основании построена математическая модель электрического импеданса пьезокерамического диска в области высоких частот, где вектор смещения материальных частиц определяется радиальным и аксиальным компонентами.

Ключевые слова: тонкий диск, пьезокерамика, электрический импеданс, радиальный и аксиальный компоненты вектора смещения материальных частиц пьезокерамики.

Введение. Конечной целью математического моделирования физического состояния колеблющихся пьезокерамических элементов является качественное и количественное описание характеристик и параметров существующих в них электрических и упругих полей. Совершенно ясно, что получение содержательных и достоверных количественных оценок параметров физического состояния пьезоэлектрических (пьезокерамических) элементов не представляется возможным без достоверных данных о величинах физикомеханических констант материалов.

Таким образом, необходимо построить непротиворечивую методику экспериментального определения материальных констант пьезокерамики, которая доставляет достоверные значения минимум трех модулей упругости, двух элементов матрицы пьезомодулей и одного элемента матрицы диэлектрических проницаемостей, что и является **целью** работы.

Электрический импеданс пьезокерамического диска в области средних частот. Средними частотами будем называть частотный диапазон, в котором масштабная единица пространственной неоднородности напряженно-деформированного состояния (длина упругой волны) становится соизмеримой с радиусом пьезокерамического диска. Для тонких дисков, когда отношение $\alpha/R \ll 1$, из приве-

денной выше формулировки следует, что напряженно-деформированное состояние практически не изменяется по толщине диска. Из граничных условий (7) в работе [1] следует, что $\sigma_{\rho z} = \sigma_{zz} = 0 \forall (\rho, z) \in V$. Равенство $\sigma_{\rho z} = 0$ при $E_\rho = 0$ означает, что $\varepsilon_{\rho z} = \varepsilon_{z\rho} = 0 \forall (\rho, z) \in V$.

При сделанных предположениях обобщенный закон Гука (выражение (4) в работе [1]) доставляет следующие соотношения:

$$\sigma_{\rho\rho} = c_{11}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} - e_{31}^E E_z, \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} - e_{31}^E E_z, \quad (2)$$

$$0 = c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{33}^E \varepsilon_{zz} - e_{33}^E E_z. \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{c_{12}^E}{c_{33}^E} (\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + \frac{e_{33}^E}{c_{33}^E} E_z. \quad (4)$$

Подстановка выражения (4) в формулы (1) и (2) приводит к следующим результатам:

$$\sigma_{\rho\rho} = c_{11}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} - e_{31}^* E_z, \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} - e_{31}^* E_z, \quad (6)$$

где $c_{11} = c_{11}^E - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$; $c_{12} = c_{12}^E - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$; $e_{31}^* = e_{31}^E - e_{33}^E / c_{33}^E$ – материальные константы для режима планарных колебаний, т. е. для режима деформирования, когда $\sigma_{zz} = 0$.

Компонент вектора электрической индукции $D_z = e_{31}(\varepsilon_{pp} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + e_{33}\varepsilon_{zz} + \chi_{33}^E E_z$ после исключения деформации ε_{zz} определяется следующим выражением:

$$D_z = \frac{e_{31}^*}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_p^{(z)}(\rho)] - \chi_{33}^* \frac{U_0}{\alpha}, \quad (7)$$

где $\chi_{33}^* = \chi_{33}^E (1 + \Delta\chi_{33}^*)$ – диэлектрическая проницаемость для режима планарных колебаний. Добавка $\Delta\chi_{33}^* = e_{33}^2 / (\chi_{33}^E c_{33}^E)$ при типичных для пьезокерамических ЦТС значениях материальных констант ($c_{11}^E = 110$ ГПа; $c_{12}^E = 60$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²; $e_{31} = -8$ Кл/м² и $\chi_{33}^E = 1400\chi_0$; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума или диэлектрическая постоянная) не превышает 0,262.

При определении компонента D_z выражением (7) формула для расчета электрического импеданса колеблющегося диска записывается в следующем виде:

$$Z_{эл}(\omega) = - \frac{U_0}{i\omega C_{\partial}^* \Xi^{(*)}(\omega)}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma_{pp}^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} [\sigma_{pp}^{(z)}(\rho) - \sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho)] + \rho_0 \omega^2 u_p^{(z)}(\rho) = 0. \quad (10)$$

Нормальные напряжения $\sigma_{pp}^{(z)}(\rho)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho)$ определяются из соотношений (5) и (6):

$$\sigma_{pp}^{(z)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} \sigma_{pp}(\rho) dz = c_{11} \frac{\partial u_p^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12} \frac{u_p^{(z)}(\rho)}{\rho} - e_{31}^* E_z^{(z)}(\rho), \quad (11)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} \sigma_{\varphi\varphi}(\rho) dz = c_{12} \frac{\partial u_p^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{11} \frac{u_p^{(z)}(\rho)}{\rho} - e_{31}^* E_z^{(z)}(\rho). \quad (12)$$

Так как

$$D_z(\rho) = \frac{e_{31}^*}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_p^{(z)}(\rho)] + \chi_{33}^* E_z^{(z)}(\rho), \quad (13)$$

то из сравнения двух физически эквивалентных определений (7) и (13) аксиального компонента вектора электрической индукции следует, что

$$E_z^{(z)}(\rho) = -U_0/\alpha. \quad (14)$$

Подставляя соотношения (11) и (12) в обыкновенное дифференциальное уравнение (10), получаем стандартное уравнение для функций Бесселя

$$\rho^2 \frac{\partial^2 u_p^{(z)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \rho \frac{\partial u_p^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + [(\lambda\rho)^2 - 1] u_p^{(z)}(\rho) = 0,$$

решение которого, очевидно, имеет следующий вид:

где $C_{\partial}^* = \pi R^2 \chi_{33}^* / \alpha$ – динамическая электрическая емкость пьезокерамического диска для режима планарных колебаний, т. е. электрическая емкость в области средних частот. Функция $\Xi^{(*)}(\omega)$ рассчитывается по формуле

$$\Xi^{(*)}(\omega) = \frac{2e_{31}^* \alpha}{\chi_{33}^* R} u_p^{(z)}(R) - U_0. \quad (9)$$

Для определения усредненного по толщине диска радиального компонента вектора смещения материальных частиц диска на средних частотах подвергнем операции усреднения (см. выражение (22) в работе [1]) уравнение установившихся радиальных колебаний (см. выражение (5) в работе [1]). Принимая во внимание, что

$$\frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} \frac{\partial \sigma_{pz}}{\partial z} dz = \frac{1}{\alpha} [\sigma_{pz}(\rho, \alpha) - \sigma_{pz}(\rho, 0)] = 0,$$

результат усреднения можно представить следующим выражением:

$$u_p^{(z)}(\rho) = A J_1(\lambda\rho), \quad (15)$$

где A – подлежащая определению константа; $J_1(\lambda\rho)$ – функция Бесселя первого порядка; $\lambda = \omega / \sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – волновое число радиальных колебаний пьезокерамического диска.

Константа A определяется из граничного условия $\sigma_{pp}^{(z)}(R) = 0$ (условие $\sigma_{pz}(R) = 0$ выполняется автоматически) следующим образом:

$$A = - \frac{e_{31}^* U_0}{\alpha c_{11}} \frac{R}{[\lambda R J_0(\lambda R) - (1 - k) J_1(\lambda R)]},$$

где $J_0(\lambda R)$ – функция Бесселя нулевого порядка; $k = c_{12}/c_{11}$ – число, меньшее единицы.

Подставляя значение константы A в формулу (15), а полученный результат – в соотношение (9), получаем возможность записать выражение (8) в следующем виде:

$$Z_{эл}(\omega) = \frac{1}{i\omega C_{\partial}^*} F^{(*)}(\omega), \quad (16)$$

где

$$F^{(*)}(\omega) = \frac{\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k) J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k - 2K_{31}^2) J_1(\lambda R)}; \quad (17)$$

$K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (c_{11}\chi_{33}^*)$ – квадрат коэффициента электромеханической связи пьезокерамики в режиме радиальных колебаний диска, поляризованного по толщине.

Функция $F^{(*)}(\omega)$, заданная выражением (17), имеет ряд характерных точек на оси частот ω . На частоте ω_m , которая соответствует m -му по номеру корню уравнения

$$x J_0(x) - (1-k) J_1(x) = 0, \quad (18)$$

функция $F^{(*)}(\omega_m) = 0$. На частоте ω_m частота смены знака сил Кулона, которые деформируют пьезокерамический диск, совпадает с m -й по номеру собственной частотой радиальных осесимметричных колебаний круглого диска, и происходит резонансное потребление энергии источника упругих колебаний. Поскольку идеальный источник гармонически изменяющейся во времени разности электрических потенциалов обладает бесконечным запасом энергии, постольку на частотах радиальных электромеханических резонансов амплитудные значения радиального компонента $u_p^{(z)}(\rho)$ вектора смещения материальных частиц диска неограниченно возрастают. Сообразно этому возрастают амплитудные значения компонентов тензора деформаций и, как следствие, неограниченно возрастают амплитудные значения электрического заряда на поверхности $z = \alpha$. Последнее является причиной неограниченного роста амплитудных значений переменного тока в проводниках, которые подключены к электродированным поверхностям диска. Бесконечные токи на выходе идеального генератора электрического напряжения возникают в результате короткого замыкания, т. е. когда нагрузочное сопротивление $Z_{эл}(\omega_m) = 0$.

В табл. 1 приведены числовые значения первых двух корней (x_1 и x_2) корней уравнения (18) и их отношения $\xi_{21} = x_2/x_1$ в зави-

симости от значений параметра k . Необходимо подчеркнуть, что отношение ξ_{21} в точности равно отношению $\omega_{21} = \omega_{r2}/\omega_{r1}$, т. е. круговых частот второго и первого радиальных электромеханических резонансов, которое легко и точно определяется экспериментально. Необходимо обратить внимание еще и на то, что числовые значения корней уравнения (18) изменяются достаточно мало по сравнению с изменением параметра k . Это необходимо учитывать при выполнении измерений, которые следует выполнять со всей возможной тщательностью.

Таблица 1

Первые два корня уравнения

$$x J_0(x) - (1-k) J_1(x) = 0$$

k	x_1	x_2	ξ_{21}
0,00	1,841184	5,331443	2,895660
0,05	1,878980	5,341153	2,842582
0,10	1,915393	5,350843	2,793601
0,15	1,950511	5,360511	2,748259
0,20	1,984414	5,370155	2,706167
0,25	2,017172	5,379773	2,666988
0,30	2,048850	5,389364	2,630434
0,35	2,079508	5,398928	2,596253
0,40	2,109198	5,408462	2,564226
0,45	2,137971	5,417963	2,534162
0,50	2,165871	5,427433	2,505889
0,55	2,192942	5,436869	2,479259
0,60	2,219221	5,446270	2,454137
0,65	2,244744	5,455635	2,430404
0,70	2,269547	5,464962	2,407953
0,75	2,293658	5,474251	2,386690
0,80	2,317109	5,483500	2,366527
0,85	2,339926	5,492708	2,347385
0,90	2,362135	5,501874	2,329195
0,95	2,383761	5,510998	2,311892
1,00	2,404826	5,520078	2,295417

Вслед за частотами ω_m радиальных резонансов следуют частоты, на которых обращается в нуль знаменатель выражения (17). На этих частотах функция $F^{(*)}(\omega)$ неограниченно возрастает. Сообразно этому неограниченно возрастает электрический импеданс $Z_{эл}(\omega)$ пьезокерамического диска. Это происходит из-за того, что поляризационные заряды полностью компенсируют электрический заряд, который формирует на электродированных поверхностях диска генератор электрических сигналов. Результирующий заряд Q обращается в нуль, и электрический ток в проводниках исчезает. Это соответствует разомкнутой элек-

трической цепи или электрической цепи, в которую включено бесконечно большое сопротивление. При этом пьезокерамический диск, естественно, не потребляет энергии от источника колебаний, т. е. от генератора. Чтобы подчеркнуть специфику и отличие этого состояния от состояния на частотах электромеханического резонанса, частоты $\omega_{ам}$, на которых $Z_{эл}(\omega_{ам}) \rightarrow \infty$, называют частотами электромеханического антирезонанса.

В реальном эксперименте нули и бесконечности отсутствуют, поскольку в реальных упругих материалах всегда существуют потери на вязкое трение. Эти потери можно учесть с помощью параметра Q_m , который имеет смысл механической добротности материала. Как известно, добротностью называется безразмерное число, величина которого обратно пропорциональна потерям энергии в колебательной системе за период. В идеальных упругих телах, где потери энергии на вязкое трение отсутствуют, $Q_m \rightarrow \infty$. В реальных объектах добротность Q_m имеет конечное значение. При этом модули упругости $c_{\beta\lambda}^E(Q_m)$ записываются следующим образом [2]:

$$c_{\beta\lambda}^E(Q_m) = c_{\beta\lambda}^E (1 + i/Q_m), \quad (19)$$

где $c_{\beta\lambda}^E$ – статический модуль упругости; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

На рис. 1 показаны модули радиальных смещений $u_p^{(z)}(\rho)$ в пьезокерамическом диске радиусом $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Параметры материала диска (пьезокерамики): $c_{11}^E = 110$ ГПа; $c_{12}^E = 60$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²; $e_{31} = -8$ Кл/м² и $\chi_{33}^E = 1400\chi_0$; $Q_m = 100$; $k = c_{12}/c_{11} = 0,324$. Расчеты были выполнены на частотах первых трех электромеханических резонансов. Номер резонансной частоты проставлен в поле рисунка возле соответствующей кривой. Для указанного выше значения параметра k резонансным частотам соответствуют следующие значения корней уравнения (18): $x_1 = 2,063690$; $x_2 = 5,393958$ и $x_3 = 8,574693$. Разность электрических потенциалов $U_0 = 1$ В. По оси абсцисс на рис. 1 отложены значения безразмерной радиальной координаты ρ/R .

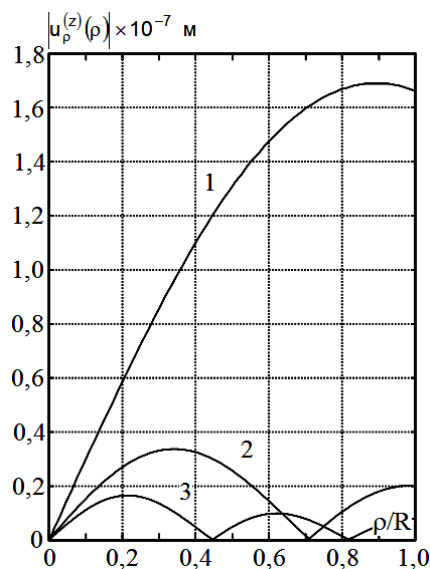


Рис. 1. Радиальные смещения материальных частиц пьезокерамического диска на частотах первых трех электромеханических резонансов

Обращает на себя внимание чрезвычайно быстрое уменьшения уровней радиальных смещений по мере роста номера электромеханического резонанса.

Этот факт дополнительно иллюстрируется рис. 2, где показано изменение модуля радиального смещения $u_p^{(z)}(R)$ боковой поверхности $\rho = R$ пьезокерамического диска в широком диапазоне частот. Вычисления проводились при указанном выше наборе геометрических и физико-механических параметров колеблющегося диска. Цифрами в поле рисунка указаны номера электромеханических резонансов. По оси абсцисс на рис. 2 отложено безразмерное волновое число $x = \lambda R$. Из представленных на рис. 2 результатов вычислений следует, что на частотах в окрестности первого толщинного резонанса (это примерно соответствует значениям $\lambda R \approx 40 \div 60$) радиальные смещения материальных частиц диска, рассчитанные в предположении, что $\sigma_{zz} = 0$, перестают существовать.

На рис. 3 показано изменение модуля электрического импеданса пьезокерамического диска в диапазоне средних частот (рис. 3, а). На врезке в поле рис. 3, а показано изменение значений модуля $Z_{эл}(\omega)$ в ближайшей окрестности частоты ω_{r1} первого электромеханического резонанса. На рис. 3, б показано изменение модуля электрического импеданса в окрестности частоты ω_{a1} первого электромеханического антирезонанса.

ханического антирезонанса. Геометрические и физико-механические параметры диска, которые использовались при вычислениях по формуле (16), указаны в комментариях к рис. 2.

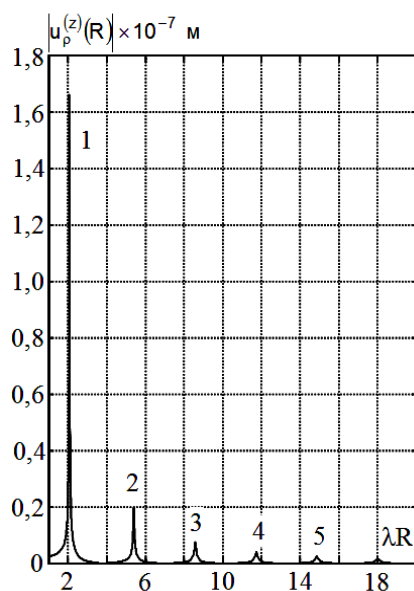


Рис. 2. Радиальные смещения боковой поверхности пьезокерамического диска в широком диапазоне частот

Как следует из формулы (19), выражения (16) и (17) являются функциями малого параметра $\varepsilon = 1/Q_m$. Раскладывая функцию $Z_{эл}(\omega)$ в степенной ряд по малому параметру ε и ограничивая разложение первой степенью этого параметра, получаем следующую оценку механической добротности пьезокерамики:

$$Q_m = \frac{R[(x_m^2 + k - 1)J_1(x_m) - kJ_0(x_m)]}{4x_m v C_\delta^*(0) K_{31}^2 J_1(x_m) Z_{эл}(x_m)}, \quad (20)$$

где x_m – m -й корень уравнения (18); $v = \sqrt{\text{Re} c_{11}/\rho_0}$ – скорость распространения радиальных колебаний в пьезокерамике, определенная без учета потерь на вязкое трение; $C_\delta^*(0)$ – динамическая электрическая емкость колеблющегося диска, определенная через диэлектрическую проницаемость $\text{Re} \chi_{33}^*$, в которой не учитываются потери на вязкое трение; $Z_{эл}(x_m)$ – электрический импеданс диска на частоте m -го электромеханического резонанса. Следует подчеркнуть, что $Z_{эл}(x_m)$ является действительной величиной. Из показанной на рис. 3, а врезки можно определить $Z_{эл}(x_1) = 7,8 \text{ Ом}$. Подстановка этой величины

в формулу (20) дает значение $Q_m = 100,096$. В расчет было заложено значение $Q_m = 100$, т. е. полученная оценка находится в хорошем согласии с истинным значением механической добротности.

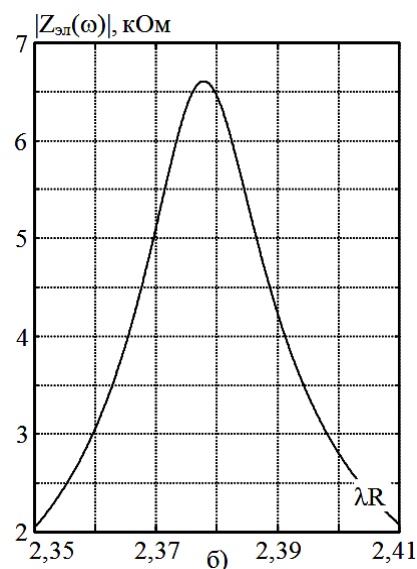
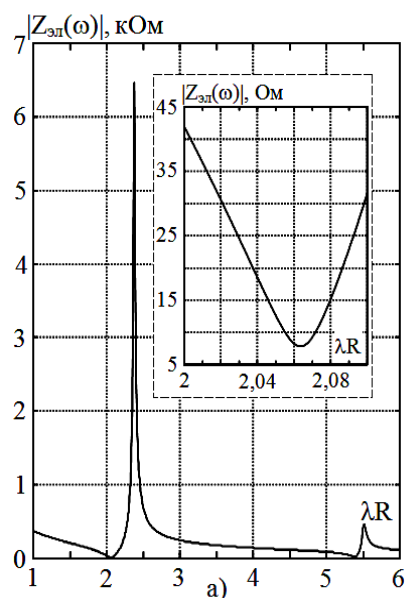


Рис. 3. Модуль электрического импеданса диска в области средних частот

В некоторых работах предпринимаются попытки определения механической добротности как отношения $\omega_{a1}/\Delta\omega_{0,707}$, где ω_{a1} – круговая частота первого электромеханического антирезонанса; $\Delta\omega_{0,707}$ – полоса частот на уровне -3 дБ от значения модуля $Z_{эл}(\omega_{a1})$, т. е. максимального значения электрического импеданса на частоте первого антирезонанса.

Выполняя эти расчеты с помощью графика, который показан на рис. 3, б, получаем значение $Q_m = 153,3$, которое существенно отличается от заложенной в расчет величины $Q_m = 100$. Причина такого положения вещей заключается в том, что электромеханический антирезонанс формируется за счет взаимодействия (взаимной компенсации) электрического заряда, который наводится на электродированной поверхности диска генератором разности электрических потенциалов, и поляризованного заряда, который образуется в результате деформирования пьезоэлектрика. Говоря иными словами, потери на вязкое трение не являются, в отличие от электромеханического резонанса, единственным фактором, который определяет величину электрического импеданса.

На рис. 4 показано частотно зависимое изменение модуля безразмерной функции $F^{(*)}(\omega)$, которая определена выражением (17). Расчет был выполнен для того же набора геометрических и физико-механических параметров, который использовался при вычислениях, результаты которых показаны на рис. 2 и рис. 3. На врезке в поле рис. 4 показано изменение модуля функции $F^{(*)}(\omega)$ в диапазоне безразмерных волновых чисел $3 \leq \lambda R \leq 5$ или, что то же самое, безразмерных частот $3 \leq \omega \tau_0 \leq 5$ ($\tau_0 = R/v$), где $|F^{(*)}(\omega)| \approx 1$. При значениях $\lambda^* R = \omega^* \tau_0 = 3,83$ модуль функции $F^{(*)}(\omega)$ равен единице и электрический импеданс $|Z_{эл}(\omega^*)| = 1/\omega^* |C_\phi^*|$. Зная значение $|Z_{эл}(\omega^*)|$, можно определить модуль динамической электрической емкости в режиме планарных колебаний пьезокерамического диска, и, как следствие, получить оценку модуля диэлектрической проницаемости χ_{33}^* . Поскольку во время выполнения измерений значение частоты ω^* , на которой $|F^{(*)}(\omega^*)| = 1$, а priori неизвестно, постольку ее значение, в первом приближении, можно оценить следующим образом: $\omega^* \equiv (\omega_r + \omega_a)/2$, где $\omega_r = (\omega_{r1} + \omega_{r2})/2$ и $\omega_a = (\omega_{a1} + \omega_{a2})/2$.

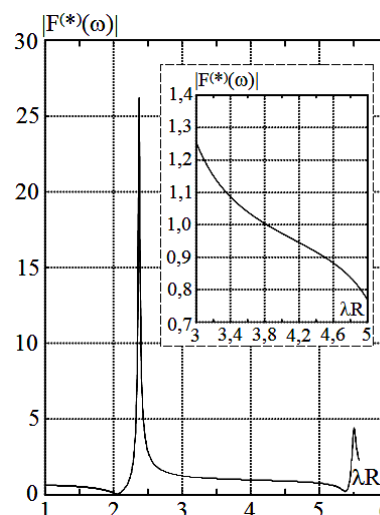


Рис. 4. Частотно зависимое изменение модуля функции $F^{(*)}(\omega)$

Электрический импеданс пьезокерамического диска в области высоких частот. В области высоких частот, когда длина упругой волны становится соизмеримой с толщиной диска, вектор смещения материальных частиц обладает и радиальным, и аксиальным компонентами. Электрический импеданс колеблющегося пьезокерамического диска определен в работе [1] формулой (29).

Усредненный по толщине диска радиальный компонент $u_r^{(z)}(\rho)$ вектора смещения материальных частиц диска должен удовлетворять уравнению (10). Усредненный по площади электродированной поверхности аксиальный компонент $u_z^{(p)}(z)$ должен удовлетворять уравнению

$$\frac{\partial \sigma_z^{(p)}(z)}{\partial z} + \rho_0 \omega^2 u_z^{(p)}(z) = 0, \quad (21)$$

которое получается из уравнения установившихся аксиальных колебаний (см. выражение (6) в работе [1]) после применения к нему процедуры усреднения (см. формулу (24) в работе [1]). Символом $\sigma_z^{(p)}(z)$ в соотношении (21) обозначено нормальное напряжение $\sigma_{zz}(\rho, z)$, усредненное по площади электродированной поверхности диска, т. е.

$$\sigma_z^{(p)}(z) = \frac{2}{R^2} \int_0^R \rho \sigma_{zz}(\rho, z) \rho d\rho. \quad (22)$$

Нормальные напряжения $\sigma_{\rho\rho}^{(z)}(\rho)$, $\sigma_{\phi\phi}^{(z)}(\rho)$ и $\sigma_z^{(p)}(z)$ получаются путем соответствующего усреднения следующих выражений:

$$\sigma_{\rho\rho}(\rho, z) = c_{11}^E \frac{\partial u_{\rho}(\rho, z)}{\partial \rho} + c_{12}^E \frac{u_{\rho}(\rho, z)}{\rho} + c_{12}^E \frac{\partial u_z(\rho, z)}{\partial z} - e_{31} E_z(\rho, z), \quad (23)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}(\rho, z) = c_{12}^E \frac{\partial u_{\rho}(\rho, z)}{\partial \rho} + c_{11}^E \frac{u_{\rho}(\rho, z)}{\rho} + c_{12}^E \frac{\partial u_z(\rho, z)}{\partial z} - e_{31} E_z(\rho, z), \quad (24)$$

$$\sigma_{zz}(\rho, z) = c_{12}^E \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_{\rho}(\rho, z)] + c_{33}^E \frac{\partial u_z(\rho, z)}{\partial z} - e_{33} E_z(\rho, z). \quad (25)$$

Аксиальный компонент $D_z(\rho)$ вектора электрической индукции записывается следующим образом:

$$D_z(\rho) = e_{31} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_{\rho}(\rho, z)] + e_{33} \frac{\partial u_z(\rho, z)}{\partial z} + \chi_{33}^E E_z(\rho, z). \quad (26)$$

Из условия $\partial D_z(\rho)/\partial z = 0$ следует физически эквивалентное выражению (26) представление компонента $D_z(\rho)$

$$D_z(\rho) = e_{31} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_{\rho}^{(z)}(\rho)] + \frac{e_{33}}{\alpha} [u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0)] - \chi_{33}^E \frac{U_0}{\alpha}. \quad (27)$$

Вычитая из выражения (26) соотношение (27), получаем следующий результат:

$$\begin{aligned} & \frac{e_{31}}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \rho [u_{\rho}(\rho, z) - u_{\rho}^{(z)}(\rho)] \right\} + e_{33} \left\{ \frac{\partial u_z(\rho, z)}{\partial z} - \frac{1}{\alpha} [u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0)] \right\} + \\ & + \chi_{33}^E \left[E_z(\rho, z) + \frac{U_0}{\alpha} \right] = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Усредняя выражение (28) по толщине диска, получаем

$$E_z^{(z)}(\rho) = -U_0/\alpha. \quad (29)$$

Подвергая выражение (28) процедуре усреднения (22), приходим к выводу, что в

$$E_z^{(p)}(z) = -\frac{U_0}{\alpha} - \frac{e_{33}}{\chi_{33}^E} \left\{ \frac{\partial u_z^{(p)}(z)}{\partial z} - \frac{1}{\alpha} [u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)] \right\}. \quad (30)$$

Усредняя выражения (23) и (24) по толщине диска, и принимая во внимание определение (29), получаем

$$\sigma_{\rho\rho}^{(z)}(\rho) = c_{11}^E \frac{\partial u_{\rho}^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12}^E \frac{u_{\rho}^{(z)}(\rho)}{\rho} + \frac{c_{12}^E}{\alpha} [u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0)] + \frac{e_{31}}{\alpha} U_0. \quad (31)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho) = c_{12}^E \frac{\partial u_{\rho}^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{11}^E \frac{u_{\rho}^{(z)}(\rho)}{\rho} + \frac{c_{12}^E}{\alpha} [u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0)] + \frac{e_{31}}{\alpha} U_0. \quad (32)$$

Для тонкого диска справедлива оценка: $u_z(\rho, \alpha) - u_z(\rho, 0) \cong u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)$. С учетом этого факта подстановка соотношений (31) и (32) в уравнение (10) приводит к следующему результату:

$$\rho^2 \frac{\partial^2 u_{\rho}^{(z)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \rho \frac{\partial u_{\rho}^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + \left[(\lambda^E R)^2 - 1 \right] u_{\rho}^{(z)}(\rho) = 0. \quad (33)$$

где $\lambda^E = \omega / \sqrt{c_{11}^E / \rho_0}$ – волновое число радиальных колебаний пьезокерамического диска в области высоких частот, когда $\sigma_{zz}(\rho, z) \neq 0$. Решение уравнения (33) очевидно:

$$u_{\rho}^{(z)}(\rho) = C J_1(\lambda^E \rho), \quad (34)$$

где C – подлежащая определению частотно-зависимая константа.

Подвергая операции усреднения (22) соотношение (25) и полагая при этом, что для тонкого диска справедлива оценка

$$\sigma_{zz}^{(p)}(z) \equiv \frac{2c_{12}^E}{R} u_p^{(z)}(R) + c_{33}^D \frac{\partial u_z^{(p)}(z)}{\partial z} - \frac{e_{33}^2}{\chi_{33}^E \alpha} [u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)] + \frac{e_{33}}{\alpha} U_0, \quad (35)$$

где $c_{33}^D = c_{33}^E (1 + K_{33}^2)$; $K_{33}^2 = e_{33}^2 / (\chi_{33}^E c_{33}^E)$ – квадрат коэффициента электромеханической связи для режима толщинных колебаний поларизованной по толщине пьезокерамической пластинки.

Подставляя выражение (35) в уравнение (21), приводим его к следующему виду:

$$\frac{\partial^2 u_z^{(p)}(z)}{\partial z^2} + \gamma^2 u_z^{(p)}(z) = 0, \quad (36)$$

$$\sigma_{pp}^{(z)}(R) \equiv \left[c_{11}^E \frac{\partial u_p^{(z)}(R)}{\partial \rho} + c_{12}^E \frac{u_p^{(z)}(R)}{\rho} \right]_{\rho=R}$$

$$\sigma_{zz}^{(p)}(z) \Big|_{z=\alpha;0} = 0, \quad (39)$$

где нормальное напряжение $\sigma_{zz}^{(p)}(z)$ определено соотношением (35).

Подстановка решений (34) и (37) в условия (38) и (39) приводит к следующей системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} Am_{11} + Bm_{12} + Cm_{13} &= -\frac{e_{31}U_0}{c_{12}^E} p_1; \\ Am_{21} + Bm_{22} + Cm_{23} &= -\frac{e_{31}U_0}{c_{12}^E} p_2; \\ Am_{31} + Bm_{32} + Cm_{33} &= -\frac{e_{31}U_0}{c_{12}^E} p_3, \end{aligned} \quad (40)$$

где

$$\begin{aligned} m_{11} &= -\frac{1 - \cos \gamma \alpha}{\gamma \alpha}; \quad m_{12} = \frac{\sin \gamma \alpha}{\gamma \alpha}; \\ m_{13} &= \xi_1 \left[J_0(\xi_3 \gamma \alpha) - \frac{1 - K^E}{\xi_3 \gamma \alpha} J_1(\xi_3 \gamma \alpha) \right]; \\ \xi_1 &= \frac{\sqrt{c_{11}^E c_{33}^D}}{c_{12}^E}; \quad \xi_3 = \frac{R}{\alpha} \sqrt{\frac{c_{33}^D}{c_{11}^E}}; \\ p_1 &= 1; \quad m_{21} = \frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{(1 - \cos \gamma \alpha)}{\gamma \alpha} - \sin \gamma \alpha; \\ m_{22} &= -\frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{\sin \gamma \alpha}{\gamma \alpha} + \cos \gamma \alpha; \\ m_{23} &= \frac{2c_{12}^E \alpha}{c_{33}^D R} \frac{J_1(\xi_3 \gamma \alpha)}{\gamma \alpha}; \end{aligned}$$

$u_p(R, z) \equiv u_p^{(z)}(R)$, получаем следующий результат:

где $\gamma = \omega / \sqrt{c_{33}^D / \rho_0}$ – волновое число аксиальных (толщинных) колебаний пьезокерамического диска. Решение уравнения (36) очевидно:

$$u_z^{(p)}(z) = A \cos \gamma z + B \sin \gamma z, \quad (37)$$

где A и B – подлежащие определению частотно зависимые константы.

Константы A , B и C определяются из граничных условий

$$+ \frac{c_{12}^E}{\alpha} [u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)] + \frac{e_{31}}{\alpha} U_0 = 0, \quad (38)$$

$$p_2 = \frac{e_{33} c_{12}^E}{e_{31} c_{33}^D}; \quad m_{31} = \frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{(1 - \cos \gamma \alpha)}{\gamma \alpha};$$

$$m_{32} = -\frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{\sin \gamma \alpha}{\gamma \alpha} + 1;$$

$$m_{33} = m_{23}; \quad p_3 = p_2.$$

Решения системы уравнений (40) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= -\frac{e_{31}U_0}{\gamma \alpha c_{12}^E} \frac{\Delta(A)}{\Delta_0}, \quad B = -\frac{e_{31}U_0}{\gamma \alpha c_{12}^E} \frac{\Delta(B)}{\Delta_0}, \\ C &= -\frac{e_{31}U_0}{\gamma \alpha c_{12}^E} \frac{\Delta(C)}{\Delta_0}, \end{aligned}$$

где $\Delta(A)$, $\Delta(B)$, $\Delta(C)$ и Δ_0 – определители следующих матриц:

$$\Delta(A) = \det \begin{vmatrix} p_1 & m_{12} & m_{13} \\ p_2 & m_{22} & m_{23} \\ p_3 & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix};$$

$$\Delta(B) = \det \begin{vmatrix} m_{11} & p_1 & m_{13} \\ m_{21} & p_2 & m_{23} \\ m_{31} & p_3 & m_{33} \end{vmatrix};$$

$$\Delta(C) = \det \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & p_1 \\ m_{21} & m_{22} & p_2 \\ m_{31} & m_{32} & p_3 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_0 = \det \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix}.$$

После определения констант A , B и C можно записать в явном виде усредненные смещения $u_p^{(z)}(R)$, $u_z^{(p)}(\alpha)$ и $u_z^{(p)}(0)$ и определить выражение для функции $\Xi^\varepsilon(\omega)$ (см. соотношение (29) в работе [1]) в явном виде

$$\Xi^\varepsilon(\omega) = \frac{U_0}{\Delta_0} F^\varepsilon(\omega, \Pi),$$

$$F^\varepsilon(\omega, \Pi) = \frac{2e_{31}^2 \alpha}{\chi_{33}^\varepsilon c_{12}^\varepsilon R} \Delta(C) \frac{J_1(\lambda^\varepsilon R)}{\gamma \alpha} + \frac{e_{33} e_{31}}{\chi_{33}^\varepsilon c_{12}^\varepsilon} \left[-\Delta(A) \frac{(1 - \cos \gamma \alpha)}{\gamma \alpha} + \Delta(B) \frac{\sin \gamma \alpha}{\gamma \alpha} \right] + 1.$$

При этом искомый электрический импеданс пьезокерамического диска в области высоких частот задается следующим выражением:

$$Z_{эл}(\omega) = \frac{U_0}{-i\omega C_\delta^\varepsilon \Xi^\varepsilon(\omega)} = \frac{\Delta_0}{i\omega C_\delta^\varepsilon F^\varepsilon(\omega, \Pi)}, \quad (41)$$

где $C_\delta^\varepsilon = \pi R^2 \chi_{33}^\varepsilon / \alpha$ – динамическая электрическая емкость пьезокерамического диска на высоких частотах.

На рис. 5 показаны результаты расчетов модуля электрического импеданса диска, которые выполнялись по формуле (41) при следующем фиксированном наборе параметров: $c_{11}^\varepsilon = 110$ ГПа; $c_{12}^\varepsilon = 60$ ГПа; $c_{33}^\varepsilon = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²; $e_{31} = -8$ Кл/м² и $\chi_{33}^\varepsilon = 1400 \chi_0$; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; механическая добротность пьезокерамики $Q_m = 100$; плотность пьезокерамики $\rho_0 = 7400$ кг/м³. Толщина диска $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Варьируемым параметром семейства кривых, показанных на рис. 5, является отношение R/α , которое задавалось равным 100; 50; 25; 12,5 и 6,25. Числовые значения отношения R/α проставлены в поле рисунка возле соответствующих кривых. По оси ординат на рис. 5 откладываются нормированные на величину модуля $Z_{эл}(\omega_a)$ на частоте ω_a толщинного антирезонанса значения модуля электрического импеданса $Z_{эл}(\omega)$. По оси абсцисс отсчитывается безразмерное волновое число $\gamma \alpha$. При оговоренных выше значениях параметров диска значению $\gamma \alpha = 1$ соответствует циклическая частота $f = v^D / (2\pi \alpha) = 219,1$ кГц, где

где $F^\varepsilon(\omega, \Pi)$ – функция, зависящая от частоты и набора геометрических и физико-механических параметров (символ Π в списке аргументов функции) диска, числовые значения которой задаются формулой

$$v^D = \sqrt{c_{33}^D / \rho_0} = 4130 \text{ м/с} \quad \text{– скорость}$$

распространения плоских волн сжатия-растяжения вдоль направления электрической поляризации диска.

Из показанных на рис. 5 результатов следует, что при значительном изменении отношения R/α значение безразмерной частоты первого толщинного электромеханического антирезонанса остается практически неизменным. Сказанное подтверждают построения, приведенные на рис. 6, где показаны результаты вычисления отношения $|Z_{эл}(\omega)| / |Z_{эл}(\omega_a)|$ в ближайшей окрестности частоты антирезонанса. По оси абсцисс откладываются значения безразмерной частоты $\gamma \alpha$ в единицах числа π , т. е. величины $\gamma \alpha / \pi$. Отчетливо видно, что максимально возможное изменение безразмерной частоты электромеханического антирезонанса не превышает $0,02\pi$. Аналогичное заключение можно сделать о влиянии параметра R/α на значение безразмерной частоты первого толщинного электромеханического резонанса (рис. 5), где модуль $Z_{эл}(\omega)$ принимает минимальное значение.

На основании этих заключений можно сделать вывод, что радиальные смещения $u_p^{(z)}(R)$ материальных частиц диска практически не оказывают влияния на числовые значения частот первого толщинного электромеханического резонанса и антирезонанса. Говоря иными словами, числовые значения частот электромеханического резонанса и антирезонанса практически полностью определяются аксиальными смещениями $u_z^{(p)}(z)$.

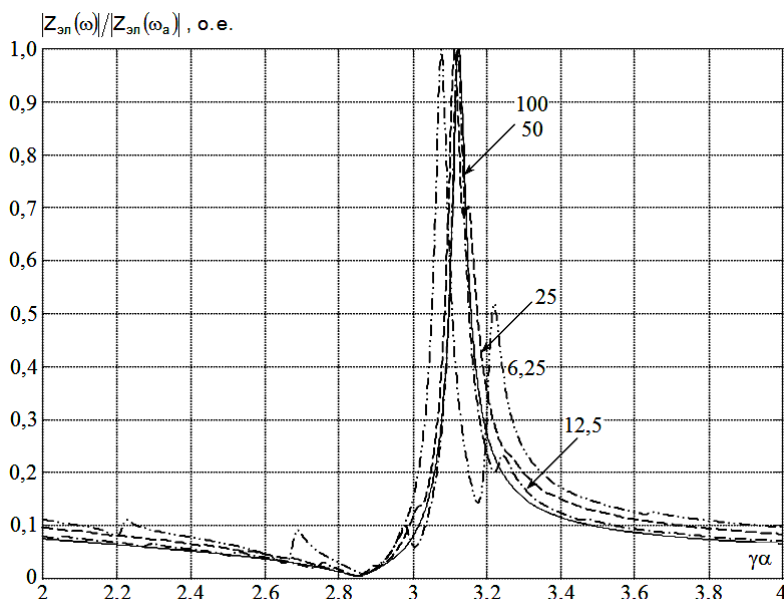


Рис. 5. Частотно зависимое изменение модуля электрического импеданса пьезокерамического диска в окрестности частоты первого толщинного электромеханического резонанса-антирезонанса

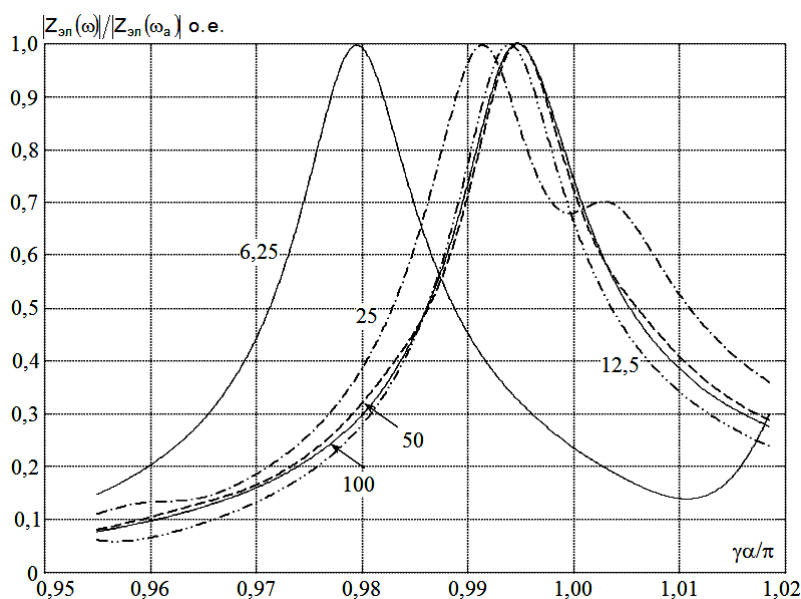


Рис. 6. Частотно зависимое изменение модуля электрического импеданса пьезокерамического диска в ближайшей окрестности частоты первого толщинного электромеханического антирезонанса

Принимая во внимание это обстоятельство, можно утверждать, что в области высоких частот функция $\Xi^e(\omega)$, определяющая электрический импеданс колеблющегося диска в этом частотном диапазоне, может быть записана в следующем виде:

$$\Xi^e(\omega) \cong \frac{e_{33}}{\chi_{33}^e} [u_z^{(p)}(\alpha) - u_z^{(p)}(0)] - U_0. \quad (42)$$

При выполнении расчета электрического импеданса по формуле (42), естественно,

будут утрачены некоторые детали частотно зависимого изменения функции $Z_{эл}(\omega)$. Зато будет сохранено главное – числовые значения частот электромеханического резонанса и антирезонанса.

Константы A и B , которые входят в описание аксиальных смещений $u_z^{(p)}(z)$ (см. выражение (37)), определяются из граничных условий (39), где нормальное напряжение $\sigma_{zz}^{(p)}(z)$ задается следующим выражением:

$$\sigma_z^{(p)}(z) = \gamma c_{33}^D \left\{ -A \left[\sin \gamma z + \frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{(\cos \gamma \alpha - 1)}{\gamma \alpha} \right] + B \left[\cos \gamma z - \frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{\sin \gamma \alpha}{\gamma \alpha} \right] + \frac{e_{33} U_0}{\gamma \alpha c_{33}^D} \right\}. \quad (43)$$

Подставляя в выражение (43) значения $z = \alpha$ и $z = 0$ и приравнявая полученные результаты нулю, получаем систему линейных алгебраических уравнений, из которых единственным образом определяются константы A и B :

$$A = \frac{e_{33} U_0}{c_{33}^D} \frac{\operatorname{tg}(\gamma \alpha / 2)}{\gamma \alpha F^e(\omega, \Pi)}, \quad B = -A \operatorname{tg}(\gamma \alpha / 2), \quad (44)$$

где

$$F^e(\omega, \Pi) = 1 - \frac{K_{33}^2}{1 + K_{33}^2} \frac{\operatorname{tg}(\gamma \alpha / 2)}{(\gamma \alpha / 2)}. \quad (45)$$

Подстановка выражений (44) в определение (37) аксиальных смещений материальных частиц пьезокерамического диска позволяет определить величины $u_z^{(p)}(\alpha)$ и $u_z^{(p)}(0)$, после чего определяется в явном виде функция $\Xi^e(\omega)$, заданная соотношением (42). После этого выражение для расчета электрического импеданса $Z_{эл}(\omega)$ можно записать в следующем виде:

$$Z_{эл}(\omega) = \frac{1}{i \omega C_0^e} F^e(\omega, \Pi). \quad (46)$$

Из выражения (46) следует, что при стремлении $\gamma \alpha / 2$ слева к значению $\pi / 2$ функ-

ция $F^e(\omega, \Pi)$ сначала имеет положительные значения, затем обращается в нуль, что соответствует электромеханическому резонансу, а потом устремляется к минус бесконечности. В случае отсутствия потерь энергии на вязкое трение в материале пьезокерамического диска ($Q_m \rightarrow \infty$) при $\gamma \alpha = \pi$ электрический импеданс $Z_{эл}(\omega_a) \rightarrow \infty$.

На рис. 7, а показано изменение функции $F^e(\omega, \Pi)$ для случая $Q_m \rightarrow \infty$ и $K_{33}^2 = 0,262$, что соответствует набору физико-механических параметров, которые были использованы при расчетах кривых, которые показаны на рис. 5 и рис. 6. На рис. 7, б показан нормированный на свое максимальное значение модуль комплекснозначной функции $F^e(\omega, \Pi)$, когда механическая добротность материала диска $Q_m = 100$ и безразмерное волновое число $\gamma \alpha$ становится комплексным числом $\gamma \alpha(1 - i/(2Q_m))$. Сопоставляя между собой кривые, которые показаны на рис. 5 и рис. 7, б, можно заключить, что детализированный расчет электрического импеданса колеблющегося пьезокерамического диска следует осуществлять по формуле (41), а оценку числовых значений частот резонанса и антирезонанса выполнять с использованием функции $F^e(\omega, \Pi)$, которая задана выражением (45).

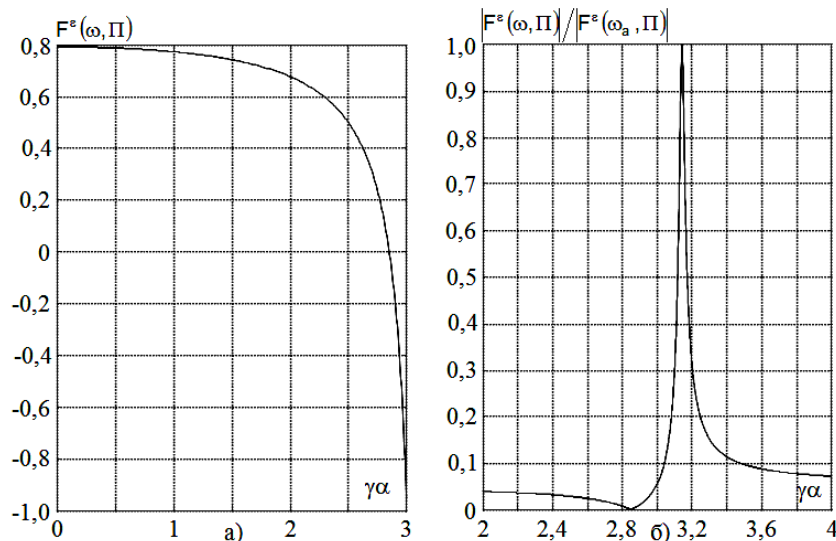


Рис. 7. Частотно зависимое изменение функции $F^e(\omega, \Pi)$ при отсутствии потерь энергии в материале диска (а) и для материала с механической добротностью $Q_m = 100$

Завершая исследование электрического импеданса пьезокерамического диска в области высоких частот, рассмотрим его значение на частоте первого электромеханического резонанса.

В формуле (46) от значения механической добротности Q_M зависят волновое число γ и квадрат коэффициента электромеханической связи K_{33}^2 . При этом $\gamma = \omega/v^D \cong \gamma^0(1 - i/(2Q_M))$ и $K_{33}^2 = e_{33}^2/[\chi_{33}^\varepsilon c_{33}^E(1 + i/Q_M)]$, где γ^0 – волновое число аксиальных колебаний диска, определенное без учета потерь энергии на вязкое трение. Очевидно, что параметр $\varepsilon = 1/(2Q_M) \ll 1$. Разлагая выражение (46) на частоте первого электромеханического резонанса в ряд по степеням малого параметра ε и ограничиваясь при этом нулевым и первым членами разложения, получаем

$$Z_{эл}(\omega_p) = \varepsilon \frac{K_{33}^2 \Psi(\omega_p)}{\omega_p C_\partial^\varepsilon (1 + K_{33}^2)}, \quad (47)$$

$$\text{где } K_{33}^2 = \frac{e_{33}^2}{\chi_{33}^\varepsilon c_{33}^E};$$

$$\Psi(\omega_p) = \frac{2 \operatorname{tg}(\gamma^0 \alpha / 2)}{(1 + K_{33}^2)(\gamma^0 \alpha / 2)} + \frac{1 + \sin(\gamma^0 \alpha)}{\cos^2(\gamma^0 \alpha / 2)}.$$

На рис. 8 приведены графики модуля электрического импеданса $Z_{эл}(\omega)$, рассчитанные по формуле (41) в ближайшей окрестности частоты первого электромеханического резонанса. По оси ординат откладываются значения модуля функции $Z_{эл}(\omega)$ в омах, по оси абсцисс – безразмерная частота $\gamma\alpha = \omega\alpha/v^D$, где $v^D = \sqrt{c_{33}^D/\rho_0}$ – скорость плоских волн сжатия-растяжения, при определении которой не учитываются потери в пьезоэлектрике. Расчеты выполнялись для диска с отношением $R/\alpha = 12,5$. Остальные параметры указаны в комментариях к рис. 5. Варьируемым параметром семейства кривых на рис. 8 является механическая добротность Q_M , которой присваивались значения 60, 80, 100 и 120 единиц. Значения добротности проставлены возле соответствующих кривых. Отчетливо видно, что наибольшему значению Q_M соответствует наименьшее значение электрического импеданса $Z_{эл}(\omega_p)$, который, как следует из формулы (47), имеет положительные действительные значения, т. е. $|Z_{эл}(\omega_p)| \cong Z_{эл}(\omega_p)$.

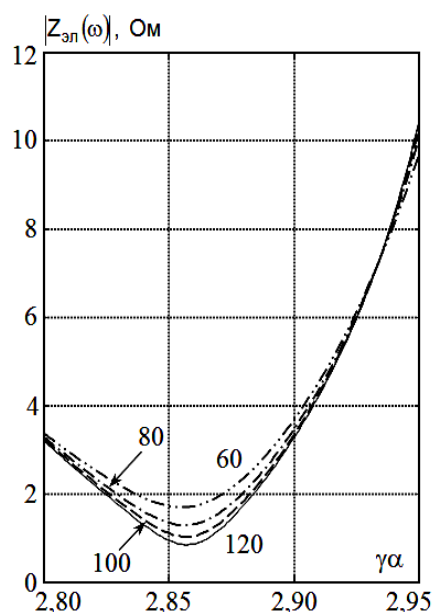


Рис. 8. Расчет по формуле (41) модуля электрического импеданса диска в окрестности частоты первого электромеханического резонанса

Поскольку величина $Z_{эл}(\omega_p)$ является измеряемой в реальном эксперименте, постольку из выражения (47) следует оценка механической добротности Q_M на частоте первого толщинного электромеханического резонанса

$$Q_M = \frac{K_{33}^2 \Psi(\omega_p)}{2Z_{эл}(\omega_p) \omega_p C_\partial^\varepsilon (1 + K_{33}^2)}. \quad (48)$$

Необходимо особо отметить, что механическая добротность Q_M , найденная по формуле (20) (обозначим эту добротность символом $Q_M^{(p)}$), и механическая добротность $Q_M^{(z)}$, определенная выражением (48), не равны друг другу. Более того, должно выполняться неравенство $Q_M^{(p)} > Q_M^{(z)}$. Причина такого положения вещей в достаточной мере очевидна – потери энергии на вязкое трение возрастают с ростом частоты.

Из теории Лифшица–Пархомовского–Меркулова [3] следует, что коэффициент β затухания ультразвука в широком диапазоне частот можно описать следующим выражением:

$$\beta \cong \delta_1 f^2 + \delta_2 f^4,$$

где δ_1 и δ_2 – структурные параметры, числовые значения которых определяются среднестатистическими размерами зерен материала; f – циклическая частота.

Коэффициент затухания β и механическая добротность Q_m связаны между собой следующим образом: в области средних частот $\beta = \lambda / (2Q_m^{(p)})$, в области высоких частот $\beta = \gamma / (2Q_m^{(z)})$, где λ и γ - волновые числа радиальных и толщинных колебаний круглого диска. Зная значения механических добротностей $Q_m^{(p)}$ и $Q_m^{(z)}$ на частотах первого и второго радиального, а также первого и второго толщинного электромеханических резонансов, можно построить оценки частотной зависимости механической добротности в области средних и высоких частот. Кроме того, можно сформировать оценку частотной зависимости добротности в переходном частотном диапазоне. Указанные оценки чрезвычайно важны при математическом моделировании функциональных устройств пьезоэлектроники, которые работают в широком частотном диапазоне.

Выводы. Основные результаты настоящей статьи можно зафиксировать следующим образом:

1. Построено выражение для расчета электрического импеданса колеблющегося пьезокерамического диска в области средних частот, где вектор смещения материальных частиц диска практически полностью определяется радиальным компонентом.

2. С помощью метода усреднения решена система дифференциальных уравнений в частных производных и на этом основании построена математическая модель электрического импеданса пьезокерамического диска в области высоких частот, где вектор смещения материальных частиц определяется радиальным и аксиальным компонентами.

3. Показано, что радиальные колебания практически не оказывают влияния на числовые значения частот толщинного электромеханического резонанса и антирезонанса.

Список литературы

1. Петрищев О. Н. Определение электрического импеданса пьезокерамического диска и его расчет в области низких частот / О. Н. Петрищев, К. В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 3.
2. Улитко А. Ф. Амплитуды и фазы продольных колебаний пьезокерамических стержней с учетом переменной механической добротности / А. Ф. Улитко. – К. : Видав.-поліграф. центр «Київський університет», 2004. – С. 204–208.
3. Пападакис Э. Затухание ультразвука, обусловленное рассеянием в поликристаллических средах. – В кн. Физическая акустика. Т. IV, часть Б. Приложения физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела / Э. Пападакис. – М. : Мир, 1970. – С. 317–381.

References

1. Petrishchev, O. N. and Bazilo, C. V. (2016) Determination of electrical impedance of piezoceramic disk and its calculation in low frequencies region. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, No. 3 [in Russian].
2. Ulitko, A. F. (2004) Amplitudes and phases of longitudinal oscillations of piezoceramic rods considering a variable mechanical quality factor. Kiev: Vydav.-poligraf. tsentr "Kyivskyy universytet", pp. 204–208 [in Russian].
3. Papadakis, E. (1970) Ultrasound attenuation due to scattering in polycrystalline media. In: *Physical Acoustics, Vol. IV, Part B. Applications of physical acoustics in quantum physics and solid state physics*. Moscow: Mir, pp. 317–381 [in Russian].

O. N. Petrishchev¹, *Dr.Tech.Sc., professor,*
C. V. Bazilo², *Ph.D. (Eng.), associate professor*

¹National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
Peremogy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

²Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

DETERMINATION OF ELECTRICAL IMPEDANCE OF PIEZOCERAMIC DISK AND ITS CALCULATION IN MEDIUM AND HIGH FREQUENCY REGIONS

The final goal of mathematical modeling of physical condition of vibrating piezoelectric elements is a qualitative and quantitative description of characteristics and parameters of existing electrical and elastic fields. It is clear that to obtain meaningful and reliable quantitative estimates of physical condition parameters of piezoelectric (piezoceramic) element is not possible without reliable data on the values of physical and mechanical constants of the materials.

Thus, it is necessary to build noncontradictory method of material constants experimental determination of piezoelectric ceramics, which delivers reliable values of at least three modules of elasticity, two elements of the matrix of piezoelectric coefficients and one element of the matrix of dielectric constants, which is the purpose of the work.

The main results of this paper can be written as follows:

– at sufficiently general initial assumptions a mathematical description of electrical impedance of oscillating thin piezoceramic disk with end surfaces continuous covering by electrodes in vacuum is obtained;

– the expression for electrical impedance calculating of oscillating piezoceramic disk at middle frequencies is built, where the vector of disk's material particles displacement is almost completely determined by radial component;

– with the help of the averaging method a system of differential equations in partial derivatives is solved, and on this basis, a mathematical model of electrical impedance of piezoceramic disk at high frequencies is built, where the vector of material particles displacement is determined by radial and axial components.

Keywords: *thin disk, piezoelectric ceramics, electrical impedance, radial and axial components of vector of piezoceramic material particles displacement.*

Статтю представляє д.т.н., професор О. М. Петріщев, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

С. В. Медушевський, аспірант,
e-mail: victorovich.med@gmail.com

Н. А. Єфіменко, д.е.н., професор
e-mail: yefimenko-nadezhda@ukr.net

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
б-р Шевченка, 81, м. Черкаси, 18031, Україна

АНАЛІЗ ФАЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В РАМКАХ ВИКОНАННЯ ВАЛІДАЦІЙНИХ РОБІТ

У статті представлено результати дослідження життєвого циклу автоматизованої інформаційної системи дискретного виробництва. Проведено аналіз останніх досліджень. Розглянуто основні етапи проекту і допоміжні процеси, основний контекст використання валідації як методу контролю якості в рамках життєвого циклу системи. Наведено схему підходу для конфігурованої системи загального типу. Визначено верифікаційну активність відповідно до стадії валідації і місце верифікації та тестування на кожному етапі життєвого циклу.

Ключові слова: валідація, автоматизація, якість, верифікація, специфікація, проектування.

Постановка проблеми. У міру збільшення складності і розширення області застосування сучасних автоматизованих інформаційних систем управління (АІС) при одночасному зростанні відповідальності за виконувані функції різко підвищилися вимоги до якості та безпеки застосування програмних комплексів. В умовах як промислових, так і дискретних підприємств застосування неякісної АІС може завдати значної і непоправної шкоди. У зв'язку з цим одним із важливих моментів у життєвому циклі АІС стало забезпечення необхідної якості програм і даних.

Очевидно також, що якісний продукт неможливо створити, якщо на підприємстві або в його підрозділі не запроваджена система якості. Навіть у неповному обсязі впровадження система якості дозволяє більш ефективно управляти процесом розробки і супроводу АІС, що значно підвищує споживчі якості програмних продуктів. В загальних рисах система якості – це, по-перше, пакет розроблених та затверджених нормативно-методичних документів (інструкцій, методик, директив і т. ін.) на кожний виділений технологічний процес проектування, виготовлення та розповсюдження виробу; по-друге, контроль поетапного виконання технологічних процесів відповідно до затвердженого плану.

Гарантування та контроль якості розробки АІС – проблема, вирішення якої потребує комплексного дослідження.

Аналіз останніх досліджень. Термін «життєвий цикл» характеризує об'єкти та системи в цілому і широко використовується для автоматизованих систем [2]. Згідно з зазначеним літературним джерелом виділяють такі етапи життєвого циклу автоматизованої системи: концепція, проект, експлуатація, завершення експлуатації.

Модель життєвого циклу кожної складової та системи в цілому повинна визначатися в технічному завданні відповідно до чинних стандартів. В [1] визначені ідеальні значення ефективності роботи системи і граничні значення вірогідності відповідності множини значень показників якості системи на різних етапах життєвого циклу.

В [3] пропонуються методи забезпечення та контролю якості автоматизованих інформаційних систем на основі моделей якості з метою формулювання вимог на різних стадіях життєвого циклу та підтверджується їх ефективність на прикладі Web-додатків.

Згідно з джерелом [4] модель якості АІС повинна постійно бути у безперервному циклічному процесі збору та аналізу даних, ідентифікації та оцінювання ризиків, розробки й впровадження коригувальних та запобіжних дій протягом усіх етапів життєвого циклу.

Аналіз характерних сучасних проблем оцінювання якості програмного забезпечення [5] показує, що сучасні стандарти у галузі

забезпечення якості автоматизованих систем не відповідають потребам користувачів.

Таким чином, аналіз життєвого циклу автоматизованої інформаційної системи є актуальним.

Метою роботи є визначення параметрів, які впливають на якість АІС, і місця верифікації на всіх етапах життєвого циклу в рамках виконання валідаційних робіт.

Виклад основного матеріалу. Відповідність нормативним вимогам та придатності для передбачуваного використання досягається шляхом прийняття підходу життєвого циклу відповідно до ISO/IEC 25010:2011 [7]. Додатково до цього стандарту випущено стандарт [8], який регламентує способи моделювання якості АІС, і стандарт [9], який включає в себе основні вимоги та рекомендації щодо верифікації та валідації автоматизованих систем і програмного забезпечення.

Життєвий цикл автоматизованої системи охоплює всі види діяльності – від початкової концепції до завершення експлуатації.

Етапи життєвого циклу зображено на рис. 1.

Під час етапу концепції підприємство розглядає можливості для автоматизації одного або декількох бізнес-процесів, ґрунтуючись на потребах бізнесу та вигоди. Як правило, на цьому етапі будуть розроблені початкові вимоги і розглянуті можливі рішення.

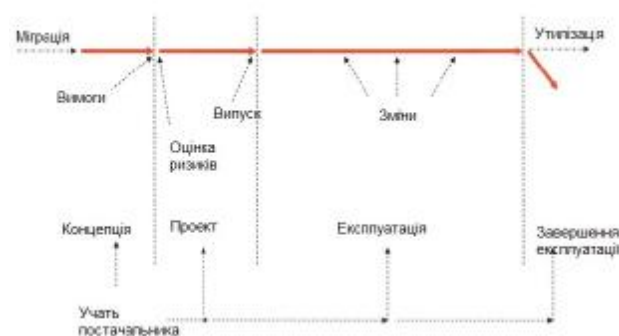


Рис. 1. Етапи життєвого циклу АІС

Від початкового розуміння масштабів, витрат і вигод приймається рішення про перехід до етапу проекту.

Етап проекту включає в себе планування, оцінювання і вибір постачальників, різні рівні специфікації, конфігурування (або кодування для користувальницьких додатків), і верифікацію, яка веде до приймання і пуску в експлуатацію. Управління ризиками застосо-

вується для виявлення ризиків і для усунення або зменшення їх до прийняттого рівня.

На етапі проектування важливим фактором є розробка критеріїв вибору моделі надійності, складності та якості системи в цілому [6].

Експлуатація системи, як правило, є найдовшим етапом і управляється за допомогою певних сучасних операційних процедур, що застосовуються персоналом з відповідною підготовкою, освітою і досвідом. Ключовими аспектами є підтримка контролю (у тому числі безпеки), придатності для передбачуваного використання та відповідність. Управління змінами різних впливів, масштабів та складності є важливим напрямком діяльності на цьому етапі.

Заключним етапом є остаточне завершення експлуатації системи. Воно включає в себе рішення про збереження даних, міграцію або знищення, а також управління цими процесами.

Постачальники товарів і послуг повинні бути задіяні у міру необхідності протягом всього життєвого циклу.

Структура валідації автоматизованої системи. Структура валідації автоматизованої системи для досягнення і підтримки відповідності протягом життєвого циклу ґрунтується на системі конкретних валідаційних планів, звітів та застосуванні відповідних операційних елементів контролю. Валідаційні плани і звіти забезпечують дисциплінований і послідовний підхід до виконання нормативних вимог, що приводить до відповідності документації на належному рівні. Такі документи є важливими як при підготовці до, так і під час інспекції (аудиту).

Реалізація принципів валідації відбувається шляхом уточнення масштабованості підходу, центральної ролі управління ризиками якості, щоб ефективно і раціонально охопити дуже широкий спектр систем у виробничій системі промислового підприємства.

Якщо АІС розглядається як одна зі складових більш широкого виробничого процесу або системи, особливо в інтегрованому середовищі QbD, необхідна конкретна і окрема валідація АІС.

Це середовище вимагає як закінченого продукту і розуміння процесу, так і того, що критичні параметри процесу можуть бути точно і надійно прогнозовані і контрольовані в

середовищі проектування. У такому випадку придатність для передбачуваного використання АІС протягом процесу може бути адекватно продемонстрована документами про інженерну або проектну діяльність, разом з подальшим процесом валідації або безперервною верифікацією якості всього процесу чи системи. Той же принцип стосується і прийняття технологічного аналітичного процесу (РАТ).

Специфікація і верифікація комп'ютерної системи є частиною інтегрованого інженерного підходу до забезпечення відповідності та придатності для передбачуваного використання повністю автоматизованого обладнання.

Діяльність цієї фази концепції залежить від підходів компанії до ініціювання й обґрунтування початку проекту. Однак отримання зобов'язання управління для надання відповідних ресурсів є важливим кроком передпроектної діяльності.

Етапи проекту та ключові допоміжні процеси, які є частиною життєвого циклу автоматизованої системи, зображені на рис. 2. Ці етапи рівною мірою застосовуються як до фази проекту, так і до подальших змін у процесі експлуатації.

Фаза проекту складається здебільшого з послідовних етапів, проте детальні дії можуть виконуватися паралельно або з деяким перекриттям. Наприклад, діяльність з перевірки може відбуватися через кілька стадій. Результати, отримані в ході виконання цих етапів, забезпечують документальне свідчення того, що система підходить для використання за призначенням.

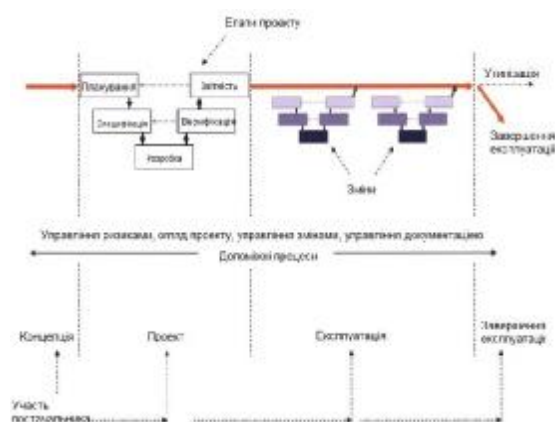


Рис. 2. Етапи проекту і допоміжні процеси в рамках життєвого циклу

Планування. Планування має охоплювати всі необхідні дії, відповідальності, процедури і терміни.

Діяльність повинна масштабуватися відповідно до впливу системи на безпеку працівників, якість продукції і цілісність даних (оцінювання ризиків).

Чітке і повне розуміння вимог користувача необхідне для сприяння ефективному плануванню. Початкові вимоги часто розробляються під час фази концепції, а завершення збору вимог користувача, як правило, відбувається на етапі планування.

Масштаби і деталі збору вимог і специфікацій мають бути достатніми для підтримки оцінки ризиків, додаткових специфікацій та розвитку системи і верифікації. Порівняння наявних рішень може привести до уточнення вимог.

Підхід повинен базуватися на розумінні продукту і процесу, і на відповідних нормативних вимогах.

Специфікації, конфігурація і кодування. Роль специфікацій – забезпечити розробку, верифікацію і підтримку систем. Кількість і рівень деталізації специфікацій буде змінюватись залежно від типу системи і мети її використання. Специфікації можуть бути отримані від постачальника. Перед використанням підприємства повинні переконатися, що, у міру необхідності, вони є відповідними для підтримки подальшої діяльності, включаючи оцінювання ризику, додаткові специфікації та розвиток системи, верифікацію.

Будь-яке необхідне конфігурування має виконуватися відповідно до контрольованого і повторюваного процесу. Все необхідне кодування ПЗ повинне бути виконано відповідно до встановлених стандартів. Необхідність перевірки коду має розглядатися як частина управління ризиками.

Управління конфігуруванням є невід'ємним і життєво важливим аспектом контрольованих конфігурацій і кодування.

Специфікація як окремий від конфігурації і кодування етап проекту показана на рис. 2. Однак діяльність по специфікаціях може відрізнятися від конфігурування і кодування або бути тісно пов'язаною з ними залежно від прийнятого способу розробки АІС. Специфікації повинні підтримуватися і контролюватися.

Верифікація. Верифікація підтверджує, що вимоги специфікацій були виконані. Це

може включати кілька етапів огляду/аналізу і тестування залежно від типу системи, застосованого методу розробки і його використання. Верифікації відбувається під час усіх етапів проекту. Аналіз проекту повинен перевірити специфікації під час стадії розробки специфікації.

Тестування автоматизованих систем є однією з основних складових верифікації. Тестування пов'язане з виявленням дефектів, так щоб вони могли бути виправлені, а також з демонстрацією того, що система відповідає вимогам.

Тестування часто здійснюється на кількох рівнях залежно від ризику, складності та новизни. Один рівень тестування може підходити для простих систем і систем низького ризику. Тести запобігають появі помилок у новому коді, що безпосередньо підвищує якість програмного комплексу на всіх етапах життєвого циклу [10].

Відповідна стратегія тестування має бути розроблена на основі ризику, складності та новизни. Документація постачальника повинна бути оцінена і, якщо підходить, використана. Стратегія має визначати, які види тестування потрібні, кількість і мету специфікацій тестування. Стратегія тестування повинна бути розглянута і схвалена відповідними експертами в галузі конкретних знань.

Звітність і випуск. Система має бути прийнята для використання в операційному середовищі та випущена в це середовище згідно з контрольованим і документованим процесом. Приймання і випуск системи для використання в діяльності промислового підприємства повинні вимагати схвалення власником процесу, власником системи, а також представниками блоку якості.

Після завершення проекту повинен бути створений Валідаційний звіт автоматизованої системи, який підбиває підсумки здійснюваної діяльності, будь-яких відхилень від плану, які-небудь додаткові та коригувальні дії, а також надання заяви про придатність до передбачуваного використання системи.

Контрольована система передачі від проектною команди власника процесу, власника системи, а також оперативних користувачів є попередньою умовою для ефективної підтримки відповідності системи під час роботи.

Зміни і управління конфігуруванням. Відповідні процеси управління конфігуруванням повинні бути встановлені так, щоб авто-

матизована система і всі її складові компоненти могли бути встановлені і визначені в будь-який момент. Також повинні бути встановлені процедури управління змінами. Має бути визначена точка, в якій представлено управління змінами. Відповідні процеси змін повинні застосовуватися як до фази проекту, так і експлуатації. Будь-яка участь постачальників у цих процесах має бути визначеною та погодженою.

Аналіз/оцінювання проекту. На відповідних етапах протягом життєвого циклу має виконуватися запланований і систематичний аналіз проекту специфікацій, проектування і розробки. Цей процес оцінювання проекту повинен оцінити результати, щоб вони задовольняли встановленим вимогам. Мають бути визначені і розвинуті коригувальні дії.

Простежуваність. Простежуваність – це процес забезпечення того, що вимоги розглядаються і простежуються в специфікаціях до функціональних і проектних елементів. Простежуваність повинна зосереджуватися на критичних аспектах для безпеки працівників, якості продукції та цілісності даних.

Управління документацією. Управління документацією включає підготовку, розгляд, затвердження, видачу, зміни, скасування і зберігання.

В табл. 1 подано характеристику стадій валідації автоматизованої інформаційної системи.

Загальний підхід може бути застосований масштабним чином до систем загального типу, як показано на рис. 3.

Оскільки система є новою, ретельне тестування повинне проводитися як на функціональному рівні, так і на рівні проектування.

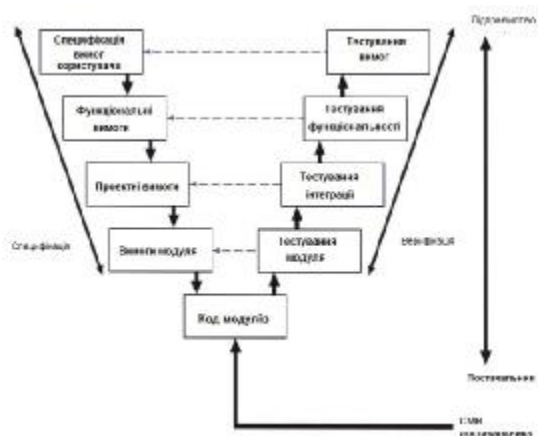


Рис. 3. Підхід для конфігурованої АІС

Характеристика стадій валідації АІС

Стадія валідації	Опис	Верифікаційна активність
Кваліфікація проекту (DQ)	Документована верифікація того, що пропонуване проектування об'єктів, систем та обладнання підходить для поставленої мети	Аналіз/оцінювання проекту
Кваліфікація інсталяції (IQ)	Документована верифікація того, що система буде встановлена відповідно до письмових попередньо затверджених специфікацій	Перевірка, тестування або інші верифікації, щоб продемонструвати коректність встановленого програмного і апаратного забезпечення та коректність конфігурування програмного і апаратного забезпечення
Кваліфікація функціонування (OQ)	Документована верифікація того, що система працює відповідно до письмових попередньо затверджених специфікацій	Тестування або інші верифікації системи нарівні зі специфікаціями для демонстрації правильної роботи функціональних можливостей, які підтримує конкретний бізнес-процес при всіх зазначених діапазонах роботи
Кваліфікація експлуатації (PQ)	Документована верифікація того, що система здатна виконувати діяльність процесів, необхідних для виконання, згідно з письмовими попередньо затвердженими специфікаціями, в рамках бізнес-процесів і операційного середовища	Тестування або інші верифікації системи для доведення придатності для використання за призначенням і забезпечення прийняття системи згідно з встановленими вимогами

Діяльність постачальника включає в себе написання специфікацій і тестових специфікацій від імені промислового підприємства, розробку нового ПЗ, тестування, документацію користувача, навчання, підтримку та супровід.

Для складних систем може знадобитися подальша ієрархія специфікацій, що охоплює специфікації проектування обладнання і специфікації конфігурування.

Висновок. У ході проведення аналізу життєвого циклу АІС визначено групи видів діяльності, спрямованих на вирішення відповідного набору зв'язаних задач з розробки, інтеграції та супроводу АІС у рамках валідаційних робіт. Визначено, що верифікація та тестування виконуються на кожному рівні життєвого циклу залежно від складності системи.

Список літератури

1. Скопа О. О. Показники якості та життєві цикли захищених інформаційно-вимірвальних систем [Електронний ресурс] / О. О. Скопа, С. Л. Волков, О. В. Грабовський // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 15 (1). – С. 192–198. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2013_15\(1\)_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2013_15(1)_33)
2. Реуцький Є. А. Життєвий цикл технічних систем і комп'ютерний вимірвальний експеримент [Електронний ресурс] / Є. А. Реуцький, А. А. Саврадон, Т. О. Самчук / Портал: Національний авіаційний університет. – Режим доступу : http://www.avia.nau.edu.ua/doc/2011/1/1_21.pdf. – Заголовок з контейнера, доступ вільний, 30.10.2012.
3. Харченко О. Г. Методи забезпечення та контролю якості Web-застосовань на стадіях життєвого циклу [Електронний ресурс] / О. Г. Харченко, В. В. Яцишин, І. О. Бондарчук / Портал: Національна бібліотека ім. В. Вернадського. – Режим доступу : <http://www.nbuv.gov.ua/portal/...1/34har.pdf>. – Заголовок з контейнера, доступ вільний, 30.10.2012.
4. DeMarco Tom. Controlling software projects: management, measurement and estimation. – 2002. – 279 p.

5. Поморова О. В. Сучасні проблеми оцінювання якості програмного забезпечення / О. В. Поморова, Т. О. Говорущенко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 5. – С. 319–327.
6. Говорущенко Т. О. Дослідження відомих моделей оцінювання характеристик програмного забезпечення / Т. О. Говорущенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 117–121.
7. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models
8. ISO/IEC 14598. Information technology – Software product evaluation
9. IEEE 1012-2016. IEEE Approved Draft Standard for Software Verification and Validation. – New York: IEEE, 2016. – 81 p.
10. Волкова С. О. Дослідження існуючих підходів підвищення якості програмного забезпечення критичного застосування [Електронний ресурс] / С. О. Волкова, О. М. Трунов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 6. – С. 202–208. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2008_6_37
2. Reutsky, Ye. A., Savradon, A. A. and Samchuk, T. O. Lifetime of technical systems and computerized measuring experiment. Portal: National Aviation University, : http://www.avia.nau.edu.ua/doc/2011/1/1_21.pdf
3. Kharchenko, O. G., Yatsyshyn, V. V. and Bondarchuk, I. A. Methods of quality assurance and control of Web-applications at life cycle stages. Portal: National Library named after V. Vernadsky, available at: <http://www.nbuv.gov.ua/portal/...1/34har.pdf>
4. DeMarco, Tom (2002) Controlling software projects: management, measurement and estimation, 279 p.
5. Pomorova, O. V. and Hovorushchenko, T. O. (2013) The actual problems of software quality evaluation. *Radioelektronni i komputerni systemy*, No. 5, pp. 319–327 [in Ukrainian].
6. Hovorushchenko, T. O. (2013) The research of known models for software evaluation *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tehnichni nauku*, No. 1, pp. 117–121 [in Ukrainian].
7. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models
8. ISO/IEC 14598. Information technology – Software product evaluation
9. IEEE 1012-2016. IEEE Approved Draft Standard for Software Verification and Validation. New York: IEEE, 81 p.
10. Volkov, S. O. and Trunov, O. M. (2008) The research of existing approaches to improve the quality of critical software applications. *Radioelektronni i komputerni systemy*, No. 6, pp. 202–208, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2008_6_37

References

1. Skopa, A. A., Volkov, S. L. and Grabowski, A. V. (2013) Quality indicators and life cycles of information-measuring systems. *Visnyk Shidnoukrayinskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalya*, No. 15 (1), pp. 192–198, available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2013_15\(1\)_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2013_15(1)_33)

S. V. Medushevskiy, postgraduate student,

e-mail: victorovich.med@gmail.com

N. A. Efimenko, Dr. Econ. Sc., professor

e-mail: yefimenko-nadezhda@ukr.net

Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy

Shevchenko blvd, 81, Cherkasy, 18031, Ukraine

PHASE ANALYSIS OF THE LIFE CYCLE OF AUTOMATED INFORMATION SYSTEM WITHIN THE FRAMEWORK OF VALIDATION WORKS

In the conditions of both industrial and digital companies the use of low-quality automated information system can cause significant and irreparable harm. In this regard, the assurance of required quality of programs and data becomes an important factor in the life cycle of the system.

The aim of the article is to develop tools of analysis and quality evaluation systems at different stages of the life cycle of the system and to determine the parameters that influence the quality system at all stages of the life cycle.

The problem is to ensure quality control and the development of automated system the solution of which requires a comprehensive study.

Structure validation of automated systems consists in the achievement and maintaining of compliance lifecycle based on specific system validation plans, reports and applying the relevant operational controls. Validation plans and reports provide a consistent and disciplined approach to the regulatory requirements leading to compliance documentation properly.

Implementation of the principles of validation is by clarifying scalability approach, the central role of risk management as to effectively and efficiently reach a very wide range of production system in industrial enterprise.

It is shown that the model lifecycle of automated system is a structured hierarchical set of quality assurance and control system.

The place of verification and testing at every stage of the life cycle is considered.

Verification activities under the stage of validation and verification and spot testing at every stage of the life cycle are determined.

Keywords: *validation, automation, quality, verification, specification, design.*

*Рецензенти: С. В. Голуб, д.т.н, професор,
О. Б. Данченко, д.т.н, доцент*

Д. В. Бас, аспірант

e-mail: dima_bas1990@mail.ru

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна

АРТ-ПРОЕКТИ, ЇХ ОСОБЛИВОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

В роботі досліджується зв'язок між проектною діяльністю та реалізацією культурної політики і розвитку творчих індустрій. Вводиться поняття арт-проекту та виділяються його специфічні особливості, що дає підстави говорити про успішне використання проектного підходу в сфері творчості для управління арт-проектами.

Ключові слова: мистецтво, проект, арт-проект, творчий проект, проектний підхід.

Постановка проблеми. Останнім часом у світі зростає інтерес до відносин між менеджментом та культурою, творчістю. Це пов'язано з визнанням економічної важливості культурних і творчих індустрій, а також з успіхами багатьох окремих культурних, творчих організацій та їх менеджерів.

Ще один важливий аспект – це те, як творчі індустрії можуть змінити наше бачення проблем, з якими стикається суспільство – починаючи з підходу до інновацій, дизайну продукту, нових способів мислення і закінчуючи вирішенням глобальних питань фінансової кризи і перетворень міського середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження проблем проектною діяльністю як організаційно-управлінської моделі реалізації культурної політики та розвитку творчості слід розглядати в контексті загальних уявлень про діяльність взагалі.

У науковій літературі прийнято виділяти основні типи діяльності: перетворювальну, пізнавальну, ціннісно-орієнтаційну та комунікативну [1]. В структурі перетворювальної діяльності виділяють: матеріально-перетворювальну та духовно-перетворювальну діяльність. Проектна діяльність знаходиться на стику цих видів (рис. 1).

В науці розглядають кілька основних напрямів дослідження проектною діяльності [2]:

- соціально-філософський напрям;
- предметний напрям дослідження проектною діяльності в загальнотехнічному, інформаційному, ергономічному, операційному аспектах;
- дослідження проектною діяльності як управлінської технології, особливостей управління проектами в різних сферах суспільного життя.

В. А. Луків [3] в роботі «Соціальне проектування» виділяє три підходи до соціальної проектною діяльності. Перший – об'єктно-орієнтований підхід. Цей термін запропонований Т. М. Дрідзе для позначення концепцій, розроблених Р. А. Антонюком, М. А. Аїтовим, Н. І. Лапіним, Ж. Т. Тощенко. Соціальний проект з позицій цього підходу має на меті створення нового або реконструкцію наявного об'єкта, виконує важливу соціокультурну функцію. Соціальна проектна діяльність тут має плановий характер, «суть якої – в науково обґрунтованому визначенні параметрів формування майбутніх соціальних об'єктів або процесів з метою забезпечення оптимальних умов для виникнення, функціонування і розвитку нових або реконструйованих об'єктів. Діапазон соціальних проектів повністю збігається з діапазоном соціальних прогнозів і соціальних нововведень» [4].

У рамках другого – проблемно-орієнтованого підходу прогностична соціально-проектна діяльність розглядається як специфічна соціальна технологія, орієнтована на інтеграцію гуманітарного знання в процес вироблення варіантних зразків рішень поточних і перспективних соціально значущих проблем з урахуванням даних соціально-діагностичних досліджень, доступних ресурсів і намічуваних цілей розвитку регульованої соціальної ситуації.

Третій – суб'єктно-орієнтований (тезаурусний) підхід. Якщо перші два підходи пов'язані переважно зі створенням та реалізацією великих проектів, то цей – з мікро-проектами, тобто проектами з мінімальною кількістю учасників і з невеликим обсягом діяльності. У цьому підході використовується механізм соціальної і культурної орієнта-

ції, що ґрунтується на схожості й відмінності тезаурусів людей. «Тезаурус являє собою повний систематизований склад інформації (знань) і установок в тій чи іншій сфері життєдіяльності, що дозволяє в ній орієнтуватися. Тезаурус має своєрідну властивість структури інформації: ієрархія знань у його межах будується не від загального до часткового, а

від свого до чужого. У тезаурусі знання сплавлені з установками і існують за законами ціннісно-нормативної системи» [4]. Саме тезаурусний підхід є найбільш перспективним у сфері культури, оскільки безпосередньо пов'язаний з проектуванням цінних для людей культурних благ.



Рис. 1. Основні типи людської діяльності

Мета статті – розглянути поняття арт-проекту, проаналізувати його особливості та ввести визначення, що таке арт-проект.

Виклад основного матеріалу. До найважливіших видів мистецтва відноситься образотворче мистецтво, що об'єднує живопис, графіку та скульптуру, художню фотографію. Художні образи в них створюються на площині або в просторі і відзначаються зоровою конкретністю і незмінністю у часі. Специфічними художніми засобами образотворчого мистецтва є малюнок, колір, пластика, тінь, що дозволяють створювати видимі зображення предметів. Вони виявляються своєрідно в кожному з видів образотворчих мистецтв [5].

Термін «образотворче мистецтво» відноситься до видів мистецтва, що втілює художні образи на площині та в просторі. Це розділ пластичних мистецтв, що поєднує жи-

вопис, скульптуру, графіку та монументальне мистецтво («остаточну образну завершеність» отримують «у відповідному архітектурному ансамблі або природному»: скульптурні монументи, пам'ятники історичним подіям та особам, мозаїки, ікони, панно, фрески), декоративне мистецтво, фотомистецтво. Твори образотворчого мистецтва відображають задум художника в наочних, зоровосприйманих статичних і динамічних образах, тобто мають предметно-візуальну форму. У можливості образотворчого мистецтва входить не тільки «чуттєве відтворення ідеї автора (передача об'єму, кольору, фактури, протяжності простору, світлоповітряного середовища тощо), але й вираження його духовної та соціальної сутності (включаючи внутрішній світ людини, його психічний і емоційний стан)». Аналіз цих визначень дозволяє виділити «зображу-

вальність» як специфічну ознаку твору образотворчого мистецтва з метою відокремлення цього творчого (арт) проекту від інших, наприклад, літературних і музичних творів.

Образотворчі засоби відтворення задуму художника, що становлять основу художньої мови твору образотворчого мистецтва – художні форми: гармонія, пропорції, ритм, композиція та ін., на думку І. Н. Лісаковського [6], «забезпечують емоційно-естетичну виразність образу через посередництво конкретно-життєвої фактурності, наочності, впізнаваності, як у живописі, скульптурі чи кіно». Можна зробити висновок про те, що під твором якого-небудь виду образотворчих мистецтв слід розуміти продукт художньої творчості і праці, який в чуттєво-матеріальній формі втілює духовно-змістовний задум художника в наочних, зоровсприйманих образах на площині і в просторі. Важливо відзначити, що уява художника та обрані ним методи узагальнення, типізації дають йому можливість відтворити часовий розвиток подій, духовний вигляд, переживання, думки, взаємовідносини людей, ідеї суспільства та ін.

Рішення творчої задачі не вкладається в інструкції і правила, і людина, що приступає до нього, не знає відповідного способу вирішення. Це процес неконкретизований з точки зору цілей і засобів, тому що у будь-якій творчій діяльності результати повністю і детально передбачити неможливо.

Крім того, творча діяльність, реалізована поза контекстом комерціалізації продукту, у фокусі – скоріше процес, ніж результат. Для художника критерієм якості роботи може бути власне задоволеність процесом і/або результатом. У рамках комерційної діяльності критерії якості визначає замовник або споживач, і вони ж дають оцінку результату творчої праці. «Мета творчості в мистецтві знаходиться всередині творця, мета творчості в бізнесі – у зовнішньому середовищі» [7]. У той же час одним із критеріїв якості творчого проекту є його оригінальність, художньо-естетична цінність – те, що є результатом справді творчого процесу. Тобто, фактично, творчий проект можливо представити як замовлення, що породило резонанс, новаторське творіння тощо.

Отже, говорячи про творчий проект, його можна розглядати як відносно відособлений внутрішньоцілісний вид діяльності, в основі якого лежить, з одного боку, інноваційна ідея або технологія, а з другого, – чіт-

кий алгоритм досягнення мети, пов'язаний із завданнями, заходами, ресурсами, виконавцями і показниками ефективності.

Головна і обов'язкова умова: в основі проектної діяльності в сфері творчості повинно лежати нововведення. В іншому випадку неминучі перегини, коли модним словом «проект» назвуть встановлення пам'ятника, роботу гуртка в будинку культури, видання книги і т. д.

Залежно від спрямованості проекти в сфері культури та творчості можна підрозділити на три типи:

1) внутрішньовідомчі – припускають вдосконалення роботи управлінських структур або установ культури;

2) «внутрішньосферні» – припускають впровадження нововведень в організацію культурних заходів, статутну діяльність установ культури, підтримку творчих діячів;

3) соціокультурні – спрямовані на зміну соціального середовища, тобто поліпшення соціальних показників: зниження рівня злочинності, наркоманії, соціальної напруженості методами і засобами культури.

Важливими для підтримки творчих особистостей та колективів є внутрішньосферні проекти. При цьому не потрібно забувати, що культурна політика і творча діяльність повинні служити не стільки самим собі, скільки співтовариству. Звідси призначення творчих проектів полягає в наступному:

- робити людей більш культурними і творчо розвинутими, а отже, більш допитливими, компетентними і терпимими, запобігати поширенню соціальних вад;

- у художній формі впливати як на поверхневі, так і на глибинні властивості особистості – відповідно настроїв і світогляд, ставлення до сучасних процесів і явищ;

- формувати підготовленого споживача культурного продукту;

- робити навколишнє середовище візуально багатшим і різноманітнішим;

- формувати впізнаваний позитивний імідж території серед мешканців та у зовнішньому середовищі [8].

Проект – це обмежена в часі цілеспрямована зміна окремої системи з встановленими вимогами до якості результатів, можливими рамками витрат коштів і ресурсів та специфічною організацією [9].

Таким чином, проводячи аналогію з класичним визначенням, введемо визначення

арт-проекту. Арт-проект – завершений цикл художньої діяльності, що спрямований на створення оригінального художнього твору в умовах обмеженого часу та ресурсів.

Це визначення вказує не тільки на цілісність проекту, але й підкреслює єдність проекту, його неповторність і ознаки новизни. Різноманіття проектів, з якими доводиться стикатися в реальному житті, надзвичайно велике. Вони можуть сильно відрізнятися за сферою реалізації, масштабами, тривалістю, складом учасників, ступенем складності тощо.

В теорії управління проектами термін «проект» є ключовим, і в керівництві РМВОК наведено таке визначення: «проект – це тимчасовий захід, призначений для створення унікальних продуктів, послуг або результатів» [10].

Згідно з методологією управління проектами кожний проект має такі характеристики:

- цільовий, тобто вся діяльність спрямована на досягнення певних результатів;
- унікальний, тобто проект повинен породжувати унікальні результати, інакше виробництво стає серійним;
- будь-який проект має чітко визначений час виконання;
- послідовність виконання етапів проекту;
- обмеженість по ресурсах [9].

Творчі проекти (арт-проекти) є цільовими та унікальними, оскільки на підставі задуму і теми художник визначає мету як прообраз бажаного художнього результату. Мета є центральною організуючою ланкою всієї діяльності митця. Але характерно, що в художній діяльності мета дуже рухлива, пластична. Спочатку художник має часом цілком конкретну мету, але надалі «рука веде» зовсім в інший бік, ніж передбачалося. Або ж письменники кажуть, що під пером їх персонажі починають «жити своїм самостійним життям» і також відводять від намічених спочатку сюжетних ліній. У творчій діяльності надзвичайно велика роль імпровізації, яка й «веде» творця від спочатку наміченої мети. Проте мета, хоча й трансформується в процесі створення творчого образу, але вона невідлучно присутня в свідомості автора і саме вона веде його до бажаного результату.

Унікальність арт-проектів полягає в персоніфікації продукту проекту. Кожний твір є невід'ємним від автора (митця, художника), що створив його. Крім того, що в мистецтві автор у процесі створення продукту проекту

викладає емоції, чуттєвість, унікальності арт-проекту додає також і те, що емоційним є не тільки сам художник, але також йому співпереживає читач, слухач, глядач; емоційний момент є характеристикою суб'єкта мистецтва взагалі. Мистецтво являє собою особистісне відображення дійсності [11].

Творчий проект є тимчасовим, оскільки в нього є чіткий початок і чітке завершення, коли досягнуті цілі проекту, що були поставлені на меті.

Обмеженість по ресурсах в арт-проектах полягає в тому, що є обов'язковими специфічні вимоги до ресурсів, до умов реалізації та використання специфічних технологій. Ресурси (матеріал) в художній діяльності – це речова «плоть» мистецтва, яка необхідна художнику в процесі творчості: граніт, сангіна, театральний реквізит, сцена або знімальний майданчик і т.д. Матеріал захоплює, обіцяє, вабить художника, збуджує його уяву і творчий імпульс його персоналізованої людської сутності, але ставить певні межі, пов'язані з його можливостями. Цей зв'язок матеріалу і умовностей, що накладається мистецтвом, оцінюється художниками як болісне обмеження, сковує уяву і як джерело радості майстра, який здобув перемогу над негіддливим матеріалом. Вибір матеріалу визначається індивідуальними особливостями художника і конкретним задумом, а також рівнем загальних видових формально-технічних можливостей і стильних спрямувань мистецтва в ту чи іншу епоху. Засоби художньої діяльності можуть бути виділені в стандартні класи ресурсів проектної діяльності: матеріально-технічні засоби, інформаційні, мовні засоби, логічні, математичні засоби. Однак у художній діяльності вони набувають зовсім іншого звучання, дивуючи своїм багатством і різноманітністю. Таким чином, говорячи про ресурси та засоби художньої діяльності, необхідно відзначити істотну специфічну особливість застосування засобів у художній діяльності. Поєднання засобів породжує новий, якісно інший «комплексний» засіб, неповторний у його своєрідності.

Однією з головних особливостей творчих проектів є дуже високий ступінь ризику невдачі. Через те, що художній образ, який створюється художником, є суб'єктивним і за своєю природою не до кінця конкретним, під час діалогу між автором та «споживачем» художнього образу завжди існує ризик непо-

розуміння. Виникнення можливості такого непорозуміння та неприйняття обумовлене певними суб'єктивними та об'єктивними причинами. Суб'єктивні: автор намагався проявити оригінальність свого сприйняття світу, а публіка, мистецька громадськість його «не зрозуміла». Об'єктивні причини, наприклад, – відмінності естетичного сприйняття різних соціальних груп. Також це й індивідуальні особливості різних людей щодо сприйняття художніх образів та ін. У будь-якому випадку художня діяльність завжди пов'язана з порівняно високим ступенем ризику нерозуміння, невизнання. І ця обставина накладає підчас суворий відбиток на психіку художника. Але це «зовнішнє» нерозуміння. В діяльності художника часто виникає так зване «внутрішнє» нерозуміння самого себе – виникають творчі кризи. Деякі художники в період творчої кризи «опускають руки». Інші болісно шукають «себе нового» і, врешті-решт, досягають нових висот.

Висновки. Отже, були виділені такі специфічні особливості арт-проектів:

- мета творчого проекту є дуже рухливою та пластичною (проте вона постійно присутня в свідомості автора і веде його до бажаного результату);
- персоніфікація продукту проекту;
- особливі вимоги до ресурсів (до матеріальних засобів, до умов реалізації, власне до виконавця, його індивідуальних особливостей);
- високий ступінь ризику в зв'язку з суб'єктивним сприйняттям продукту арт-проекту.

Як бачимо, творча діяльність цілком підпадає під визначення проекту і, таким чином, проектний підхід з успіхом може бути використаний в арт-сфері.

Список літератури

1. Розин В. М. Философия образования: этюды-исследования / В. М. Розин. – М. : Изд-во Моск. психолого-соц. ин-та ; Воронеж : Изд-во НПО «МОДЭК», 2007. – 576 с.
2. Булавина Д. М. Проектная деятельность в сфере культуры как механизм реализации культурной политики : дис. ... канд. культурологических наук : 24.00.01 / Булавина Дина Маратовна. – Москва, 2007. – 167 с.
3. Луков В. А. Социальное проектирование : учеб. пособие / В. А. Луков. – М. : Изд-во

Моск. гуманит.-соц. академии Флинта, 2007. – 240 с.

4. Бестужев-Лада И. В. Прогнозное обоснование социальных нововведений / И. В. Бестужев-Лада. – М. : Наука, 1993. – 240 с.
5. Лавринова Н. Н. Видовое многообразие искусства / Н. Н. Лавринова // Аналитика культурологии. – 2010. – № 1 (16). – С. 162–171.
6. Лисаковский И. Н. Художественная культура. Термины. Понятия. Значения : словарь-справочник / И. Н. Лисаковский. – Изд-во «РАГС», февраль 2003. – 240 с.
7. Абрамов Е. Г. Принципы управления творческим процессом в коллективе коммерческой фирмы [Электронный ресурс] / Е. Г. Абрамов // Креативная экономика. – 2012. – № 3 (63). – С. 58–62. – Режим доступа : <http://bgscience.ru/lib/4678/>
8. Харченко К. В. Управление проектами в сфере культуры [Электронный ресурс] / К. В. Харченко // справочник руководителя учреждения культуры. – 2014. – № 6. – С. 18–27. – Режим доступа : <http://www.cultmanager.ru/article/4455-upravlenie-proektami-v-sfere-kultury?ustp=W>
9. Управление проектами : учеб. пособие / И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге ; под ред. проф. И. И. Мазура. – М. : Омега-Л, 2003. – 664 с.
10. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК). – 5-е изд. – 2013. – С. 590.
11. Андреев А. Л. Место искусства в познании мира / А. Л. Андреев. – М. : Политиздат, 1980. – 256 с.

References

1. Rozin, V. M. (2007) Philosophy of education: Sketch-studies. Moscow: Izd-vo Mosk. psikhologo-sots. in-ta; Voronezh: Izd-vo NPO "MODEK", 576 p. [in Russian].
2. Bulavina, D. M. (2007) Project activities in the sphere of culture as a mechanism of cultural policy implementation: thesis of Ph.D. in Culturology: 24.00.01. Moscow, 167 p. [in Russian].
3. Lukow, V. A. (2007) Social designing. Moscow: Izd-vo Mosk. humanit.-sots. akademiya Flinta, 240 p. [in Russian].

4. Bestuzhev-Lada, I. V. (1993) Predictive substantiation of social innovations. Moscow: Nauka, 240 p. [in Russian].
5. Lavrinova, N. N. (2010) Specific variety of arts. *Analitika kulturologiyi*, No. 1 (16), pp. 162–171 [in Russian].
6. Lisakovskiy, I. N. (2003) Art culture. Terms. Concepts. Values. Izd-vo "RAGS", February, 240 p. [in Russian].
7. Abramov, Ye. G. (2012) Principles of management by constructive process in commercial firm group. *Kreativnaya ekonomika*, No. 3 (63), pp. 58–62, available at: <http://bgscience.ru/lib/4678/>
8. Kharchenko K. V. (2014) Project management in culture. *Spravochnik rukovoditelya ucherezhdniya kultury*, No. 6, pp. 18–27, available at: <http://www.cultmanager.ru/article/4455-upravlenie-proektami-v-sfere-kultury?ustp=W>
9. Mazur, I. I., Shapiro, V. D. and Olderogge, N. G. (2003) Project management. Moscow: Omega-L, 664 p. [in Russian].
10. Guidance to the Code of knowledge on project management (PMBOK guidance) (2013), 5th ed., p. 590 [in Russian].
11. Andreyev, A. L. (1980) The place of art in the world study. Moscow: Politizdat, 256 p. [in Russian].

D. V. Bas, *postgraduate student*

e-mail: dima_bas1990@mail.ru

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

ART PROJECTS, THEIR FEATURES AND DEFINITIONS

The major art forms include fine art that consists of painting, drawing, sculpture and artistic photo. Artistic images are created in a plane or a space and characterized by visual details and the immutability of time. A picture, color, plastic art, shade that allow to create visible images of objects are specific art means of fine art. They are unique in every kind of fine arts.

So, speaking about creative project, it can be regarded as relatively isolated internally coherent kind of activity, which is based, on the one hand, on innovative idea or technology, and on the other hand, on a clear algorithm of goal-related tasks, activities, resources, performers and performance indicators.

By analogy with classical definition, the definition of an art project is introduced. Art project is a completed cycle of artistic activity that aims to create an original work of art in a limited time and with limited resources. During the research specific features of art projects, such as: the purpose of creative project, which is very mobile and plastic; the personification of project product; specific requirements to resources (to material means, to the terms of realization, in fact, to the artist, to his personal characteristics); high risk due to subjective perception of art project product, are highlighted. The conclusion concerning the possibility of the use of project-based approach to project management in creative environment is made.

Keywords: *art, project, art- project, creative project, project approach.*

Рецензенти: О. Б. Данченко, д.т.н., доцент,

О. В. Коломицева, д.е.н., професор

І. М. Найдьонов, аспірант

e-mail: samogot@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033, Україна

ПРОБЛЕМА ГОЛОСОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛІННЯ ДИСТРИБУЦІЄЮ

Стаття присвячена проблемі автоматизації голосової взаємодії в задачах управління дистрибуцією. Проведено аналіз вітчизняних та зарубіжних літературних джерел для пошуку шляхів використання можливостей голосового управління для оптимізації процесів дистрибуції за трьома напрямками: системи управління дистрибуцією, системи розпізнання голосу та системи голосової взаємодії. Пропонується інтегративна модель, в якій поєднується принцип написання дерева можливих сценаріїв взаємодії та рефлекторна система голосового управління.

Ключові слова: голосове управління, голосова взаємодія, управління дистрибуцією, розпізнання мови.

Вступ. Дистрибуція – це діяльність, пов'язана з отриманням продукції, її зберіганням до моменту отримання замовлення і наступної доставки до клієнтів. Управління дистрибуцією включає в себе планування, організацію та контроль.

Інформаційні технології в управлінні дистрибуцією вже достатньо розроблені для забезпечення етапів отримання продукції та її збереження, отже нині найбільш інтенсивно відбувається розвиток етапу доставки продукції до кінцевих клієнтів. Зокрема розробляються системи автоматизації побудови планових маршрутів руху автотранспорту [1], системи керування транспортним парком (TMS) та моніторинг доставок у реальному часі.

Велику роль в управлінні дистрибуцією відіграють процеси голосової взаємодії, які наразі активно автоматизуються для підвищення ефективності, збереження ресурсів тощо. Голосова взаємодія поділяється на безпосередню та із залученням інформаційних технологій. Інформаційні технології в цьому контексті можуть слугувати лише засобом забезпечення зв'язку, що саме по собі може давати ефект, але найкращий результат можна отримати, якщо внести певні автоматизації голосової взаємодії.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Голосове управління вже має певну історію використання в транспортній сфері. Передові автоконцерни світу, такі як Ford Motor Company, BMW AG, Daimler AG, прагнуть підвищити безпеку та комфорт водія, тому створюють можливість керування бортовою електронікою за допомо-

гою голосу [2]. Перша подібна система, що мала назву Linguatronic, була представлена інженерами Mercedes в автомобілі S-класу в 1996 р. [3]. Вона реалізувала голосове управління функціями вбудованого телефону та адресної книги, радіо та CD-програвача, а також кондиціонера. Fiat, працюючи з Microsoft, розробив систему з ініціацією водієм Blue&Me, в якій перед початком мовної команди треба було натиснути кнопку на кермі. Інженери BMW також розробили систему з ініціацією водієм, що була інтегрована з їх системою управління бортовою електронікою iDrive. Honda, використовуючи систему розпізнання мови IBM ViaVoice, надала можливість керування GPS навігацією для голосового вказування адреси прибуття [4].

Крім того, за наявності достатньо потужної системи голосову взаємодію з водієм можна використовувати для підтримання діалогу під час руху вночі, аби не дати водію заснути [5].

Також проводилися дослідження з розробки систем мовного управління бортовим обладнанням літаків, але через високі вимоги до швидкості та якості розпізнання, особливо за наявності потужних шумів та перешкод, вони ще досі не були запроваджені [6].

Використання таких часткових функцій голосового управління, які підвищують комфорт водія, також повинно мати певний позитивний ефект. Проте ці функції не забезпечують оптимізації саме процесів дистрибуції.

У сучасних системах автоматизації дистрибуції, доставки і керування транспортним

парком достатньо розробленим є й процес автоматизації побудови планових маршрутів руху автотранспорту [1]. Він включає в себе складові врахування топології, часових параметрів точки доставки (часові вікна доступності та час, необхідний на обслуговування точки), завантаженість автомобіля, кількість доступного транспорту тощо. Проте проблема вчасного корегування маршруту у випадках, коли реальний стан справ перестає відповідати запланованому маршруту, викликає достатньо великі витрати часу на комунікацію. Якби ці функції реалізувалися за допомогою автоматизованої голосової взаємодії, це дало б максимальний ефект для покращення управління дистрибуцією.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є пошук шляхів використання можливостей голосового управління для оптимізації процесів дистрибуції, які не тільки підвищують комфорт водія, а й, фактично, дають змогу автоматизувати певні процеси управління дистрибуцією, покращуючи сервіс та знижуючи витрати.

Задача полягає в тому, щоб виокремити підходи, проаналізувати міжнародні здобутки, які вже отримані в різних галузях, для того щоб побудувати модель їх використання в автоматизації управління дистрибуцією на етапі доставки.

Матеріали та методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань було проведено теоретичний аналіз зарубіжних та вітчизняних досліджень і використано такі методи: логічного узагальнення, аналогій, порівняльного зіставлення та мисленнєвого моделювання.

1. Шляхи використання можливостей голосового управління для оптимізації процесів дистрибуції

1.1. Системи управління дистрибуцією. Перший етап дослідження полягає в огляді сучасних інструментів управління дистрибуцією та визначенні їх недоліків.

Для управління доставкою вантажів у дистрибуції вкрай важливим є етап моніторингу руху автомобілів у режимі реального часу. Це дозволяє аналізувати ефективність водія, а також передбачати певні небажані інциденти. Для такого моніторингу використовують GPS дані руху автомобіля [7, 8]. На жаль, лише GPS треку недостатньо для однозначного розуміння стану справ. З треку тільки й видно, що водій був біля точки доставки, але не зрозуміло, чи виконана доставка, чи з якихось

причин відмінена. З треку ясно, що за поточної швидкості водій відстає від плану та не встигає на наступну точку, але не зрозумілі причини відставання та чи має водій можливість надолужити втрачений час. Для отримання цієї інформації необхідна додаткова комунікація водія з диспетчером. Але телефонний дзвінок чи, ще гірше, комунікація через якийсь візуальний інтерфейс у смартфоні забирає певний час та знижує концентрацію уваги водія на дорозі, що може спричинити ДТП. Тому потрібна система, яка б дала змогу виявляти необхідну інформацію в голосових даних водія і відправляти її диспетчеру у формалізованому вигляді.

Найбільш подібна до цього система PickbyVoice [9]. Це система, що використовується в іншій сфері управління дистрибуцією – управлінні складськими процесами. Pick-by-Voice дає змогу відбірнику по черзі отримувати голосові команди у вигляді: де, що і в якій кількості треба відібрати, а також у формі діалогу повідомляти про необхідність повторити завдання чи переходити до наступного тощо. Така система дає можливість звільнити руки та очі відбірнику і в цілому збільшити його ефективність на 35 % [10].

На жаль, для управління транспортними доставками потрібна більш складна система, ніж наявні можливості Pick-by-Voice, адже вона повинна мати суттєво більший спектр необхідних для розпізнання команд. У передових системах управління міськими доставками вантажів (urban freight distribution) важливим параметром є часові вікна доставки [11]. Такий параметр зразу вводить цілу низку додаткової інформації, яку треба передати від водія до диспетчера – наскільки вчасно були виконані доставки, скільки часу було витрачено на кожну з них, відставання від плану внаслідок пробок або інших непередбачуваних обставин тощо. Більше того, система повинна забезпечувати взаємодію з диспетчером у режимі реального часу, а не відтворювати заданий заздалегідь перелік завдань.

Таким чином, очевидно стає необхідність упровадження системи голосової взаємодії між водієм та диспетчером для отримання необхідної інформації від водія в мовній формі та автоматизації управління дистрибуцією.

1.2. Системи розпізнання голосу.

Другий етап дослідження полягає в тому, щоб проаналізувати сучасні досягнення в системах

розпізнання мови і розглянути можливість їх використання в управлінні дистрибуцією.

Сучасні системи розпізнання мови в більшій своїй частині базуються на статистичних методах, використовують потужний апарат теорії ймовірностей та математичної статистики, що дає змогу суттєво підвищити якість розпізнання. Основні методи розпізнання мови – це приховані марківські моделі та штучні нейронні мережі [12, 13]. Але у сучасних системах більш поширеними є моделі на нейронних мережах, оскільки вони мають більшу швидкість та стійкість до шумів [14].

Звісно, на вхід до нейронної мережі не подають «сирий» звук – амплітуду коливань по часу, адже це не дуже інформативна форма представлення акустичного сигналу для аналізу. Більш інформативним є спектр сигналу, але на практиці найчастіше використовується мелперетворення, в якому звуковий сигнал нарізується на фрейми розміром 20–40 мс, спектр кожного з яких масштабується через банк фільтрів та логарифмується для отримання даних, найбільш наближених до людського сприйняття [15].

Існує досить багато таких систем і вони доволі якісно виконують свою задачу. Але в більшості своїй ці системи розраховані на роботу в приміщеннях без сильних шумів, залучення дикторів з чіткою вимовою і використання потужних комп'ютерів або віддалених серверів, як, наприклад, Google Voice Search. Та й ці системи неідеальні, в них не вирішені проблеми фільтрації шумів та розпізнання великих обсягів даних, обмежені можливості налаштування під різні умови та різних дикторів [16]. Так, наприклад, в системах мовного управління бортовим обладнанням літаків мінімальна можлива якість становить 95 %, а час розпізнавання не повинен перевищувати 0,2 с при темпі мовлення близько 100 слів за хвилину [17]. Навіть у рамках однієї системи розпізнавання ці параметри можуть змінюватися залежно від багатьох факторів, у тому числі таких, що визначаються умовами польоту, різними акустичними перешкодами, впливом пілотажних перевантажень тощо [6].

Фактично, ті досягнення, які сьогодні здобуті в традиційних системах розпізнання мови, вже можуть бути використані для забезпечення голосової взаємодії в управлінні дистрибуцією. Проте вони не в змозі повністю забезпечити автоматизацію голосової взаємодії

в задачах управління дистрибуцією, тому що немає можливості ані встановити в кабіні водія потужне обладнання, ані забезпечити стабільний та швидкісний доступ до Інтернету. Крім того, кабіна водія – це неконтрольоване акустичне середовище з високим рівнем шуму. Проблема багатодикторності також актуальна для дистрибуції, адже в таких компаніях зазвичай працює від кількох десятків до кількох сотень і навіть тисяч водіїв, в яких можуть бути дефекти вимови, різноманітні акценти та інші індивідуальні особливості мовлення.

1.3. Системи голосової взаємодії.

Третій етап дослідження полягає в пошуку інших ідей і методів, які дають можливість обійти обмеження класичних систем розпізнання мови. Аналіз розробок в галузі робототехніки та технологій управління дав змогу виявити такі перспективні напрями.

Японський дослідник з університету Осаки Ішігуро Хіроші з колегами вивчали різні аспекти комунікації та інформаційно-комунікаційних технологій, як, наприклад, використання комунікації з людиноподібними роботами як терапевтичної дії для людей похилого віку [18], аутистів [19] чи просто замкнених у собі людей, педагогічної дії щодо дітей та немовлят [20] тощо. Зокрема він проводив дослідження голосової комунікації двох людей опосередковано через комп'ютер [21].

У цьому дослідженні пара спілкувалася на загальні теми, обираючи варіанти своєї репліки із заздалегідь написаного дерева варіантів, свого роду сценарію. Жодному з партнерів не потрібно було нічого промовляти вголос: людині надавався набір з варіантів реплік на вибір, потрібно було лише натиснути на ту з них, яку б вона хотіла промовити, і ця репліка лунала з динаміків. Залежно від використаної репліки програма вибирала з дерева сценаріїв можливі варіанти відповідей і надавала їх на вибір співрозмовнику. Співрозмовник, у свою чергу, чуючи репліку першої людини, обирав свою з наданих варіантів. Це дослідження було спрямоване на подолання сором'язливості при спілкуванні з особами протилежної статі (що є особливо актуальним для Японії). Але такий підхід заздалегідь написаного дерева сценаріїв комунікації можна використовувати і в інших сферах.

У доповіді на світовому психологічному конгресі 2016 р. професор Ішігуро демонстрував використання цього сценарного підходу для роботів на виставках та в музеях. Щоб

уникнути необхідності розпізнавання голосу в шумному середовищі, поряд з експонатом ставиться людиноподібний робот та монітор, на якому показані варіанти запитань. Натискаючи на різні репліки, відвідувач може спілкуватися з роботом за заздалегідь написаним деревом сценаріїв, розпитуючи його про експонат, а робот буде відповідати голосом.

На жаль, для управління дистрибуцією постає зворотне завдання – водій має повідомити певну інформацію в систему і при цьому не повинен відволікатися на натискання кнопок на екрані. Тому пряме використання такої технології неможливе. Але застосування підходу описання всіх можливих сценаріїв комунікації залежно від контексту дозволить знизити кількість інформації, яку треба розпізнати, а отже й підвищити якість.

Наразі існує новий підхід до голосового управління, що базується на теорії несилової взаємодії [22], – рефлекторна система голосового управління [23]. Ідея, покладена в основу цього підходу, полягає в тому, щоб замість переведення голосової інформації в текстову репрезентацію, аналізувати безпосередньо інформаційну складову сказаного, визначаючи, яку з відомих реакцій потрібно виконати. «Традиційні системи розпізнавання мови базуються на принципі: «усна мова» → «репрезентація мови набором лінгвістичних конструкцій» → «розуміння мови». На основі теорії несилової взаємодії може бути запропонована інша модель розпізнавання природної мови: «усна мова» → «розрахунок несилової (інформаційної) взаємодії на реакції» → «реакція (розуміння чи поведінка)» [24].

Така модель розпізнавання називається рефлекторною, оскільки побудована за аналогією зі структурою умовного рефлексу, в якому виділяються афектори, центральний компонент та ефектори. Така модель може бути добре поєднана з ідеєю використання дерева сценаріїв, оскільки сценарії також складаються з реакцій, і одиницею моделювання стає не лінгвістична особливість мовлення, а реакція (або команда), яка може бути врахована автоматизованою системою розраховування маршрутів. Тобто, суть цього підходу полягає в тому, щоб перейти до іншої одиниці розпізнавання мови. У психології дискурсивного мислення і рефлексивній психології також накопичено досвід аналізу мови через виокремлення інших одиниць – функціональних висловлювань [25].

Оскільки в такій системі не потрібні словники, складні інтелектуальні моделі аналізу тексту та граматики, вони мають низку переваг порівняно з традиційними системами: багатодикторність, варіабельність природної мови, можливість обробки команд офлайн прямо на пристрої, робота в умовах шумів (не контрольованого акустично середовища), простота алгоритмів і менші складність та ціна реалізації [26].

У загальному випадку система рефлекторного голосового управління складається з трьох компонентів:

1. Фонемний стенограф

Відповідає за перетворення відцифрованого вхідного звукового сигналу, що поміщає усну мову в набір фонем або слів.

2. Ядро системи

Здійснює моделювання системи голосового управління. Містить програмну реалізацію всіх моделей, методів та алгоритмів системи, набір команд, протокол роботи, налаштування тощо.

3. База даних розпізнавання мови з можливістю навчання

Забезпечує зберігання інформаційної бази розпізнавання мови та виділення керуючого впливу. У базі даних зберігається статистика вхідних впливів та відповідних їм вихідних реакцій системи.

Варто зазначити, що модуль фонемного стенографа може бути забезпечений різними програмними засобами, що робить систему гнучкішою та більш адаптивною до умов середовища. А. В. Єгорченков [23] наводить перелік можливих модулів фонемного стенографа. Провівши порівняльне зіставлення стенографів з цього переліку, можна стверджувати, що найбільш прийнятним для задач дистрибуції є фонетичний стенограф на основі Julius speech recognition tool [27], тому що він у своїй роботі не потребує ні доступу до Інтернету, ні великих словникових баз, а дає на виході «сирі» фонemi (наприклад, «п ь й! А м а» для слова «Прямо»), які можуть навіть краще сприйматися рефлекторною системою для подальшого визначення інформаційного компонента, ніж розпізнані слова, через вищу (в останньому випадку) ймовірність помилки.

2. Модель голосової взаємодії в задачах управління дистрибуцією. У результаті аналізу виявлено два найбільш перспективні напрями, поєднання яких дає змогу запропонувати нове принципове рішення і побудува-

ти рефлекторну модель голосової взаємодії в задачах управління дистрибуцією. В основу моделі покладено логічні сценарії взаємодії на тему управління дистрибуцією, які мають враховувати параметри основних причин невідповідності реальної ситуації запланованому маршруту, наприклад, запізнення або відмови обслуговування на точці доставки тощо. Це дає змогу отримати інформацію для прийняття рішення про повернення вантажу на склад, про відміну чи відкладення обслуговування однієї точки доставки, щоб мати можливість встигнути на іншу, більш важливу, про зміну маршруту для об'їзду затору або про утворення нового маршруту з резервною машиною тощо.

Звичайно, абсолютно всі причини та параметри не можуть бути враховані заздалегідь, але пророблення й урахування основної типології дозволить приймати базові рішення і вдаватися до безпосереднього зв'язку з диспетчером лише у складних випадках, що розвантажить водія та канали комунікації і дасть змогу підвищити загальну ефективність дистрибуції.

Найбільш ефективним шляхом пророблення дерева сценаріїв рефлекторної взаємодії є використання вхідних параметрів вже створеної системи автоматизації дистрибуції, у тому числі автоматичної побудови маршрутів [28], яка нині проходить широку експериментальну апробацію. Інтеграція модуля голосової взаємодії з цією системою буде значно спрощена, що сприятиме отриманню кращого економічного ефекту.

Виходячи з наявної логіки побудови маршрутів, вже зараз можна назвати принципові блоки сценаріїв, які потрібно буде розробити. Першим етапом, на якому можуть виникнути проблеми розбіжності плану і факту, є етап завантаження на складі (якщо, наприклад, буде виявлено невраховане перевантаження або недовантаження машини, будуть відсутні необхідні товари чи працівники складу не встигнуть їх вчасно відібрати, або навіть виявиться, що машина не здатна вийти на маршрут (наприклад, не заводиться на морозі)).

Другий етап сценаріїв голосової взаємодії визначають проблеми, що можуть виникнути в дорозі до певної точки доставки, як, наприклад, ремонт в дорозі за маршрутом руху або зміни в правилах руху на деяких вулицях, які ще не відбиті в алгоритмах прокладення маршруту (нові заборони поворотів чи односторонній рух), проблеми з автомобілем на

дорозі, які призводять до зниження швидкості або відмови в подальшому русі за маршрутом, або найбільш поширена проблема заторів на дорогах.

Третій етап сценаріїв голосової взаємодії викликаний можливими невідповідностями між планом та фактом в обслуговуванні на точці доставки. Це можуть бути як проблеми з боку клієнта («нікого немає вдома», клієнт не має грошей, клієнт відмовляється від замовлення чи стверджує, що він замовляв щось інше), так і проблеми з боку водія (запізнення на точку доставки, тобто непотрапляння в заплановане дозволене часове вікно доступності, пошкодження товару тощо). Найбільш поширеною є ситуація, коли водій проводить у точці доставки більше часу, ніж заплановано, що призводить до проблем на всьому подальшому маршруті.

Ці та інші інциденти на всіх зазначених етапах, що зображені в моделі на схемі (рис. 1), потребують вирішення із залученням диспетчера для вибору найкращої стратегії і мінімізації втрат через проблему. Відповідно дерево сценаріїв голосової взаємодії повинне відбивати всі три етапи та типові відомі проблеми і способи їх розв'язання.

Модель голосової взаємодії суб'єктів дистрибуції (рис. 1) складається з трьох етапів, два останніх з яких можуть циклічно повторюватися при наявності кількох точок доставки в маршруті. Стрілками позначено процеси голосової взаємодії, які можуть розгортатися на кожному з етапів при невідповідності плану та факту. У верхній та нижній частинах схеми показані принципові типи результатів голосової взаємодії для кожного з суб'єктів (диспетчера та водія). Ця логічна схема визначає принциповий алгоритм побудови дерева сценаріїв голосової взаємодії.

Висновки. Проведено аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел для пошуку шляхів використання можливостей голосового управління з метою оптимізації процесів дистрибуції за трьома напрямками: системи управління дистрибуцією, системи розпізнання голосу та системи голосової взаємодії.

Виявлено обмеження інструментів GPS контролю, які використовуються в системах управління дистрибуцією на етапі моніторингу доставки, але не відбивають причин відхилення реальної ситуації від запланованого маршруту. Саме на подолання цих обмежень має бути спрямована система голосової взаємодії в задачах управління дистрибуцією.

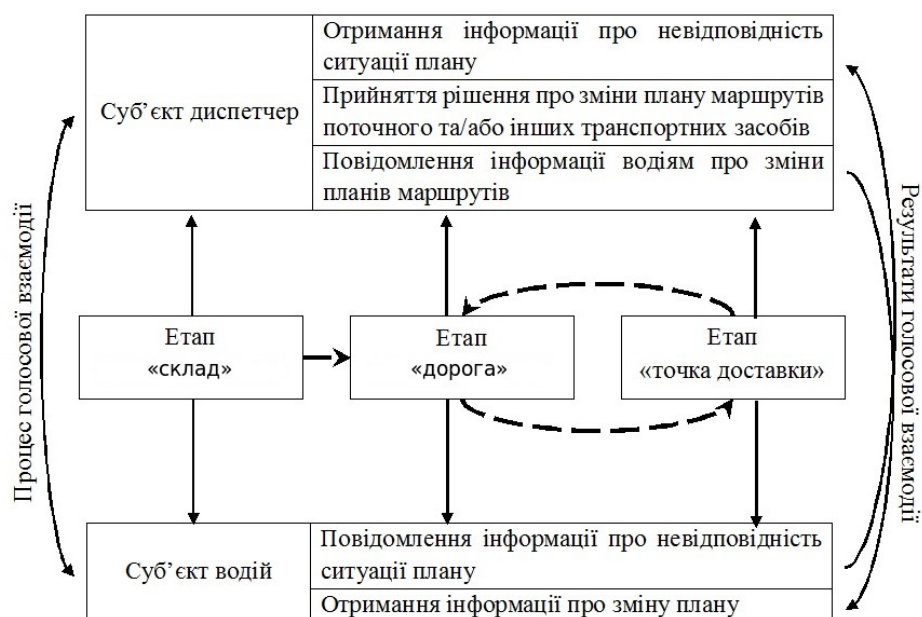


Рис. 1. Модель голосової взаємодії суб'єктів дистрибуції

Наявні традиційні системи розпізнання голосу на основі нейронних мереж та прихованих марківських моделей не забезпечують необхідного для задач дистрибуції рівня стійкості до шумів, багатодикторності та потребують потужного обладнання або стабільного доступу до Інтернету.

Нові принципи розв'язання проблеми – перехід до іншої одиниці розпізнання мови (рефлексу або команди) та побудова дерева можливих сценаріїв взаємодії для зменшення кількості необхідних до розпізнання команд залежно від контексту ситуації.

Таким чином, пропонується інтегративна рефлекторна модель голосової взаємодії в задачах управління дистрибуцією, в якій поєднуються два сформульовані принципи: написання дерева можливих сценаріїв взаємодії та рефлекторна система голосового управління.

Перспективою подальшого дослідження є розробка програмного забезпечення, яке реалізуватиме запропоновану модель та інтегруватиметься з існуючою авторською системою автоматизації побудови маршрутів і управління дистрибуцією.

Список літератури

1. Найдьонов І. М. Топологічна евристика в розв'язанні проблеми маршрутизації транспортних засобів / І. М. Найдьонов // ScienceRise. – 2015. – Т. 11, № 6. – С. 52–58. – DOI: 10.15587/2313-8416.2015.44381.

2. Кравченко А. П. Автоматизированная компьютерная система голосового управления автомобилем / Кравченко А. П., Крамарь Н. М., Морозов И. В. // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 44–47.
3. Heisterkamp P. Linguatronic product-level speech system for mercedes-benz cars / P. Heisterkamp // Proceedings of the first international conference on human language technology research. – San Diego: Association for Computational Linguistics, 2001. – С. 1–2. – (HLT '01). – DOI: 10.3115/1072133.1072199.
4. Jonsson I.-M. Social and emotional characteristics of speech-based in-vehicle information systems: impact on attitude and driving behaviour / I.-M. Jonsson. – Linköping: Linköping University Electronic Press, 2009. – 193 p.
5. Кравченко А. П. Автоматизированная компьютерная система для интерактивного общения с водителем / А. П. Кравченко, Т. М. Терещенко, И. В. Морозов // Автомобильный транспорт. – 2012. – № 30. – С. 54–58.
6. Экспериментальное исследование влияния акустических помех разных видов на результаты автоматического распознавания речевых команд / О. Н. Корсун, А. А. Яцко, И. М. Финаев, В. Я. Чучупал // Наука и образование: науч. изд-е МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2013. – Т. 01. – С. 12.

7. GPS-based data production in urban freight distribution / J. Gonzalez-Feliu, P. Pluvinet, M. Serouge, M. Gardrat. – Nova Science. – 06.2013.
8. Comendador J. A. A GPS analysis for urban freight distribution / J. A. Comendador, M. E. López-Lambas, A. Monzón de Cáceres // The Seventh International Conference on City Logistics. – E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM), 06.2012. – DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.03.127.
9. Pick-to-Voice. Increased productivity, accuracy and flexibility [Electronic resource] / Dematic Global Website. – Mode of access: <http://www.dematic.com/en/supply-chain-solutions/bytechnology/voice-and-light-systems/pick-to-voice/>
10. Baumann H. Order picking supported by mobile computing / H. Baumann. – Bremen : University of Bremen, 2012. – 190 p.
11. Quak H. Urban distribution: the impacts of different governmental time-window schemes / H. Quak, R. de Koster; Erasmus Research Institute of Management (ERIM). – 09.2006. – 15 p.
12. Маковкин К. А. Гибридные модели: скрытые марковские модели и нейронные сети, их применение в системах распознавания речи / К. А. Маковкин // Модели, методы, алгоритмы и архитектуры систем распознавания речи. – М., 2006.
13. Гефке Д. А. Применение скрытых марковских моделей для распознавания звуковых последовательностей / Д. А. Гефке, П. М. Зацепин // Известия Алтайского государственного университета. – Барнаул, 2012.
14. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition / G. Hinton, L. Deng, D. Yu et al. // IEEE, SIGNAL PROCESSING MAGAZINE. – 2012.
15. Saini P. Automatic speech recognition: a review / P. Saini, P. Kaur // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2013. – Т. 4, № 2.
16. Волков А. В. Анализ существующих методов распознавания на инвариантность к фоновым помехам и дикции диктора / А. В. Волков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – Т. 9–2. – С. 6. – DOI: 10.14489/vkit.2016.05.pp.021-028.
17. Бондарос Ю. Г. Система распознавания команд речевого интерфейса пилота для интегрированной модульной авионики / Ю. Г. Бондарос, К. А. Маковкин, В. Я. Чучупал // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2007. – Т. 4. – С. 2–13.
18. Nishio S. Using androids to provide communication support for the elderly / S. Nishio, T. Minato, H. Ishiguro // New Breeze. – 2015, Oct. – Т. 27, № 4. – P. 14–17.
19. Robot-mediated interventions for social anxiety in individuals with autism spectrum disorder / H. Kumazaki, Y. Yoshikawa, Y. Matsumoto et al. // 2016 International Meeting for Autism Research. – 05.2016. – P. 270–271. – (IMFAR 2016).
20. Do infants consider a robot as a social partner in collaborative activity? / Y. Park, S. Itakura, A. M. Henderson et al. // Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Agent Interaction. – Daegu, Kyungpook, Republic of Korea : ACM, 10.2015. – P. 91–95. – (HAI '15). – DOI: 10.1145/2814940.2814953.
21. Ishiguro H. Adaptation to teleoperated robots / H. Ishiguro // International Journal of Psychology. – 2016. – Т. 51. – P. 10–10. – DOI: 10.1002/ijop.12361.
22. Тесля Ю. М. Введение в информатику природы / Ю. М. Тесля. – К. : Маклаут, 2010. – 255 с.
23. Егорченков А. В. Прикладное применение рефлекторной системы голосового управления / А. В. Егорченков // Управление развитием складных систем. – К., 2016. – № 25. – С. 103–107.
24. The non-force interaction theory for reflex system creation with application to TV voice control / I. Teslia, N. Popovych, V. Pylypenko, O. Chornyi // Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – 2014. – С. 288–296. – DOI: 10.5220/0004754702880296.
25. Найдьонов М. І. Формування системи рефлексивного управління в організаціях / М. І. Найдьонов. – К. : Міленіум, 2008. – 484 с.
26. Тесля Ю. М. Рефлекторная система голосового управления техническими устройствами (РСГУ) / Ю. М. Тесля, О. Чорний // Управление развитием складных систем. – К., 2013. – № 15. – С. 105–110.
27. Пилипенко В. В. Распознавание ключевых слов в потоке речи при помощи фонетического стенографа / В. В. Пилипенко // Речевые технологии. – 2009. – № 1. – С. 75–79.

28. Математичний сервер автоматичної побудови логістичних маршрутів: а.с. 60788 Україна / І. М. Найдьонов. – № 61210 ; заявл. 25.05.2015 ; зарег. 23.07.2015 ; опубл. 30.10.2015, Бюл. № 38. – 2 с.

References

1. Nayd'onov, I. M. (2015) Topologic euristics in solving the problem of vehicles routing. *ScienceRise*, 11 (6), pp. 52–58, DOI:10.15587/2313-8416.2015.44381 [in Ukrainian].
2. Kravchenko, A. P., Kramar, N. M. and Morozov, I. V. (2009) Automated computer system of vehicle voice control. *Avtomobil'nyj transport*, (25), pp. 44–47 [in Russian].
3. Heisterkamp, P. (2001). Linguatronic product-level speech system for mercedes-benz cars. In: *Proceedings of the first international conference on human language technology research*, (HLT '01). San Diego: Association for Computational Linguistics, pp. 1–2, DOI:10.3115/1072133.1072199.
4. Jonsson, I.-M. (2009) Social and emotional characteristics of speech-based in-vehicle information systems: impact on attitude and driving behaviour. Linköping: Linköping University Electronic Press, 193 p.
5. Kravchenko, A. P., Tereshhenko, T. M. and Morozov, I. V. (2012) Automated computer system for interactive communication with a driver. *Avtomobil'nyj transport*, (30), pp. 54–58 [in Russian].
6. Korsun, O. N., Jacko, A. A., Finaev, I. M. and Chuchupal, V. Ja. (2013) Experimental research of the impact of acoustic noises of different kinds on the results of automated recognition of voice commands. *Nauka i obrazovanie: nauch. izd-e MGTU im. N. E. Bauman*, (01), p. 12 [in Russian].
7. Gonzalez-Feliu, J., Pluvinet, P., Serouge, M. and Gardrat, M. (2013) GPS-based data production in urban freight distribution. *Nova Science*.
8. Comendador, J. A., López-Lambas, M. E. and Monzón de Cáceres, A. (2012) A GPS analysis for urban freight distribution. In: *The seventh international conference on city logistics*. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). DOI:10.1016/j.sbspro.2012.03.127.
9. Pick-to-Voice. Increased productivity, accuracy and flexibility, available at: <http://www.dematic.com/en/supply-chain-solutions/by-technology/voice-and-light-systems/pick-to-voice/>
10. Baumann, H. (2012) Order picking supported by mobile computing. Bremen: University of Bremen, 190 p.
11. Quak, H. and Koster, R. de. (2006) Urban distribution: the impacts of different governmental timewindow schemes. Erasmus Research Institute of Management (ERIM), 15 p.
12. Makovkin, K. A. (2006) Hybrid models: latent markovian models and neural networks, their application in voice recognition systems. *Modeli, metody, algoritmy i arhitektury sistem raspoznavanija rechi*. Moscow [in Russian].
13. Gefke, D. A. and Zacepin, P. M. (2012) Application of latent markovian models for recognition of voice sequences. *Izvestija Altaj. gos. un-ta*. Barnaul [in Russian].
14. Hinton, G., Deng, L., Yu, D. et al. (2012) Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition. *IEEE, SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*.
15. Saini, P. and Kaur, P. (2013) Automatic speech recognition: a review. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 4 (2).
16. Volkov, A. V. (2014) The analysis of existing methods for invariance recognition to background noise and speaker's diction. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, (9–2), p. 6, DOI:10.14489/vkit.2016.05.pp.021-028 [in Russian].
17. Bondaros, Ju. G., Makovkin, K. A. and Chuchupal, V. Ja. (2007) The system of recognition of pilot's speech interface for integrated modular avionics. *Vestnik kompjuternyh i informacionnyh tehnologij*, (4), pp. 2–13 [in Russian].
18. Nishio, S., Minato, T. and Ishiguro, H. (2015) Using androids to provide communication support for the elderly. *New Breeze*, 27 (4), pp. 14–17.
19. Kumazaki, H., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y. et al. (2016) Robot-mediated interventions for social anxiety in individuals with autism spectrum disorder. In: *2016 International Meeting for Autism Research (IMFAR 2016)*, pp. 270–271.
20. Park, Y., Itakura, S., Henderson, A. M. et al. (2015) Do infants consider a robot as a social partner in collaborative activity? In: *Proceedings of the 3rd International*

- Conference on Human-Agent Interaction (HAI '15)*, pp. 91–95. Daegu, Kyungpook, Republic of Korea: ACM. DOI:10.1145/2814940.2814953.
21. Ishiguro, H. (2016) Adaptation to teleoperated robots. *International Journal of Psychology*, (51), p. 10–10. DOI:10.1002/ijop.12361.
22. Teslia, Yu. M. (2010) Introduction in nature informatics. Kyiv: Maklout, 255 p. [in Ukrainian].
23. Egorchenkov, A. V. (2016) Applied use of reflex system of voice control. *Upravlinnya rozvytkom skladnyh system*, (25), pp. 103–107 [in Russian].
24. Teslia, I., Popovych, N., Pylypenko, V. and Chornyi, O. (2014) The non-force interaction theory for reflex system creation with application to TV voice control. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pp. 288–296. DOI: 10.5220/0004754702880296.
25. Nayd'onov, M. I. (2008) Formation of reflex control system in organizations. Kyiv: Milenium, 484 p. [in Ukrainian].
26. Teslja, Ju. M. and Chornyj, O. (2013) Reflex system of voice control of technical devices (RSGU). *Upravlinnya rozvytkom skladnyh system*, (15), pp. 105–110 [in Russian].
27. Pilipenko, V. V. (2009) Recognition of key words in the flow of speech with the help of phonetic stenographer. *Rechevyvye tehnologiyi*, (1), pp. 75–79 [in Russian].
28. Nayd'onov, I. M. (2015) Mathematical server for automatic construction of logistic routes. No. 60788. Ukraine [in Russian].

I. M. Naydonov, postgraduate student

e-mail: samogot@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv
Volodymyrska str., 60, Kyiv, 01033, Ukraine

THE PROBLEM OF VOICE INTERACTION IN DISTRIBUTION MANAGEMENT TASKS

The problem of automation of voice interaction in distribution management tasks is analyzed in the article. The main goal is to analyze domestic and foreign experience and single out ways for the use of voice control capabilities to optimize distribution processes in three areas: distribution management systems, voice recognition systems and voice interaction systems. The limits of GPS monitoring systems, which are used to control delivery processes, but do not reflect the causes of real situation deviation from the planned route, are discovered. To overcome these limits, the direction of voice interaction system for management tasks in distribution is offered. Available traditional voice recognition systems based on neural networks and hidden Markov models do not provide the required level for distribution because of resistance to noise, they require powerful hardware or stable access to the Internet. Two new principles of resolving the problem – the transition to another speech recognition unit and building a tree of possible scenarios of interaction to reduce the amount necessary to recognize commands, depending on the context of the situation, are offered. Thus, integrative model of reflex voice interaction in distribution management, which combines two articulated principles, is offered. The prospect of further research is to develop a software, which will be realized in proposed model, and to integrate it with existing authoring system of automation routing.

Keywords: voice control, voice interaction, distribution management, speech recognition.

Рецензенти: А. О. Білощизький, д.т.н., професор,

Ю. В. Триус, д.пед.н., к.ф.-м.н., професор

В. М. Манько, к.т.н, доцент,

e-mail mankovm@ukr.net

В. М. Зотов, аспірант

e-mail zotov_vetal@ukr.net

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ІЗОЛЯЦІЇ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОЛІГРАФІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті запропоновано способи дослідження та контролю стану ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів. Побудована фізична модель ізоляції дає можливість визначати внутрішні напруження, незалежно від фізико-механічних характеристик просочувального матеріалу. Охарактеризовано основні процеси, що визначають кінетику старіння і пошкодження ізоляції.

Ключові слова: міжвиткова ізоляція, емалева плівка, полімер, адгезія, пробивна напруга, внутрішні напруження

Вступ. Приблизно 70 % виробленої електроенергії перетворюється в механічну за допомогою електродвигунів. Найбільше застосування знаходять асинхронні електродвигуни, встановлена потужність яких становить близько 200 млн. кВт. Тому навіть незначне підвищення енергетичних показників асинхронних двигунів якоюсь мірою допоможе вирішенню проблеми не тільки зниження споживання електроенергії, але й енергозбереження та екології. Промисловість, сільське господарство, транспорт і побут забезпечуються електродвигунами загального призначення в повному обсязі.

Для приводу поліграфічних машин та комплексів в основному застосовуються електродвигуни серії 4А та 4АМ. За останні роки розроблено і прийнято більш високі вимоги до якості й надійності електричних машин. Передбачається, що ці вимоги будуть виконані з застосуванням більш ефективних матеріалів. Важлива роль у підвищенні надійності відводиться електроізоляційним матеріалам і конструкціям електричної ізоляції. Система ізоляції електричної машини або серії машин може бути описана показниками надійності так, що, розглядаючи систему ізоляції електричної машини, можна встановити режим і умови її використання [1, 3]. Дослідженню підлягають електричні машини з обмотками з емальованого дроту, просоченими компаундами або лаками.

Фізико-механічні параметри просочувальних матеріалів суттєво впливають на працездатність міжвиткової ізоляції електродви-

гунів. Для більшості електричних машин показники системи ізоляції визначають їх безвідмовність. Тому вивчення і дослідження фізико-механічних властивостей полімерної міжвиткової ізоляції і виникнення дефектів у ній мають велике значення в забезпеченні надійності електричних машин поліграфічних комплексів [2, 4, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математична теорія надійності і сучасні методи планування та обробки результатів експерименту ще не достатньо добре відомі дослідникам і споживачам електроізоляційних матеріалів. Основним недоліком підходу до дослідження властивостей матеріалів є те, що основна увага приділяється їх електроізоляційним характеристикам. Не враховувався комплекс фізико-механічних характеристик, з допомогою яких можна вивчати і прогнозувати поведінку матеріалів у конструкціях електричних машин. До цього часу не розроблені методи розрахунку довговічності й надійності ізоляції, які б базувалися на знанні фізики процесів її пошкодження, відсутній математичний апарат отримання числових значень. Не вивчені процеси розтріскування і відмови ізоляції в процесі теплового старіння.

Постановка завдання дослідження. Основною причиною пошкодження міжвиткової ізоляції електричних машин є внутрішні напруження. Під їх дією у міжвитковій ізоляції утворюються різні дефекти, які й зменшують пробивну напругу в процесі експлуатації. Після просочування зі збільшенням товщини шару полімеру на дроті внутрішні напружен-

ня в емалевій плівці збільшуються. В цьому випадку слід очікувати зменшення терміну служби ізоляції, і зменшення буде тим більшим, чим товща і жорсткіша емалева плівка. На основі цих припущень необхідно побудувати фізичну модель ізоляції статорних обмоток електричних машин та провести розрахунок внутрішніх напружень.

Метою роботи є побудова і дослідження фізичної моделі ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів із визначенням їх внутрішніх напружень.

Виклад основного матеріалу дослідження. При побудові фізичної моделі ізоляції обмотки приймаються лише основні параметри обмотки та її компоненти.

Прийнято такі припущення:

- пазові частини обмотки можуть бути представлені лінійно;
- в армованій системі циліндричних мідних стержнів простір між ними повністю заповнено полімерним матеріалом (рис. 1);
- стержні розташовані так, що їх осі паралельні і розглядаються як абсолютно жорсткі тіла, так, як модуль пружності металів значно більший за модуль пружності відомих просочувальних матеріалів і емалевих плівок.

Враховуючи, що фізико-механічні параметри просочувальних матеріалів і емалевих плівок порівняно з міддю відносно близькі і суттєво відрізняються від параметрів металевих стержнів, міжвиткову ізоляцію в цій моделі можна розглядати як однорідне середовище.

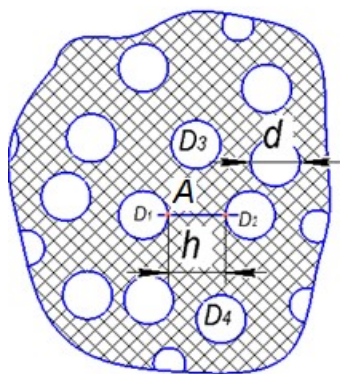


Рис. 1. Поперечний переріз пазової частини статорних обмоток

Крім того, вважається, що охолодження або нагрівання обмотки відбувається в установленому тепловому режимі з дуже малим переходом температури по довжині обмотки.

На рис. 1 зображено спрощену схему поперечного перерізу пазової частини статорних обмоток. Дроти діаметром d розділені ізоляційним проміжком, який складається з двох шарів емалі і шару просочувального матеріалу. Товщина ізоляційного проміжку між двома сусідніми дротами умовно характеризується відстанню між поверхнями дротів – величиною h . Розглянемо довільно вибрані два сусідні дроти D_1 і D_2 . Разом із дротами D_3 і D_4 вони утворюють відповідну комірку. Напружений стан полімеру всередині комірки обумовлено взаємним впливом чотирьох дротів D_1, D_2, D_3 і D_4 . Вплив інших дротів не беремо до уваги, тому що напруження в полімері різко зменшується при віддаленні від поверхні дроту. Приймається той факт, що для полімерів існує температура T_c , при якій напруження в полімері наближається до нуля. Зі зниженням температури від T_c до $T_{розр.}$ напруження зростають пропорційно різниці температур $\Delta T = T_c - T_{розр.}$

Напружений стан полімеру в такій системі характеризується напруженнями всебічного розтягу в центральних областях комірок, а також радіальними напруженнями стиску σ_r , тангенціальними σ_θ і осьовими σ_z напруженнями розтягу в усіх точках на поверхні розділу дріт-полімер. Напруження досягають максимальних значень у проміжку між двома сусідніми дротами на лінії, що з'єднує їх центри, в точці A (рис. 1). При малих віддальх між дротами, коли h менше $0,1d$, радіальна складова напружень може змінювати свій знак на протилежний. При дотику дротів між собою полімерне середовище по всьому об'єму буде характеризуватись загальним розтягом.

Складові напружень σ_r , σ_θ і σ_z в точці A перетину поверхонь дротів можуть бути визначені відповідно до виразів

$$(\sigma_r) = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T \left\{ \frac{B_0\pi}{2\sqrt{3}\cdot\rho^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) - p^{(6n+5)}(z) + p_1^{(6n-4)}(z)] - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z) \right\};$$

$$\begin{aligned}
 (\sigma_\theta) = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T \left\{ \frac{B_0\pi}{2\sqrt{3}\cdot\rho^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) + p^{(6n+5)}(z) - p_1^{(6n+4)}(z)] + \right. \\
 \left. \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z) \right\}; \\
 (\sigma_z) = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T \left\{ (1+\nu_0) - \nu_0 \left[\frac{B_0\pi}{\sqrt{3}\cdot\rho^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \cdot p^{(6n+4)}(z) \right] \right\},
 \end{aligned} \quad (1)$$

де ν_0 – коефіцієнт Пуассона;

G_0 – модуль зсуву, пов'язаний з модулем пружності E і коефіцієнтом Пуассона ν_0 відношенням

$$G_0 = \frac{E}{2(1+\nu_0)}$$

n – порядковий номер члена рядів;

ρ – відстань між центрами дротів.

Значення коефіцієнтів A і B , а також значень функцій $p(z)$ і $p_1(z)$ визначені як похідні залежно від ρ .

Беручи до уваги, що

$$\rho = \frac{h}{d+1}$$

і вводячи позначення

$$A_\phi = \frac{B_0\pi}{2\sqrt{3}};$$

$$B_\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) - p^{(6n+5)}(z) + p_1^{(6n+4)}(z)] - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z);$$

$$C_\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) + p^{(6n+5)}(z) - p_1^{(6n+4)}(z)] + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z);$$

$$D_\phi = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4A_{6n+4}}{(6n+5)} p^{(6n+4)}(z);$$

вираз (1) можна представити у вигляді

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_r}{M} &= \frac{A_\phi}{\left(1 + \frac{h}{d}\right)^2} + C_\phi; \\
 \frac{\sigma_\theta}{M} &= \frac{A_\phi}{\left(1 + \frac{h}{d}\right)^2} + B_\phi; \\
 \frac{\sigma_z}{M} &= 1 - \nu_0 \left[\frac{2A_\phi}{1 + \frac{h}{d}} - D_\phi \right],
 \end{aligned} \quad (2)$$

де $M = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T$ – узагальнений фізичний показник просочувального матеріалу.

Ліві частини виразу (2) приведені до вигляду приведених внутрішніх напружень. Такий вигляд виразів дає можливість оцінити вплив параметрів h і d двох дротів на внутрішні напруження, незалежно від фізико-механічних характеристик просочувального

матеріалу. Результати розрахунків коефіцієнтів A_ϕ , B_ϕ , C_ϕ , D_ϕ для точки A зображено на рис. 2.

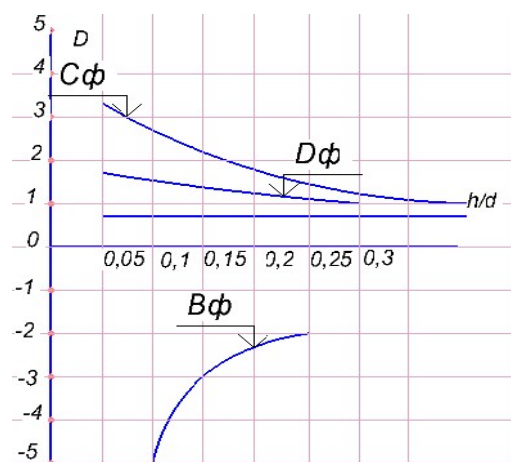


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів A_ϕ , B_ϕ , C_ϕ і D_ϕ від відносної товщини ізоляційного проміжку h/d

Розрахунок приведених внутрішніх напружень залежно від відношення h/d показує, що тангенціальні напруження σ_θ розтягу в

точці А за абсолютним значенням є найбільшими (рис. 3).

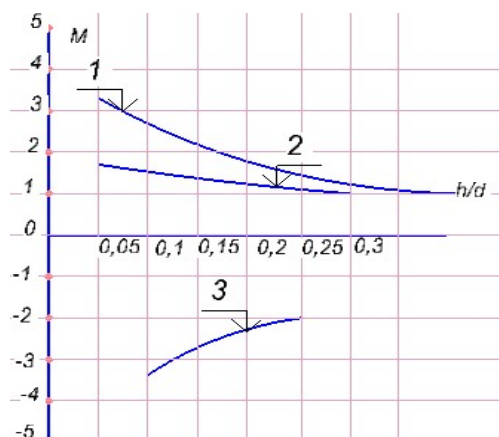


Рис. 3. Графіки залежності приведених значень внутрішніх напружень від відносної товщини ізоляційного проміжку h/d : 1 – тангенціальні напруження; 2 – осьові; 3 – радіальні

За допомогою формули Лагранжа отриману залежність приведених тангенціальних напружень від відношення h/d можна представити у вигляді

$$\frac{\sigma_{\theta}}{M} = \sigma_M = 13,20 \left(\frac{b}{d} \right)^2 - 13,54 \frac{h}{d} + 4,19. (3)$$

Після просочування обмотки зі зростанням товщини полімерної плівки на дроті, особливо при повному заповненні міжвиткового простору, внутрішні напруження збільшуються. В цьому випадку можна очікувати зниження терміну служби ізоляції, причому зниження буде тим більшим, чим товща та жорсткіша плівка. Найбільш напружені ділянки полімеру знаходяться в точках перетину лінії, що з'єднує центри сусідніх стержнів з поверхнею контакту полімер-стержень.

Напруження збільшується зі зменшенням віддалі між стержнями. Це пояснюється тим, що процес пошкодження міжвиткової ізоляції залежить від таких обмоткових параметрів, як коефіцієнт заповнення паза, діаметр дроту і товщина емалі. Основними процесами, які визначають кінетику старіння, є ті, що відбуваються не в об'ємі полімеру, а на границі фаз дріт-емаль. В цьому випадку найбільш важливою і визначальною характеристикою є адгезія.

При пошкодженні під полімерну плівку швидко проникає повітря і пари води, а це призводить до інтенсивності процесу старіння ізоляції. Без сумніву, втрата плівкової емалі є

одним із факторів, що прискорює процес пошкодження ізоляції обмотки. Але він не може бути єдиною причиною пробою низьковольтної міжвиткової ізоляції, тому що для цього необхідна наявність у ній дефектів. Порушення механічної цілісності ізоляції створює додаткові процеси, які погіршують її експлуатаційні характеристики, що призводить до пробою. В деяких випадках після просочування обмоток на поверхні полімеру виникає щільний окисний шар, який перешкоджає дифузії кисню і уповільнює швидкість старіння ізоляції, служить захисною оболонкою. Якщо після досягнення визначеної товщини або після періоду старіння цей шар розтріскується, в ізоляцію полегшується проникнення агресивного середовища і кисню, в результаті чого швидкість старіння збільшується. Після утворення тріщин всередину обмотки потрапляє волога, яка може суттєво знизити пробивну напругу ізоляції. Чим нижче значення адгезійної міцності на межі плівок ізоляції дроту і просочувального матеріалу, тим вищий термін служби ізоляції. В електричних машинах, які піддаються значним механічним навантаженням, низький рівень адгезійної міцності просочувального матеріалу до емальованого дроту може спричинити втрату цементації витків і відповідно зміну конструктивної форми обмотки.

Деякі просочувальні матеріали знижують термін служби ізоляції при порівняно низьких температурах, але підвищують його при більш високих температурах. Така поведінка систем може бути пов'язана з впливом дифузійних процесів, а також зі зміною фізичного стану матеріалів при високій випробувальній температурі. Це має бути враховано при виборі випробувальних напруг. У деяких наукових працях відображено, що перевищення випробувальної температури над робочою більш ніж 20°C може призвести до зміни механізму старіння.

При перегріві плівка емалі переходить в високоеластичний стан, що полегшує її продавлювання на дротах, які дотикаються і перекрещуються.

В процесі просочування і сушіння обмотки емаль дроту по всій поверхні контактує з просочувальним матеріалом, який знаходиться в рідкому стані при підвищеній температурі. Внаслідок взаємодії розчинників і реакційноздатних компонентів просочувальних матеріалів може відбуватися пом'якшення

і набування емалі, створювання в ній дефектів, які призводять до послаблення ізоляції.

Вплив розчинника посилюється при підвищенні температури і залежить від механічних напружень у плівці емалі, що викликані розтягом при намотуванні, а також у місцях згину дрітків.

Висновки. На основі отриманих результатів дослідження встановлено, що:

1. Процес пошкодження ізоляції значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів і їх адгезії один до одного, а також від геометричних параметрів ізоляції.

2. Вплив коефіцієнта міцності просочувального матеріалу при розтягу найбільшою мірою проявляється при значеннях міцності 60-80 МПа.

3. У процесі теплового старіння в перші 1000 год вірогідність розтріскування жорстких компаундів змінюється на два-три порядки, а при подальшому старінні до 10000 год. вона знижується у зв'язку зі зменшенням коефіцієнта міцності внаслідок термостабілізації структури полімеру.

Список літератури

1. Друкарське устаткування: підручник / Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. – Львів: УАД, 2005. – 468 с.
2. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. – [Чинний від 01-01-1996]. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 96 с.
3. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов. Основні положення. – [Чинний від 01-01-1999]. – К.: Держспоживстандарт України, 1997. – 98 с.
4. Ванев Б. Н. Надежность асинхронных электродвигателей / Б. Н. Ванев. – К.: Техника, 1983. – 142 с.
5. Горбунов А. П. Комплексный подход к оценке надежности электрических машин / А. П. Горбунов, О. Д. Гольдберг, Э. Б. Иртышский // Электричество. – 1984. – № 5. – С. 52–54.
6. Корчемный Н. А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве / Н. А. Корчемный, В. П. Машевский. – К.: Урожай, 1988. – 176 с.
7. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галущко, И. С. Максимова, Р. Г. Оснач, П. М. Хазановский. – М.: Энергия, 1979. – 176 с.

8. Петров Т. А. Обоснование периодичности технического обслуживания и ремонта электродвигателей с учетом их эксплуатационной надежности: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Т. А. Петров. – Челябинск, 1983. – 24 с.
9. Манько В. М. Універсальний стенд діагностування та випробування електричних машин / В. М. Манько // Автошляховик України. – Вип. 2. – Київ, 2001. – С. 48–53.
10. Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
11. Томашівський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашівський. – К.: Видав. група BHV, 2005. – 352 с.

References

1. Chehman, Ya. I., Senkus', V. T., Didych, V. P. and Bosak, V. O. (2005) Printing equipment. L'viv: UAD, 468 p. [in Ukrainian].
2. DSTU 2860-94 (1994) Reliability of engineering. The terms and definitions. [Effective as of 01.01.1996]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 96 p. [in Ukrainian].
3. DSTU 3433-96 (1997) Models of failures. Fundamentals [Effective as of 01.01.1999]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 98 p. [in Ukrainian].
4. Vaneyev, B. N. (1983) The reliability of induction motors. Kiev: Tehnika, 142 p. [in Russian].
5. Gorbunov, A. P., Gol'dberg, O. D. and Irtyshskij, E. B. (1984) An integrated approach to assessing the reliability of electrical machines. *Elektrichestvo*, (5), pp. 52–54 [in Russian].
6. Korchemnyj, N. A. and Mashevskij, V. P. (1988) The increase of electrical equipment reliability in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
7. Galushko, A. I., Maksimova, I. S., Osnach, R. G. and Khazanovsky, P. M. (1979) The reliability of electrical machines isolation. Moscow: Energiya, 176 p. [in Russian].
8. Petrov, T. A. (1983) Justification of the frequency of maintenance and repair of electric motors with regard to their operational reliability: thesis for PhD in Engineering. Chelyabinsk, 24 p. [in Russian].
9. Man'ko, V. M. (2001) Universal stand for diagnosing and testing of electrical machines.

- Avtoshljahovyk Ukrainy*, (2), Kyiv, pp. 48–53 [in Ukrainian].
10. Kostynjuk, L. D., Moroz, V. I. and Paranchuk, Ya. S. (2004) Modeling of electric drives. L'viv: Nats. un-t «L'vivs'ka politehnika», 404 p. [in Ukrainian].
11. Tomashyvs'kyj, V. M. (2005) Systems simulation. Kyiv: Vydav. grupa BHV, 352 p. [in Ukrainian].

V. M. Manko, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: mankovm@ukr.net

V. M. Zotov, *postgraduate student*
e-mail: zotov_vetal@ukr.net

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

CONSTRUCTION AND STUDY OF PHYSICAL MODEL OF STATOR WINDING INSULATION IN ELECTRICAL MACHINES OF PRINTING COMPLEXES

Approximately 70 percent of generated electricity is transformed into mechanical one with the help of electric motors. Therefore, even a slight improvement of energy performance of induction motors in some measure helps to solve the problems not only of reduction of energy consumption but also of energy conservation and environment safety.

The aim of the work consists in the construction and study of physical model of stator winding insulation with the determination of internal stresses in electric machines. When constructing a physical model of winding insulation only its main parameters and features should be taken. Constructed physical model allows to determine internal stress between two adjacent wires on the line connecting their centers. Voltage increases with decreasing of distance between the rods. This is because the process of winding insulation damage depends on such parameters as the factor of groove filling, wire diameter and enamel thickness. When being damaged the air and water vapor quickly penetrate under a polymer film, and this leads to the intensity of the process of insulation aging. The loss of film enamel adhesion to the wire is one of the factors that accelerates the process of winding insulation damage. Violation of mechanical integrity of the insulation creates additional processes that impair its performance, leading to breach. The influence of the strength ratio of impregnating material under a tension to the greatest extent manifests itself in the values of strength of 60-80 MPa.

Keywords: *inter-turn insulation, enamel film, polymer, adhesion, breakdown voltage, internal voltage.*

Рецензенти: **В. І. Осипенко**, *д.т.н., професор*,
С. В. Поздєєв, *д.т.н., професор*

Т. О. Прокопенко, к.т.н., доцент,

В. І. Крезуб, аспірант

victorija.kulish@yandex.ru

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті розглядається оцінювання ефективності підприємств хімічної промисловості. Для того щоб оцінити перспективні стратегічні рішення розвитку підприємства хімічної промисловості, необхідно проаналізувати техніко-економічні показники ефективності підприємства та визначити серед них критерії ефективності. Динаміка розвитку ринкової економіки вимагає розробки нових методів комплексного оцінювання ефективності функціонування підприємства хімічної промисловості, де на перший план виходять економічні, ринкові критерії ефективності.

Ключові слова: хімічна промисловість, оцінювання ефективності, економічний ефект, оптимізація, інформаційна технологія.

Вступ. В управлінській діяльності на підприємствах хімічної промисловості в умовах подолання кризових явищ в економіці поряд з прийняттям правильних і точних оперативних рішень важливим є вироблення стратегії майбутнього. Рішення, що приймаються сьогодні, можуть мати вирішальний вплив у перспективі [1]. Тому, для того щоб визначити оптимальне стратегічне рішення розвитку впродовж тривалого періоду часу, необхідно адекватно і точно оцінити ефективність підприємства впродовж поточного періоду.

Аналіз. Питання оцінювання ефективності функціонування підприємств у різних галузях промисловості досліджені в роботах А. П. Ладанюка [2], В. М. Дубового [3], І. В. Гребенника [4]. Економічне оцінювання ефективності підприємства здійснюється на підставі наявної інформації про поточний стан на основі даних виробництва. Для того щоб оцінити перспективні стратегічні рішення розвитку підприємства хімічної промисловості, необхідно проаналізувати техніко-економічні показники ефективності підприємства та визначити узагальнені критерії ефективності.

Метою роботи є побудова математичної моделі функціонування підприємства хімічної промисловості та вибір критерію оцінювання ефективності.

Для оцінювання ефективності функціонування підприємства хімічної промисловості використовується ряд економічних і техніко-

економічних показників. Ці показники дозволяють більш повно і у взаємозв'язку врахувати багато чинників та складових, які впливають на рівень і динаміку ефективності. В загальному вигляді економічну ефективність виробництва можна виразити формулою [5]:

$$E = \frac{R}{Z_i}, \quad (1)$$

де R – економічний ефект (результат), отриманий у процесі виробництва; Z – сукупні витрати в процесі виробництва.

Функціональна залежність між економічною ефективністю, результатами і витратами в процесі виробництва виражається в такий спосіб:

$$F(E) = \frac{\max R}{\min Z_i}. \quad (2)$$

Важливими показниками економічної активності хімічного виробництва є собівартість, прибуток і рентабельність, що виражають величину поточних витрат на виробництво і реалізацію продукції, розмір перевищення виручки від реалізації продукції над витратами на її виробництво і реалізацію, а також відношення прибутку до витрат на виробництво до середньої вартості основних виробничих фондів і нормованих оборотних коштів.

Рівень собівартості продукції впливає на розмір одержуваного прибутку, рентабельність виробництва продукції і рентабельність роботи

підприємства, тому що прибуток у кількісному вираженні являє собою різницю між виручкою від реалізації продукції за оптово-відпускними цінами підприємства і витратами на її виробництво і реалізацію, а рентабельність виробництва продукції і рентабельність роботи підприємства являють собою відношення отриманого прибутку відповідно до витрат на виробництво продукції і до середньої вартості основних виробничих фондів і нормованих оборотних коштів [6]:

$$P_n = \frac{П}{C} * 100 = \frac{B - C}{C} * 100, \quad (3)$$

$$P_o = \frac{П_{\delta}}{\Phi_{осн} + H_{о.с}} * 100, \quad (4)$$

де P_n – рентабельність виробництва продукції, %; $П$ – прибуток, отриманий від реалізації товарної продукції, грн.; C – собівартість виробництва товарної продукції, грн.; B – виручка від реалізації продукції, грн.; P_o – загальна рентабельність роботи підприємства, %; $П_{\delta}$ – балансовий прибуток підприємства, грн.; $\Phi_{осн}$ – середня вартість основних виробничих фондів, грн.; $H_{о.с}$ – середня вартість нормованих оборотних коштів, грн.

У [7, 8] зазначено, що задача управління виробництвом завжди передбачає досягнення найкращого значення (екстремуму) узагальненим показником (критерієм оптимізації), який має техніко-економічний зміст:

$$F(x, y, z) dt \rightarrow \text{extr.} \quad (5)$$

Моделі окремих підсистем записують у вигляді

$$X = f1(x, y, z), \quad (6)$$

$$y = f2(x, u, z). \quad (7)$$

Залежності (5)-(7) доповнюються умовами існування меж допустимих значень змінних типу

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}. \quad (8)$$

У наведених вище залежностях x – координати стану; y – вихідні змінні; u – управління; z – збурення.

Оцінювання ефективності хімічного виробництва забезпечує вибір та підтримку оптимальних співвідношень між економічними показниками і технологічними параметрами

залежно від ситуації з використанням об'єктивної інформації, що надходить та оброблюється в темпі проходження процесів. Тому серед великої кількості техніко-економічних показників відберемо такі, що дадуть можливість задати критерій ефективності, згідно з яким можна визначити поточну виробничу ситуацію.

Ефективність підприємства хімічної промисловості формується в процесі всієї його виробничо-господарської діяльності [9]. У визначенні ефективності підприємства зацікавлене, передовсім, саме підприємство. Тому необхідно систематично, детально і в динаміці аналізувати ефективність підприємства, оскільки від поліпшення ефективності підприємства залежить його економічна перспектива. З метою об'єктивного оцінювання ефективності підприємства задамо комплекс, тобто систему показників, що детально й усебічно характеризують виробничий стан підприємства.

Традиційно, критерії ефективності підприємства хімічної промисловості ґрунтуються на різниці отриманих результатів і витрат. При цьому одержувані результати і витрати вимірюються в грошових одиницях [10].

При визначенні критеріїв оцінювання ефективності функціонування хімічного підприємства будемо виходити з того, що ефективність будь-якого підприємства може бути охарактеризована критеріями і показниками. Показники кваліфікуються дослідником як елементарні оцінки, що можуть бути виміряні за допомогою будь-яких фізичних приладів або експертних оцінок. Критерії – узагальнені показники, що безпосередньо обчислюються. Таким чином, критерії виражаються через показники. Всі показники оцінювання ефективності підприємства перебувають у взаємозв'язку та взаємозумовленості. Тому оцінити реальну ефективність підприємства можна лише на підставі використання певного комплексу показників з урахуванням впливу різних факторів на відповідні показники.

Будемо вважати, що технологічний комплекс хімічного підприємства складається з N підсистем. Серед вихідних змінних підсистем є такі, що відображають зв'язки підсистем з навколишнім середовищем та не є змінними взаємодії підсистем. У загальному випадку компоненти векторів X , Y , Z , U мають обмеження у вигляді нерівностей типу:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max},$$

$$X \leq X_{\text{дон}} \quad \text{або}$$

$$X \geq X_{\text{дон}}.$$

Загальний показник функціонування на часовому інтервалі $t_1 \leq t \leq t_2$, коли він має зміст технічної складової прибутку, можна представити у вигляді:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^N \phi_i(y_i(t), x_i(t), u_i(t), z_i(t), t) dt. \quad (9)$$

Для кожної з підсистем критерій ефективності можна представити у вигляді:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} (C_y y_i(t) - (C_{\Pi} U_{it}^{(t)} + C_y Y_{\eta}(t))) dt, \quad (10)$$

де $Y_{\eta}(t)$ – змінні взаємодії з η -ї підсистеми на i -ту;

C_y, C_{Π} – коефіцієнти вартості, які враховують ціни потоків Y та U .

Таким чином, можна використовувати загальний критерій як адитивну функцію частинних, що дасть можливість повною мірою оцінити ефективність функціонування підприємства хімічної промисловості.

На основі наведених показників оцінювання ефективності окремих підсистем хімічного виробництва і технологічного комплексу в цілому можна сформулювати загальний критерій для прийняття рішень при оперативному управлінні виробництвом з використанням існуючих методів отримання згортки критеріїв.

Прибутковість підприємства вимірюється двома показниками: прибутком і рентабельністю. Прибуток виражає абсолютний ефект з урахування використаних ресурсів. Формулу визначення прибутку хімічного підприємства, враховуючи багатоасортиментність виробництва, від реалізації товарної продукції запишемо в декілька етапів.

$$1. P_1 = c_1 a_1, \quad (11)$$

де P_1 – сумарна виручка підприємства від продажу аміаку, грн.; c_1 – оптова ціна аміаку за 1 т, грн.; a_1 – обсяг кінцевої продукції (аміаку), т;

$$2. P_2 = c_2 a_2, \quad (12)$$

де P_2 – сумарна виручка підприємства від продажу карбаміду, грн.; c_2 – оптова ціна кар-

баміду за 1 т, грн.; a_2 – обсяг кінцевої продукції (карбаміду), т;

$$3. P_3 = c_3 a_3, \quad (13)$$

де P_3 – сумарна виручка підприємства від продажу аміачної селітри, грн.; c_3 – оптова ціна аміачної селітри за 1 т, грн.; a_3 – обсяг кінцевої продукції (аміачної селітри), т.

4. Запишемо вирази для визначення витрат:

$$V1 = S1 \cdot G1, \quad (14)$$

де $S1$ – вартість виготовлення азотної води, грн.; $G1$ – кількість, необхідна для виробництва азотної води, $V1$ – витрати на виробництво аміаку, грн.;

$$V2 = S2 \cdot r2, \quad (15)$$

де $S2$ – вартість витраченої електроенергії за 1 тис. м³, грн.; $r2$ – кількість затраченої електроенергії, тис. м³, $V2$ – витрати за використану електроенергію, грн.;

$$V3 = S3 \cdot r3, \quad (16)$$

де $S3$ – вартість 1 тис. м³ умовного газу, грн.; $r3$ – частка витрат умовного газу до маси перероблених речовин; $V3$ – витрати заводу на придбання газу, грн.;

$$V4 = S4 \cdot r4, \quad (17)$$

де $S4$ – вартість людино-днів, грн.; $r4$ – витрати праці (в людино-днях) на переробку та виготовлення аміаку; $V4$ – витрати заводу на заробітну плату промислово-виробничим працівникам;

$$V5 = S5 \cdot r5, \quad (18)$$

де $S5$ – витрати на транспортування, грн.; $r5$ – кількість поїздок для доставки речовин, разів, $V5$ – сумарні витрати на доставку речовин на завод.

На основі виконаних досліджень побудуємо математичну модель оцінювання ефективності підприємства хімічної промисловості з багатоасортиментним випуском продукції.

Загальний прибуток підприємства хімічної промисловості з багатоасортиментним випуском продукції матиме вигляд:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i(c_i), \quad (19)$$

де $p_i(c_i)$ – прибуток від реалізації i -го виду продукції, c_i – оптова ціна i -го виду продукції, $n = \overline{1, N}$ – кількість видів продукції.

Прибуток для i -го виду продукції запишемо як:

$$p_i(c_i) = P_i(c_i) - V_i, \quad (20)$$

де $P_i(c_i)$ – виручка від реалізації i -го виду продукції; V_i – витрати на реалізацію i -го виду продукції.

Витрати на виробництво i -го виду продукції виражаються:

$$V_i = \sum_{j=1}^m s_j r_j, \quad (21)$$

де s_j – вартість j -ресурсу на виготовлення i -го виду продукції; r_j – кількість j -ресурсу на виготовлення i -го виду продукції, $m = \overline{1, M}$ – кількість видів ресурсів.

Обмеження на виробництво i -го виду продукції запишемо таким чином:

$$\sum_{j=1}^m a_{ij}(r_j) \geq A_i, \quad (22)$$

де $a_{ij}(r_j)$ – кількість виготовленої продукції i -го виду; A_i – виробнича потужність виробництва i -го виду продукції.

Таким чином, основним критерієм оцінювання ефективності підприємства хімічної промисловості є прибуток, що визначається на основі (19).

Враховуючи (9) та (10) на часовому інтервалі $t_1 \leq t \leq t_2$, прибуток буде виражатися формулою:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_{i=1}^n p_i(c_i) \right) (t) dt. \quad (23)$$

В результаті отриманий критерій ефективності забезпечує визначення поточного стану підприємства з можливістю розробки майбутніх стратегічних рішень.

Висновки. Запропонована модель є основою комплексного оцінювання ефективності підприємства хімічної промисловості, що забезпечить комплексний підхід до управління в стратегічній та оперативній діяльності підприємства. В умовах кризи, пов'язаних з нестабільністю економіки, політичної обстановки, зовнішньої політики та ін. в управлінні підприємством важливим є забезпечення інформацією, яка б відображала ситуацію як у поточній, так і в стратегічній діяльності, а також сприяла виробленню та прийняттю управлінських рішень. Тому в управлінні під-

приємствами хімічної промисловості необхідно розробляти такі інформаційні технології, що забезпечать оцінювання ефективності функціонування підприємства та корпорації в цілому, а також широкі можливості оперативного збору різноманітної статистичної інформації, виконувати функції контролю відхилень фактичних показників від планових, швидко видавати інформацію за запитами різних керівних органів та забезпечувати вибір і прийняття управлінських рішень.

Список літератури

1. Прокопенко Т. А. Информационная модель управления технологическими комплексами непрерывного типа в классе организационно-технических систем / Т. А. Прокопенко, А. П. Ладанюк // Проблемы управления и информатики : междунар. науч.-техн. журн. – 2014. – № 5. – С. 64–70.
2. Ladanyuk A. P. Technological objects in the structure of the operational optimization of production / A. P. Ladanyuk, N. M. Lutsyk, S. O. Golovanov // Eastern European Journal of Advanced Technologies. – 2010. – № 2/4 (44). – Р. 41–43.
3. Прийняття рішень в управлінні розгалуженими технологічними процесами : [монографія] / В. М. Дубовой, Г. Ю. Дерман, І. В. Пилипенко, М. М. Байас. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 223 с.
4. Гребенник И. В. Моделирование влияния внешней среды на эффективность плана выполнения работ / И. В. Гребенник, А. Ю. Хабаров // Системы обработки информации. – 2003. – № 4 (26).
5. Учет и анализ эффективности производства / [под ред. А. Ф. Аксененко]. – М. : Финансы и статистика, 1986. – 260 с.
6. Оніщенко О. Методологічний аспект порівняльної оцінки ефективності різних форм господарювання в аграрній сфері / О. Оніщенко, В. Юршин // Економіка України. – 1996. – № 3. – С. 15–19.
7. Прокопенко Т. О. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами : [монографія] / Т. О. Прокопенко, А. П. Ладанюк. – Черкаси : Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2015. – 224 с.
8. Ладанюк А. П. Управління автоматизованими технологічними комплексами харчових виробництва на основі сценарного підходу / А. П. Ладанюк, А. І. Українець,

- В. Д. Кишенько // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 2. – С. 187–196.
9. Ладанюк А. П. Формування бази даних комп'ютерно-інформаційної системи оцінки ефективності функціонування цукрового заводу / А. П. Ладанюк, Т. О. Прокопенко // Автоматизація виробничих процесів. – 2003. – № 2 (17). – С. 23–27.
 10. Прокопенко Т. О. Розробка математичної моделі управління цукровими підприємствами в складі корпоративної інформаційної системи / Т. О. Прокопенко, Ю. Г. Лега, Ю. О. Ковтун // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 2. – С. 41–43.
 - on the efficiency of working plan. *Sistemy obrabotki informatsiyi*, 4 (26) [in Russian].
 5. Aksenenko, A. F. (1986) Accounting and analysis of production efficiency. Moscow: Financy i statistika, 260 p. [in Russian].
 6. Onischenko, A. and Yurshyn, B. (1996) Methodological aspect of comparative assessment of the effectiveness of different forms of management in agriculture. *Ekonomika Ukrainy*, (3), pp. 15–19 [in Ukrainian].
 7. Prokopenko, T. O. and Ladanyuk, A. P. (2015) Information technologies of management by organizational and technological systems. Cherkasy: Vertical, publisher Kandych S. H., 224 p. [in Ukrainian].
 8. Ladanyuk, A. P., Ukrainets, A. I. and Kyshenko, V. D. (2008) Management by automated technological complexes of food production based on scenario approach. *Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotehnicheskkiye komplekxy i sistemy*, (2), pp. 187–196 [in Ukrainian].
 9. Ladanyuk, A. P. and Prokopenko, T. O. (2003) Formation of the database of computer-information system for evaluating the efficiency of sugar factory functioning. *Avtomatyzatsiya vyrobnychyh procesiv*, 2 (17), pp. 23–27 [in Ukrainian].
 10. Prokopenko, T. O., Lega, Yu. H. and Kovtun, Yu. O. (2005) The development of mathematical model for management by sugar companies as a part of corporate information system. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (2), pp. 41–43 [in Ukrainian].

References

1. Prokopenko, T. O. (2014) Information model of control of the continuous type technological complexes in the class of organizational and technical systems. *Problemy upravleniya i informatiki*, (5), pp. 64–70 [in Russian].
2. Ladanyuk, A. P., Lutsik, N. M. and Golovanov, S. O. (2010) Technological objects in the structure of the operational optimization of production. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2/4 (44), pp. 41–43.
3. Dubovoy, V. M., Derman, G. Y., Pilipenko, I. V., Bayas, M. N. (2013) Decision making in managing by branched technological processes. Vinnytsya: VNTU, 223 p. [in Ukrainian].
4. Grebennik, I. V. and Khabarov, A. Yu. (2003) Simulation of external environment influence

T. O. Prokopenko, Ph.D., associate professor,

V. I. Krezub, postgraduate student

victorija.kulich@yandex.ru

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF CHEMICAL INDUSTRY ENTERPRISES

The article deals with evaluation of chemical industry's effectiveness. In order to assess long-term strategic decisions of chemical industry's development, it is necessary to analyze technical and economic indexes of industry's effectiveness and to identify the criteria's effectiveness among them. The dynamics of a market economy requires the development of new methods of complex evaluation of chemical industry's efficiency, where economic and market criteria's effectiveness is important.

The aim of this work is to construct a mathematical model of chemical industry and the selection criteria evaluation of effectiveness.

To evaluate the efficiency of chemical industry a number of economic and technical-economic indicators are used. These figures allow to consider many factors and components, that affect the level of efficiency and dynamics, more completely and in relationship.

The proposed model is the basis for a comprehensive evaluation of the efficiency of chemical industry, which will ensure an integrated approach to management in strategic and operational activities of the company. In crisis conditions related to the instability of the economy, political situation, foreign policy and others in enterprise management it is important to provide information that would reflect the situation both in current and strategic activities, and would contribute to the development and decision-makings in management. Therefore, in management by chemical industry enterprises it is necessary to develop these information technologies that provide the evaluation of the effectiveness of an enterprise and the whole organization, as well as opportunities of efficient collection of various statistical information, to perform functions of the control of deviations of actual indicators from planned ones, to quickly provide information on the needs of various leading organs and to provide the choice and decision-making.

Keywords: *chemical industry, evaluation of performance, economic benefit, optimization, information technology.*

*Рецензенти: А. П. Ладанюк, д.т.н., професор,
А. А. Златкін, д.т.н., професор*

Н. М. Битько, к.т.н., доцент,
e-mail: bitkonm@mail.ru

О. В. Кузнецова, ассистент,
e-mail: kuznes-68@mail.ru

В. В. Бойко, старший преподаватель
e-mail: boykin.valentina@gmail.com

Черкасский государственный технологический университет
б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БЕТОНОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ, ИСХОДЯ ИЗ ЕГО ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ

Изложены результаты теоретических исследований напряженно-деформированного состояния бетонов при кратковременном центральном сжатии на основе его структурной теории. Проведен анализ определения напряженно-деформированного состояния, исходя из трех наиболее приемлемых структурных схем бетона. Даны положительные и отрицательные моменты использования этих схем. На основе анализа выбраны две схемы для определения упругопластических характеристик бетона, исходя из реологических свойств составляющих. Для схемы шарового расположения заполнителя в цементной матрице, исходя из решений равновесия и совместности деформаций, получены их теоретические значения. Приведены сравнения теоретических значений характеристик бетона и раствора с данными, полученными экспериментально. Результаты сравнения опытных и теоретических значений свидетельствуют о возможности применения этих зависимостей для определения упругопластических характеристик бетона, исходя из состава его компонентов при кратковременном центральном сжатии.

Ключевые слова: модуль упругости, бетон, раствор, структурная схема, составляющие бетона, заполнитель, цементный камень.

Введение. В настоящее время при решении многих задач теории бетона и железобетона исходят из феноменологических зависимостей, взятых непосредственно из результатов испытаний. Но уже имеется некоторая тенденция к использованию не феноменологии, а сущности явления и разработки структурной теории бетона. Расчётные формулы при этом основываются на прочностных и упругопластических характеристиках составляющих бетона, их количественного соотношения и взаиморасположения в единице объёма.

Постановка проблемы. Бетон является конгломератом и имеет твердые, жидкие и газообразные включения. Взаиморасположение составляющих в единице бетонного элемента осуществляется при помощи идеализированных структурных схем бетона. Действительная структурная схема бетона сложная и не поддаётся статистической оценке. Цементный камень при этом рассматривается как матрица, а заполнители – как включения. Но цементный камень и заполнитель имеют раз-

личные физико-механические свойства, поэтому упругопластические характеристики бетона должны определяться через реологические свойства составляющих, их количественное соотношение и взаиморасположение. Решение этой задачи является весьма актуальным.

Анализ результатов исследований. По этому вопросу имеется незначительное количество исследований. Так, авторы [1–2] дают определение модуля упругости бетона по двум идеализированным структурным схемам (рис. 1, схема 1; 2).

Несколько иные зависимости для определения модуля упругости бетона рассмотрены в [3–10]. Все они касаются определения модуля упругости бетона. Что же касается оценки его деформативности по идеализированным схемам, то ни один из вышеуказанных авторов таковой не дает.

Цель работы – разработка на основе идеализированных структурных схем бетона аналитических зависимостей для определе-

ния его напряженно-деформированного состояния при кратковременном центральном сжатии, исходя из реологических свойств составляющих.

Изложение основного материала.

Оценку напряженно-деформированного состояния бетонов при кратковременном сжатии по их составу и реологическим свойствам составляющих производим на идеализированных структурных схемах 1, 2, 3 (рис. 1).

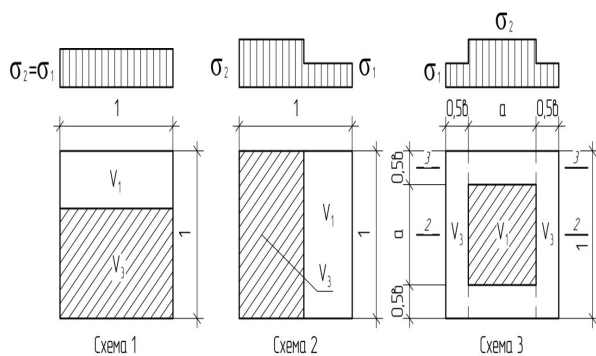


Рис. 1. Идеализированные структурные схемы бетона

Схемы 1, 2 дают экстремальные значения моделей упругости, а схема 3 – оптимальное, наиболее удовлетворяющее опытным значениям при оценке модуля упругости бетона $E_{\tilde{n}\delta}$.

Оценку напряженно-деформированного состояния бетонов по вышеуказанным схемам производим с учётом упругой работы заполнителей и упруго-пластической работы цементного камня (раствора).

Ранее авторами [8–9] экспериментально-статистически доказано, что зависимость между секущим модулем деформаций $E'_{l,\tau}$ и напряжением $\sigma_{l,\tau}$ или уровнем напряжений для цементного камня является линейной корреляционной зависимостью, как при постоянной скорости изменения напряжений $V_{\sigma} = const$, так и при постоянной скорости изменения продольных деформаций $V_{\varepsilon} = const$, с теми же параметрами упруго-пластических характеристик. Следовательно, можно предположить, что при убывающей скорости приложения сжимающей нагрузки (напряжений) зависимость $E'_{l,\tau} - \sigma_{l,\tau}$ для цементного камня – также линейная корреляционная зависимость вида

$$E'_{l,\tau} = E_{l,\tau} \left(1 - \lambda_{f_{cd,l,\tau}} \frac{\sigma_{l,\tau}}{f_{cd,l,\tau}} \right); \quad (1)$$

где $E_{l,\tau}$ – модуль упругости цементного камня (раствора) в момент времени τ ;

$\lambda_{f_{cd,l,\tau}}$ – предельное значение коэффициента пластичности цементного камня (раствора) в момент времени τ ;

$\sigma_{l,\tau}$ – напряжение в цементном камне (растворе) в момент времени τ ;

$f_{cd,l,\tau}$ – призмная прочность цементного камня (раствора) в момент времени τ ;

$E'_{l,\tau}$ – секущий модуль деформаций цементного камня (раствора) в момент времени τ .

Используя вышеуказанные предпосылки, получаем теоретическое значение секущих модулей деформаций по трём принятым схемам.

В процессе загрузки в схеме I (рис. 1) напряжения в цементном камне (растворе) и заполнителе одинаковы $\sigma_{l,\tau} = \sigma_3$ и равняются напряжениям в бетоне $\sigma_{c,\tau}$.

Цементный камень работает упруго-пластически, заполнитель – упруго. Вследствие вышеуказанного, секущий модуль деформаций по этой схеме определяется по зависимости [2] с заменой в ней модуля упругости цементного камня $E_{l,\tau}$ на его секущий модуль деформаций $E'_{l,\tau}$:

$$E'_{\tilde{n}\delta,\tau} = \frac{1}{\frac{V_1}{E'_{l,\tau}} + \frac{V_3}{E_3}}. \quad (2)$$

В схеме 2 (рис. 1), ввиду проявления пластических деформаций в цементном камне при кратковременном нагружении, будет происходить перераспределение усилий сжатия с цементного камня на упруго работающий заполнитель. Скорость роста напряжений в цементном камне (растворе) при постоянной скорости приложения сжимающих усилий к бетону с ростом нагрузки будет убывать.

Как было доказано выше, это не влияет на линейность корреляционной зависимости $E'_{l,\tau} - \sigma_{l,\tau}$ и её параметров $E_{l,\tau}$ и $\lambda_{f_{cd,l,\tau}}$. Задача состоит в том, чтобы при заданном на-

пряжении $0 \leq \sigma_{\tilde{n},\tau} \leq f_{\tilde{n}d}$ определить напряжения в его составляющих, т.е. напряжения в цементном камне (растворе) $\sigma_{l,\tau}$ и заполнителе σ_3 , а также секущий модуль деформаций бетона $E_{c,\tau}^1$ и относительные деформации бетона $\varepsilon_{c,\tau}$. Решение вышеуказанной задачи получено из совместного решения уравнения равновесия, имеющего вид

$$\sigma_{l,\tau} V_1 + \sigma_{3,\tau} V_3 = \sigma_{c,\tau}, \quad (3)$$

и уравнения совместности деформаций

$$\varepsilon_{c,\tau} = \varepsilon_{l,\tau} = \varepsilon_{3,\tau} = \frac{\sigma_{c,\tau}}{E_{\tilde{n}\partial,\tau}} = \frac{\sigma_{l,\tau}}{E_{l,\tau}} = \frac{\sigma_{3,\tau}}{E_{3,\tau}}. \quad (4)$$

Решение системы уравнений (3–4) даёт

$$E'_{\tilde{n}\partial,\tau} = V_1 E'_{l,\tau} + V_3 E_3. \quad (5)$$

Подставив в уравнение (5) выражение $E'_{l,\tau}$ по (1) с учетом значения в нём

$$\sigma_{l,\tau} = \sigma_{\tilde{n}\partial,\tau} \frac{E'_{l,\tau}}{E'_{\tilde{n}\partial,\tau}}, \quad \text{получаем квадратное}$$

уравнение. Решение этого уравнения дает возможность определить значение секущего модуля деформаций бетона $E'_{\tilde{n}\partial,\tau}$:

$$E'_{\tilde{n}\partial,\tau} = -0,5\hat{A} + \sqrt{(0,5\hat{A})^2 - c}, \quad (6)$$

$$\text{где } B = E_{\tilde{n}\partial,\tau} - \lambda_{f_{cd,l,\tau}} E_{l,\tau} \frac{\sigma_{\tilde{n},\tau}}{f_{cd,l,\tau}}; \quad (7)$$

$$c = -V_3 E_3 E_{l,\tau} \lambda_{f_{cd,l,\tau}} \frac{\sigma_{\tilde{n},\tau}}{f_{cd,l,\tau}}. \quad (8)$$

Значение секущего модуля деформаций цементного камня или раствора в процессе кратковременного нагружения бетона определяется из уравнения (5):

$$E'_{l,\tau} = \frac{E'_{\tilde{n}\partial,\tau} - E_3 V_3}{V_1}. \quad (9)$$

Внутреннее напряженное состояние бетона в процессе кратковременного нагру-

жения определяется через значение секущих модулей деформаций $E'_{\tilde{n}\partial,\tau}$ и $E'_{l,\tau}$ по формулам:

напряжение в цементном камне (растворе):

$$\sigma_{l,\tau} = \sigma_{\tilde{n}\partial,\tau} \frac{E'_{l,\tau}}{E'_{\tilde{n}\partial,\tau}}; \quad (10)$$

напряжение в заполнителе:

$$\sigma_{3,\tau} = \sigma_{\tilde{n}\partial,\tau} \frac{E_3}{E'_{\tilde{n}\partial,\tau}} = \frac{\sigma_{\tilde{n}\partial,\tau} - \sigma_{l,\tau} V_1}{V_3}. \quad (11)$$

Относительные деформации бетона с учётом упругопластической работы цементного камня (раствора) определяются по зависимости

$$\varepsilon_{\tilde{n}\partial,\tau} = \frac{\sigma_{\tilde{n}\partial,\tau}}{E'_{\tilde{n}\partial,\tau}}. \quad (12)$$

Схема 3 (рис. 1) состоит из вертикального элемента I высотой, равной 1, заполнителем которого служит комбинированный элемент II. Элемент II, в свою очередь, состоит из заполнителя высотой, равной "а", и горизонтальной прослойки (цементного камня) высотой "в".

Внутреннее напряженное состояние по схеме 3 рис. 1 определится напряженным состоянием в сечении 2-2. Поэтому расчетные формулы внутреннего состояния единичного элемента будут такими же, как и для схемы 2, только лишь с заменой в последних объемов V_1 и V_3 на площади сечений A_1 и A_3 .

Для определения упругопластических характеристик бетона сначала рассмотрим комбинированный элемент II.

Секущий модуль деформаций для вышеприведенного элемента определится по формуле

$$E'_{II,\tau} = \frac{1}{\frac{a}{E_3} + \frac{b}{E'_{II,1,\tau}}}; \quad (13)$$

$$\text{где } a = \sqrt[3]{V_3}; \quad b = 1 - a. \quad (14)$$

После этого рассматриваем элемент I как вертикальный высотой, равной 1, запол-

нителем которого служит комбинированный элемент II. Для такого элемента значение секущего модуля определяется по формуле, аналогичной (5), в которой V_I и V_3 заменены на A_I и A_3 .

$$E'_{\tilde{n}0,\tau} = A_I E'_{I,1,\tau} + A_3 E'_{II,1,\tau}. \quad (15)$$

Подставляя в (15) значение из (13), получим формулу для определения секущего модуля деформаций бетона по схеме 3:

$$E'_{\tilde{n}0,\tau} = E'_{I,1,\tau} A_I + \frac{A_3}{\frac{a}{E_3} + \frac{b}{E'_{II,1,\tau}}}. \quad (16)$$

Поскольку значение $\sigma_{I,\tau}$ в элементе II равно напряжению в заполнителе $\sigma_{3,\tau}$, то значения секущих модулей деформаций цемент-

ного камня (раствора) в элементах I – $E'_{I,1,\tau}$ и II – $E'_{II,1,\tau}$ определяются по формулам:

$$E'_{I,1,\tau} = E_{I,\tau} \left(1 - \frac{\lambda_{f_{cd,I,\tau}} \sigma_{I,\tau}}{f_{cd,I,\tau}} \right); \quad (17)$$

$$E'_{II,1,\tau} = E_{II,\tau} \left(1 - \frac{\lambda_{f_{cd,I,\tau}} \sigma_{3,\tau}}{f_{cd,I,\tau}} \right). \quad (18)$$

Относительные деформации при кратковременном нагружении определяются по формуле (12).

В табл. 1 и 2 представлены опытные и теоретические значения относительных деформаций бетона и раствора, вычисленные по вышеприведенным формулам схем I-III при кратковременном нагружении до различного уровня обжатия серий.

Таблица 1

**Относительные деформации при кратковременном центральном сжатии
в системе «раствор-бетон»**

Схемы	$\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Исходные данные
опытн.	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$	17,5	26,6	33,0	48,3	64,9	73,5	88,0	$V_I = 0,55;$ $V_3 = 0,45;$ $E_I = 0,49 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ $\lambda_{f_{cd,I,\tau}} = 0,30$ $E_3 = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$
схема 1	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$ $\Delta\%$	18,9 +8,0	20,0 9,0	40,0 5,2	51,5 5,8	63,7 -1,5	77,0 +4,8	90,8 +3,2	
схема 2	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$ $\Delta\%$	9,5 45,7	14,3 46,3	19,1 19,7	24,0 49,5	28,5 55,8	33,7 54,3	38,6 56,2	
схема 3	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$ $\Delta\%$	15,1 13,7	23,3 12,4	2,1 18,4	41,5 14,0	1,7 20,2	2,7 14,7	74,6 15,2	

Таблица 2

**Относительные деформации при кратковременном центральном сжатии
в системе «цемент-раствор»**

Схемы	$\eta_\tau = \frac{\sigma_\tau}{f_{cd}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Исходные данные
опытн.	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$	15,1	24,0	32,1	42,4	53,0	79,7	92,7	$V_3 = 0,45;$ $V_I = 0,55;$ $E_{I,\tau} = 3,57 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ $\lambda_{f_{cd,I,\tau}} = 0,335$ $E_3 = 6,85 \cdot 10^4 \text{ МПа}$
схема 1	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$ $\Delta\%$	14,7 -2,6	2,8 -5,0	31,4 -2,2	40,3 -4,9	49,2 15,2	60,4 24,3	71,8 22,6	
схема 2	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$ $\Delta\%$	11,4 24,5	17,0 29,2	22,8 29,0	28,7 37,1	34,8 40,0	40,7 49,0	46,6 49,5	
Схема 3	$\varepsilon_\tau \cdot 10^{-5}$ $\Delta\%$	13,3 11,9	20,5 14,6	28,2 12,1	36,4 14,3	45,2 22,0	54,9 31,3	65,8 29,0	

Выводы. Принятые идеализированные структурные схемы бетонов позволили оценить по заданному их составу и реологическим свойствам составляющих напряженно-деформированное состояние бетонов при кратковременном центральном сжатии.

Наиболее полно отвечают опытным данным схемы 1 и 3. Схема 2 очень «жесткая» и дает значительный разброс по сравнению с опытом, поэтому в дальнейшем по ней не будут проводиться теоретические исследования.

Заниженная в среднем на 15% в растворе и 17% в бетоне деформативность по схеме 3 табл. 1, 2 объясняется тем, что здесь не учтены пластические деформации, связанные с микроразрушениями структуры бетона, что особенно сказывается после уровня $\eta > 0,5$.

Список литературы

1. Ахвердов М. Н. Механизм усадки и ползучести бетона в свете современных представлений реологии и физики твердого тела / М. Н. Ахвердов // Бетон и железобетон. – 1970. – № 10. – С. 21–23.
2. Гансен Т. Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне / Т. Гансен ; пер. с англ. – М. : Госстройиздат, 1963. – С. 124.
3. Гегасян С. Г. Собственные колебания вязкоупругой модели наследственного старения / С. Г. Гегасян // Бетон и железобетон. – 2001. – № 5. – С. 6–8.
4. Учет явления систематической неоднородности свойств тяжелого бетона / [Е. В. Горюхов, А. М. Югов, В. Н. Веретенников и др.] // Безопасность эксплуатации зданий и сооружений : [монография]. – М., 2011. – С. 146–167.
5. Дмитриев А. С. Влияние крупного заполнителя на прочность и деформативность высокопрочного бетона / А. С. Дмитриев // Вопросы общей технологии и ускорение твердения бетона : сб. НИИЖБ ; под ред. С. А. Миронова. – М. : Стройиздат, 1970. – С. 58–63.
6. Зайцев Ю. В. Современное состояние механики бетона в России и за рубежом / Ю. В. Зайцев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2003. – № 1. – С. 18–19.
7. Крылов С. Б. Использование реологических моделей при моделировании ползучести бетона / С. Б. Крылов, Е. Е. Гончаров //

Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 32–33.

8. Макаренко Л. П. Экспериментально-статистические исследования напряженно-деформированного состояния цементного камня и бетона при двух режимах центрального сжатия с постоянной скоростью роста загрузки и продольных деформаций / Л. П. Макаренко, Н. М. Битько // Вопросы надежности железобетонных конструкций : сб. ; под ред. А. С. Лычева. – Куйбышев, 1977. – С. 89–92.
9. Макаренко Л. П. Экспериментально-статистические исследования зависимости напряжения деформаций в цементном камне и бетонах при длительном центральном сжатии постоянной нагрузкой различной интенсивности / Л. П. Макаренко, Н. М. Битько // Вопросы надежности железобетонных конструкций : сб. ; под ред. А. С. Лычева. – Куйбышев, 1976. – С. 106–109.
10. Овсянко В. М. Компьютерный анализ электронных моделей, объектов реологии / В. М. Овсянко // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – № 4. – С. 26–34.

References

1. Akhverdov, M. N. (1970) The mechanism of concrete shrinkage and creep in the light of current ideas on rheology and solid-state physics. *Beton i zhelezobeton*, (10), pp. 21–23 [in Russian].
2. Gansen, T. (1963) Creep and stress relaxation in concrete. Moscow: Gosstroyizdat, p. 124 [in Russian].
3. Gegasyan, S. G. (2001) Characteristic oscillation of viscous-elastic model of hereditary aging. *Beton i zhelezobeton*, (5), pp. 6–8 [in Russian].
4. Gorokhov, Ye. V., Yugov, A. M., Veretennikov, V. N. et al. (2011) Taking into account of the phenomenon of systematic heterogeneity of heavy concrete features. In: The safety of buildings upkeep. Moscow, pp. 146–167 [in Russian].
5. Dmitriyev, A. S. (1970) Coarse aggregate impact on the strength and stress-strain behavior of high-precision concrete. *Voprosy obshchey tekhnologii i uskoreniye tverdeniya betona : sb. NIIZhB*, pod red. S. A. Mironova. Moscow : Stroyizdat, pp. 58–63 [in Russian].
6. Zaytsev, Yu. V. (2003) Current state of concrete mechanics in Russia and abroad. *Stroyitel'nye*

- materialy, oborudovaniye, tekhnologiyi XXI veka, (1), pp. 18–19 [in Russian].
7. Krylov, S. B. and Goncharov, Ye. Ye. (2013) The use of rheological models at concrete creep simulation. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, (2), pp. 32–33 [in Russian].
8. Makarenko, L. P. and Bitko, N. M. (1977) Experimental and statistic studies of deflected mode of cement stone and concrete at two modes of axial compression with constant speed of loading and longitudinal strain growth. *Voprosy nadezhnosti zhelezo-*
- betonnykh konstruktsey*, pod. red. A. S. Lycheva. Kuybyshev, pp. 89–92 [in Russian].
9. Makarenko, L. P. and Bitko, N. M. (1976) Experimental and statistic studies of the dependence of deformation strain in cement stone and concrete at sustained axial compression by constant loading of various intensity. *Voprosy nadezhnosti zhelezo-*
- betonnykh konstruktsey*, pod. red. A. S. Lycheva. Kuybyshev, pp. 106–109 [in Russian].
10. Ovsyanko, V. M. (2003) Computer analysis of electronic models, rheology objects. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo*, (4), pp. 26–34 [in Russian].

N. M. Bitko, Ph.D., associate professor,
e-mail: bitkonm@mail.ru

O. V. Kuznetsova, assistant lecturer,
e-mail: kuznes-68@mail.ru

V. V. Boiko, senior lecturer
e-mail: boykin.valentina@gmail.com
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF STRESS-STRAIN STATE OF CONCRETE AT SHORT-TERM AXIAL COMPRESSION BASED ON ITS IDEALIZED STRUCTURAL SCHEMES

Concrete and reinforced concrete structures have gained the leading position in the construction industry over the past century. One of the characteristics of concrete is shown in its heterogeneity. This leads to the spread of its strength and elastic-plastic characteristics by 20-40%.

In modern theory of concrete several trends are identified, such as: phenomenological, structural, statistical and destructive mechanic ones.

Currently, much attention is paid to the development of structural theory. Calculation formulas are based on the strength and elastic-plastic characteristics of the concrete components, as well as their quantitative ratios and relative position in a unit of volume. Calculating is important and urgent as the valuation of physical and mechanical properties of the concrete components is much easier than that of concrete.

Five idealized structural concrete schemes are considered for this purpose. The analysis has made it possible to identify that the spatial chess arrangement scheme of the ball shaped filler in the matrix most fully reflects how the concrete works. In this situation every single element is divided into three zones, where three parts of the ball of 1/8 each are placed in. This enables to obtain analytical dependence that could determine the elasticity modulus and its elastic-plastic characteristics. Theoretical conclusions are confirmed by experimental test data of three series of heavy concrete samples, sand concrete and cement stone. Numerical values of stresses in the concrete components, taking into account the redistribution effort, are given.

These findings have theoretical novelty. They can be used to assess the internal stress-strain state and strength of concrete at a single uploading.

Keywords: elasticity modulus, concrete, mortar, structural scheme, concrete components, filling aggregate, secant modulus of deformation.

*Рецензенти: П. А. Донченко, к.т.н., професор,
Є. М. Бабич, д.т.н., професор*

І. Г. Коцюба, к.т.н., доцент

Житомирський державний технологічний університет

вул. Чуднівська, 103, Житомир, Україна

kotsuba28@yandex.ua

(097) 539-69-83, (063) 745-17-00

АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ НАВКОЛО МІСЬКОГО СМІТТЄЗВАЛИЩА МІСТА ЖИТОМИРА

Визначено вплив звалищ на об'єкти навколишнього природного середовища, зокрема на ґрунт навколо сміттєзвалища ТПВ м. Житомира. Проаналізовано ділянки забрудненого ґрунту навколо звалища. Вивчено вплив фільтраційних вод звалища на водні об'єкти. Проаналізовано умови знаходження ТПВ на досліджуваному звалищі, проведено аналіз впливу функціонуючого звалища на ґрунти біля звалища ТПВ.

Ключові слова: полігон ТПВ (твердих побутових відходів), звалище, ґрунт, стічні води, амонійний азот, важкі метали, хлориди, екологічна логістика.

Вступ. Звалища твердих побутових відходів за рівнем шкідливого впливу на довкілля, особливо на ґрунти, вважаються об'єктами екологічного ризику. Вони є потенційними джерелами забруднення навколишнього середовища у разі порушення норм і правил їх експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та постановка завдання. Основна маса твердих побутових відходів (ТПВ) складається на сміттєвих звалищах, стихійних або спеціально організованих у вигляді сміттєвих полігонів [2–4]. Це найменш ефективний спосіб поводження з ТПВ, оскільки сміттєві звалища займають значні території переважно родючих земель. Більшість звалищ функціонують у режимі перевантаження. На міських звалищах щорічно накопичуються сотні тисяч тонн побутових відходів. Розкладаючись, вони забруднюють повітря, ґрунт, підземні води і формують суттєву екологічну небезпеку [3].

Основні недоліки існуючої організації екологічної логістики відходів є такими: об'єм відходів, які підлягають вивезенню, визначається на підставі теоретичних норм утворення відходів, що призводить до завищення коштів на вивезення, бо оплата послуг з вивезення ТПВ здійснюється в об'ємному відношенні, найчастіше сміттєвози їздять напівпорожні, що знижує якість санітарного очищення і збільшує вартість; відсутність централізованого контролю за процесом вивезення ТПВ у містах сприяє зростанню чисельності несанкціонованих сміттєзвалищ, що веде до здорожчання підтримки необхідних

санітарно-екологічних норм проживання в місті. На підставі проведеного загального аналізу системи поводження з ТПВ зробили висновок про те, що актуальність екологічної логістики систем поводження з відходами зростає з плином часу, незважаючи на величезну кількість досліджень, присвячених цій проблемі [1, 3].

В результаті аналізу літературних даних встановлено, що необхідними умовами впровадження системи екологічної логістики звалищ (полігонів) твердих побутових відходів є забезпечення моніторингу впливу звалищ ТПВ на довкілля, зокрема на ґрунти, і розроблення та впровадження стратегії переходу до розширеної системи управління та поводження з відходами [1, 6].

Об'єктом дослідження впливу звалищ на об'єкти навколишнього природного середовища, зокрема на ґрунт, вибрано процес забруднення ґрунтів біля житомирського сміттєзвалища.

Метою досліджень є дослідження впливу звалища ТПВ на довкілля, зокрема ґрунти навколо житомирського звалища.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі **завдання**: визначити умови знаходження ТПВ на досліджуваному звалищі, провести аналіз впливу функціонуючого звалища на ґрунти та надати рекомендації для проведення заходів щодо мінімізації забруднення ґрунтів біля звалища ТПВ.

Практична значимість. Проведене дослідження є аналізом впливу функціонуючого звалища ТПВ на ґрунти навколо нього

та буде використане для розробки моделювання та прогнозування впливу такого об'єкта на довкілля.

Таким чином, проблема з утилізацією відходів стає дедалі гострішою в екологічному і соціальному аспектах нашого буття. Водночас, це й економічна проблема. З ТПВ можна виготовляти тверде паливо, папір, пластмаси, полімерні матеріали, метали, скло та багато іншого. На сьогодні в Житомирі в сфері управління та поводження з твердими побутовими відходами постає ряд проблем, а саме: збільшилась кількість стихійних сміттєзвалищ (що з кожним роком зростає, хоча комунальні служби й прибирають); недостатня кількість сучасних контейнерів для збирання побутових відходів і відсутність контейнерів для роздільного збирання відходів; неналежна якість надання послуг з вивезення твердих побутових відходів; відсутність сміттєпереробного заводу; велика кількість побутових відходів на території міського звалища та непроведення моніторингу його впливу на довкілля. З цього постає проблема про впровадження екологічної логістики ТПВ як комплексної системи управління та поводження з відходами на прикладі середнього міста України – Житомир.

Всі відходи міста без попереднього сортування завозяться на міське звалище, яке було засновано стихійно в 1957 р. без будь-якого проекту спеціальних заходів і рішень щодо запобігання негативному впливу на навколишнє середовище. Площа звалища становить 21,56 га, висота накопичення відходів – 30 м, з трьох боків (а саме з півночі, півдня і сходу) навколо звалища створений земляний вал заввишки 0,4 м. Наприкінці 1998 р. вилучено 10 га земель ПАТ «Крошенського цегельного заводу» й надано управлінню житлово-комунального господарства під розширення міського звалища. Нині тіло полігона – це кар'єр зі сміттям глибиною від 15 до 18 м, дно якого має природну гідроізоляцію – шар глини глибиною 10 м. Звалище розділено на 6 карт, по периметру яких знаходяться дренажні канали для збору фільтрату до відстійників (2 шт.), які розміщені в південній частині звалища. Окремих майданчиків для розміщення різних видів відходів не зроблено. Пошарове складування відходів здійснюється частково, за наявності будівельних відходів і дорожнього змету. Дезбар'єри для запобігання виносу забруднювачів транспортними засобами за територію звалища відсутні. На полігоні проводиться

складування відходів 3 та 4-го класів небезпеки від населення міста та підприємств усіх форм власності. Джерелами надходження відходів є: відходи від багатоповерхової забудови (близько 63 %); відходи від приватної житлової забудови (близько 26 %); відходи від комерційних та інших суб'єктів господарювання (близько 11 %). Заявлений морфологічний склад побутових відходів, які надходять до полігону: харчові відходи – 33,1 %; папір – 5,9 %; метал – 3,3 %; полімерна упаковка – 13,2 %; деревина – 4,1 %; скло – 13,5 %; ганчір'я – 2 %; шкіра, гума – 1,4 %; будівельні відходи – 3,7 %; шляховий змет – 11 %; інші відходи – 8,8 %. Однак відсутність вагової на міському полігоні складування ТПВ ставить під сумнів відповідність цієї інформації реальності, як і заявленого початкового середнього коефіцієнта співвідношення маси відходів до їх об'єму (густина) – 0,27 т/м³ твердих побутових відходів.

Накопичення побутових відходів значною мірою залежить від погодних умов, сезону року, ступеня благоустрою житлових будинків, рівня життя населення тощо. У м. Житомир щороку накопичується близько 90 тис. т твердих побутових відходів. На звалищі захоронено близько 44 млн. т відходів. Густина ТПВ становить 190–230 кг/м³. Звалище експлуатується без дотримання необхідної технології, відсутня пошарова ізоляція заповнених карт, не пробурені спостережні свердловини та свердловини виведення звалищного газу, звалище не має водонепроникної основи. Таким чином, застосування екологічної логістики в системі звалищ твердих побутових відходів має об'єднати в собі відомості про місце складування, транспортування та переробки відходів, моніторинг впливу звалища на довкілля та рекомендації щодо шляхів його зменшення.

Впровадження екологічної логістики відходів на звалищі ТПВ дозволить також вивчати процеси, що відбуваються в геосистемах, – умови міграції забруднюючих речовин, які утворюються в процесі експлуатації звалищ, а також ті умови, які необхідні для підтримання штатного технологічного режиму транспортування, складування та переробки ТПВ.

Основним джерелом забруднення ґрунту є фільтраційні стоки звалища, які накопичуються у ґрунтах і внаслідок значних атмосферних опадів, що викликають перелив філь-

трату, потрапляють в об'єкти довкілля. Джерелом забруднення фільтрату в основному є розкладання харчових відходів і окиснювання металів, тому що процес розпаду складних органічних речовин відбувається вкрай повільно. Виявлено, що фільтрат утворюється на ділянці захоронення відходів протягом теплої та холодної пів року. Так, на звалищах, споруджених без дотримання правил охорони навколишнього середовища (що не мають протифільтраційного екрану, системи відведення й очищення фільтрату), фільтрат вільно стікає по рельєфу, потрапляє у ґрунт, ґрунтові й підземні води. Порівняння показників складу фільтраційних вод полігону ТПВ м. Житомир та хімічного складу фільтраційних вод полігону на різних стадіях біодеструкції показало, що його склад характерний для полігонів та звалищ, які знаходяться на завершальних етапах життєвого циклу. На основі аналізу стану звалища ТПВ м. Житомир та фізико-хімічних характеристик фільтраційних вод зроблений висновок про те, що об'єкт є типовим для України, а тому може бути використаний як базовий для створення алгоритму системи моніторингу звалищ ТПВ в Україні. Одним із головних шляхів поширення забруднення з території складування відходів є фільтрат та поверхневі води, що стікають з тери-

торії полігону під час сильних дощів. Проникнення фільтрату в ґрунти і ґрунтові води може призвести до значного забруднення навколишнього середовища не тільки шкідливими органічними і неорганічними сполуками, але й яйцями гельмінтів, патогенними мікроорганізмами.

Відбір проб ґрунтів проведено згідно з чинними нормативними документами, вимірювання проведено відповідно до стандартних методик [5, 7]. Для оцінювання впливу діючого полігону на ґрунти було зроблено аналіз показників складу ґрунту поблизу звалища в 2016 р. (табл. 1). При інтенсивних опадах рівень фільтраційних вод кожного разу піднімається вище обвалування ставка для збору фільтрату. При цьому скид фільтрату по струмку завжди відбувається в р. Крошенка. Перетікання фільтраційних вод із дренажної канами здійснюється також на сусідню земельну ділянку площею 7х13 та 4х8 м, які розташована в лісовому масиві Богунського лісництва Житомирського держлісгоспу. На постійно забруднених земельних ділянках навколо міського звалища в 2016 р. відібрали проби, було визначено 8 точок відбору за 14 показниками, площа земельних ділянок становила 25 м², а глибина відбору – 0,2 м.

Таблиця 1

Результати дослідження складу ґрунтів поблизу полігону та біля дренажного колодязя (2016 рік)

Назва \ місце відбору проб	Земельна ділянка розташована від території полігону в напрямку с. Сонячне			Земельна ділянка розташована від території полігону в напрямку вул. Андріївська			Земельна ділянка розташована за дренажною канамою в Пд-Зх напрямку від полігону		Нормативний вміст (ГДК)
	50 м	200 м	фонова	50 м	200 м	фонова	10 м	фонова	
рН	5,7	5,98	5,8	6,45	6,54	6,62	6,9	5,42	5,8
Амоній азоту	36,86	29,82	17,32	52,24	49,4	28,5	68,58	40,7	17,3
Залізо	44	32,02	29,12	40,72	15,86	15,18	224,29	125,2	29,1
Кадмій	0,08	0,13	0,1	0,19	0,18	0,08	0,22	0,15	0,1
Кобальт	0,01	0,01	0,01	0,41	0	0,36	0,77	0	5
Марганець	22,36	23,94	18,9	27,68	18	34,06	42,58	14,3	1500
Мідь	0,55	0,43	0,23	2,53	0,34	2,14	0,83	0,5	3
Нікель	0	0,12	0	0,7	0,06	0,7	0,52	0	4
Нітрати	2,2	1,76	1,31	0,45	0,34	0,73	128,4	1,7	130
Свинець	0,84	1,33	1,02	3,71	1,9	8	2,36	2,3	32
Сірка	14,86	14,13	13,8	16,1	15,5	16	54,8	17,4	160
Хлориди	68,07	51,05	51,05	68,07	34,03	34,03	204,3	34,1	51
Хром	0	0	0	3,1	0,7	2,93	3,5	0	6
Цинк	11,59	14,9	23	9,78	1,39	20,02	5,2	1,2	23

Згідно з отриманими результатами аналізу на вміст рухомих форм важких металів у зоні впливу звалища ТПВ в м. Житомир спостерігається перевищення вмісту шкідливих речовин у ґрунтах порівняно з фоном та ГДК по азоту амонійному в 2-4 рази, залізу – в 2-10 разів, кадмію та хлоридах – в 2-6 разів. Морфологічний і хімічний склад побутових та промислових відходів суттєво впливає на забруднення ґрунту в місцях їх збирання й утилізації. Основні зони забруднення важкими металами формувалися у місцях інтенсивного розвитку об'єктів, де розташована земельна ділянка за дренажною канавою в Південно-Західному напрямку від полігону.

Велику небезпеку становить той факт, що поблизу цих звалищ розташовані землі сільськогосподарського призначення та городи. Це негативно впливає на здоров'я людей, які споживають продукцію, вирощену на цих земельних ділянках. Дуже важливо виявляти зони найбільш забруднених ділянок земель, щоб заборонити використовувати їх у сільськогосподарських цілях і вжити заходів щодо поліпшення якості ґрунтів на пошкоджених ділянках.

Список літератури

1. Валерко Р. А. Забруднення важкими металами ґрунтового покриву і фітоценозів на території м. Житомира та прилеглих до нього агроєкосистем / Р. А. Валерко // Вісник ДАЕУ. – 2008. – № 1. – С. 356–357.
2. Гуцуляк В. М. Ландшафтна екологія. Геохімічний аспект / В. М. Гуцуляк. – Ч. : Наші книги, 2009. – 312 с.
3. Довгалюк А. Забруднення довкілля токсичними металами та його індикація за допомогою рослинних тестових систем / А. Довгалюк // Біологічні студії. – 2013. – Т. 7, № 1. – С. 197–204.
4. Екологічна безпека / [В. М. Шмандій, М. О. Клименко, Ю. С. Голік та ін.]. – Херсон : Олді-плюс, 2013. – 366 с.
5. Корбут М. Б. Визначення забруднення атмосферного повітря в зоні впливу полігону ТПВ м. Житомира за допомогою ліхеноіндикації / М. Б. Корбут, М. С. Мальований // Чисте місто. Чиста ріка. Чиста планета : зб. матеріалів 5-го Міжнар. еколог. форуму, (Херсон, 21-22 листоп. 2013 р.). – Херсон : ХТІП, 2013. – С. 113–117.

6. Рекомендовані норми накопичення твердого побутового сміття для населених пунктів України. – [Чинний від 10-01-2006] / М-во будівництва і архітектури. – К., 2006. – 28 с.
7. Проект Європейського Союзу «Додаткова підтримка Міністерства екології та природних ресурсів України у впровадженні Секторальної бюджетної підтримки». Інституціональний розвиток сфери поводження з відходами в Україні: на шляху європейської інтеграції / В. С. Міщенко, Ю. М. Маковецька, Т. Л. Омеляненко. – К. : Ін-т економіки природокористув. та сталого розвитку НАН України, 2013. – 192 с.
8. Федорец Н. Г. Методика исследования почв урбанизированных территорий / Н. Г. Федорец, М. В. Медведева. – Петрозаводск : Карельский научный центр, РАН, 2009. – 84 с.
9. Фурдичко О. І. Нормування антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище / О. І. Фурдичко, В. П. Славов, А. П. Войцицький. – К. : Основа, 2008. – 360 с.
10. Якість ґрунту. Відбирання проб : ДСТУ 4287 : 2004. [Чинний від 2005- 07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2005. – 5 с. – (Національний стандарт України).

References

1. Valerko, R. A. (2008) Heavy metals pollution of soil and phytocenoses on the territory of Zhytomyr and surrounding agro-ecosystems. *Visnyk DAEU*, (1), pp. 356–357 [in Ukrainian].
2. Gutsuliak, V. M. (2009) Landscape ecology. Geochemical aspect. Ch. : Nashi knygy, 312 p. [in Ukrainian].
3. Dovgalyuk, A. (2013) Environmental pollution by toxic metals and its indication by using plant test systems. *Biologichni studiyi*, 7 (1), pp. 197–204 [in Ukrainian].
4. Shmandiy, V. M., Klymenko, M. A., Golik, Yu. S. et al. (2013) Environmental safety. Kherson : OLDI-plus, 366 p. [in Ukrainian].
5. Korbut, M. B. and Malyovanyy, M. S. (2013) The definition of air pollution in the zone of influence of the landfill of Zhytomyr city with lichenoid indication. *Chyste misto. Chysta rika. Chusta planeta : proceedings of the 5th International ecological forum (Kherson, 21-22 November, 2013)*. Kherson : KhTPP, pp. 113–117 [in Ukrainian].

6. Recommended norms of accumulation of solid household waste for the settlements of Ukraine (2006) [Acting as on 10-01-2006]. Ministry of construction and architecture, Kiev, 28 p. [in Ukrainian].
7. Mishchenko, V. S., Makovetska, Yu. M. and Omelyanenko, T. L. (2013) The EU project "Complementary support of the Ministry of ecology and natural resources of Ukraine in implementation of Sectoral budget support". Institutional development of the sphere of waste management in Ukraine: on the path to European integration. Kyiv : In-t ekonomiky pryrodokorystuv. ta staloho rozvytku NAN Ukrayiny, 192 p. [in Ukrainian].
8. Fedorets, N. G. and Medvedeva, M. V. (2009) The methodology of soil research at urbanized territories. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr, RAN, 84 p. [in Russian].
9. Furdychko, O. I., Slavov, V. P. and Wojcickiy, A. P. (2008) Rate setting of anthropogenic load on the environment. Kyiv : Osnova, 360 p. [in Ukrainian].
10. Soil quality. Sampling: DSTU 4287 : 2004 (2005) [Acting as on 2005-07-01]. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 5 p. (National standard of Ukraine) [in Ukrainian].

I. G. Kotsiuba, *Ph.D., associate professor*
Zhytomyr State Technological University
Chudnivska str., 103, Zhytomyr,
e-mail: kotsuba28@yandex.ua

THE ANALYSIS OF SOIL POLLUTION AROUND A CITY LANDFILL OF ZHYTOMYR

Introduction. Landfills of household solid waste are considered as the objects of ecological risk by the level of harmful effect on the environment, especially on the soil. They are potential sources of environmental pollution in case of violation of norms and rules of their operation.

The purpose of scientific work. The objective of this research is to identify the influence of solid waste landfill on the environment, in particular, on the soil around Zhytomyr landfill.

Formulation of the problem. The study is the analysis of the impact of functioning landfill of solid waste on the soil around it and will be used to develop simulation and prediction of the impact of such an object on the environment.

The main material. The article presents the results of the research on the use of the impact of landfills on environmental objects, in particular on the soil around Zhytomyr city landfill. Areas of contaminated soil around the landfill are investigated. The influence of seepage waters of landfills on water bodies, the conditions of being of solid waste in the studied landfill, the impact of operating landfills on soils near the landfill are analyzed.

Conclusions. Most dangerous is the fact that near these landfills agricultural land and vegetable gardens are located. This adversely affects the health of people who consume products grown on these plots. It is very important to identify the zones of most polluted grounds to ban their use in agriculture and take measures to improve the quality of soil in the damaged areas.

Keywords: landfill of household solid waste, dump, soil, waste water, ammonia nitrogen, heavy metals, chlorides, environmental logistics.

Рецензенти: Д. В. Лико, д.с.-г.н., професор,
Ю. О. Подчаїшинський, д.т.н., професор

І. В. Яценко¹, к.т.н., доцент,
e-mail: irina.yatsenko.79@mail.ru

В. І. Гордієнко², д.т.н.,
О. В. Кириченко³, д.т.н., с.н.с.,
В. А. Ващенко¹, д.т.н., професор,
В. В. Цибулін¹

¹Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18030, Україна

²Державне підприємство Науково-виробничий комплекс «Фотоприлад»
вул. Б. Вишневецького, 85, Черкаси, 18000, Україна

³Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, 18034, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОУДАРНИХ ЗОВНІШНІХ ДІЙ НА ІЧ-ПРИЛАДИ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Для підвищення надійності роботи ІЧ-приладів в умовах високотемпературних надзвукових газових потоків необхідно на стадії їх проектування прогнозувати найбільш небезпечні ділянки на поверхні обтічників, у межах яких спостерігаються максимальні зовнішні термодії, що призводять до руйнування ІЧ-приладів. До цього часу недостатньо досліджено процеси нагріву обтічників з оптичних керамік у вигляді напівсферичних оболонок зустрічним надзвуковим потоком повітря для різних режимів обтікання. Тому робота присвячена моделюванню теплового впливу надзвукового потоку повітря на поверхню оптичних обтічників ІЧ-приладів та знаходженню місць розташування ділянок на них, в яких спостерігаються максимальні зовнішні термодії, що призводять до їх руйнування та виходу з ладу ІЧ-приладів.

Ключові слова: зовнішні термодії, оптичні обтічники, оптичні кераміки.

Вступ. Екстремальні умови застосування ІЧ-приладів з оптичними елементами у вигляді напівсферичних обтічників для самонаведення і спостереження за різними об'єктами призводять до суттєвої нестійкості їх роботи, появи аномалій і відмов [1–4] (рис. 1). Головною причиною цього є поверхневий нагрів обтічників зовнішнім надзвуковим потоком повітря, який призводить до виникнення значних термопружних напружень у поверхневому шарі з появою тріщин та відколів на поверхні обтічника.

Тому для підвищення надійності роботи ІЧ-приладів в умовах високотемпературних надзвукових газових потоків необхідно на стадії їх проектування прогнозувати найбільш небезпечні ділянки на поверхні обтічників, у межах яких спостерігаються максимальні зовнішні термодії, що призводять до руйнування ІЧ-приладів.

З метою створення поверхневих зміцнених шарів з підвищеною термостійкістю та механічною міцністю, що дозволяють попереджати руйнування обтічників в умовах ек-

стремальних зовнішніх термодій, на стадії фінішного виготовлення ІЧ-приладів рекомендується додатково оброблювати зазначені зони на поверхні обтічників, наприклад, рухо-мим електронним променем. Для покращення властивостей поверхневих шарів оптичних матеріалів, включаючи оптичну кераміку, найбільш ефективним технологічним інструментом нині є рухомий електронний промінь стрічкової форми [5–10].

При цьому необхідно прогнозувати максимальні температурні поля та термопружні напруження по товщині обтічників залежно від зазначених параметрів зовнішніх термодій.

До цього часу недостатньо досліджено процеси нагріву обтічників з оптичних керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12 та ін.) у вигляді напівсферичних оболонок зустрічним надзвуковим потоком повітря для різних режимів обтікання [5, 8].

Метою роботи є моделювання теплового впливу надзвукового потоку повітря на поверхню оптичних обтічників ІЧ-приладів та знаходження місць розташування ділянок на

них, в яких спостерігаються максимальні зовнішні термодії, що призводять до їх руйнування та виходу з ладу ІЧ-приладів.

1. Математичне моделювання термоударного впливу надзвукового газового потоку на поверхню обтічника. Згідно з прийнятим в аерогазодинаміці методом розв'язання контактних теплових задач нагріву надзвуковим газовим потоком вісесиметричних тіл [11, 12] задачу нагріву півсферичного обтічника зовнішнім надзвуковим газовим потоком розглядали у два етапи: знаходили тепловий потік з приграничного шару на поверхню обтічника, а потім при зазначеному тепловому потоці розраховували розподіл температури вздовж поверхні обтічника і термопружних напружень по його тов-

щині з подальшим знаходженням їх критичних значень, перевищення яких призводить до руйнування обтічників.

У цій роботі буде розглянуто лише перший етап вирішення зазначеної задачі, а в подальших дослідженнях – другий етап цієї задачі.

Тепловий потік з приграничного шару на поверхню обтічника. Газодинамічну задачу розглядали як квазістаціонарну, що справедливо для більшості практичних випадків, за винятком імпульсних режимів (рис. 2). Це обумовлено тим, що об'ємна теплоємність газового потоку (C_{V2}) мала порівняно з об'ємною теплоємністю матеріалу обтічника (C_{V0}), тобто $C_{V2}/C_{V0} \ll 1$.

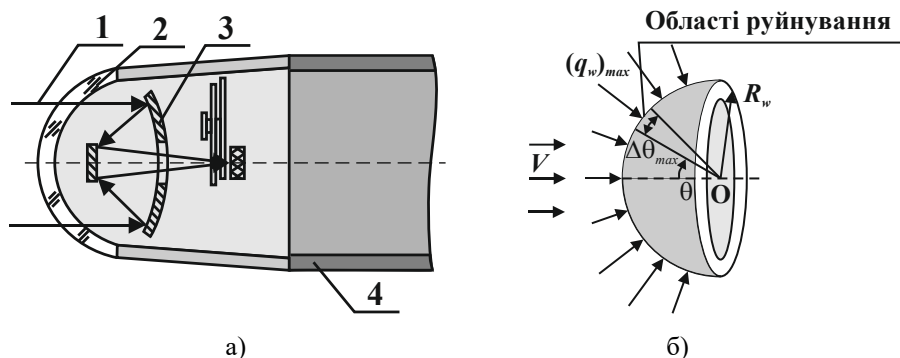


Рис. 1. Схема ІЧ-приладу самонаведення та спостереження (а) з оптичним обтічником (б):

1 – вхідне ІЧ-випромінювання від спостережуваного об'єкта; 2 – обтічник з оптичної кераміки; 3 – функціональна схема ІЧ-приладу; 4 – загальний вигляд виробу, що містить ІЧ-прилад: центральний кут обтічника, де відбувається його руйнування при турбулентному режимі обтікання $\Delta\theta_{max} \cong 4^\circ$ ($\theta_{max} \cong 19^\circ \dots 23^\circ$); радіус зовнішньої поверхні обтічника $R_w = 2 \cdot 10^{-2}$ м; товщина півсферичного обтічника $H = 4 \cdot 10^{-3}$ м; максимальна густина зовнішнього теплового впливу $(q_w)_{max} = 3 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^6$ Вт/м²; швидкість надзвукового обдуву потоком повітря $V = 7 \cdot 10^2 \dots 2,5 \cdot 10^3$ м/с

Припускаючи також, що газовий потік є нестисливим (справедливо для $u_\infty < 2 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$ м/с), для теплового потоку $q_w = const$ з приграничного шару (нульові ку-

ти атаки і ковзання) використовуємо наступний вираз, отриманий за результатами продувок вісесиметричних тіл в аеродинамічних трубах [12]:

$$q_{w0}^{(2)} = \frac{f(Pr)}{\left(\frac{\rho_\delta \cdot u_\delta \cdot x}{\mu_\delta} \right)^{1/5}} \cdot \rho_\delta \cdot u_\delta \cdot C_P \cdot (T_r - T_w), \quad (1)$$

де $f(Pr)$ – задана функція числа Прандтля Pr , яке залежить від геометричної форми тіла і режиму обтікання ($Pr = C_P \cdot \mu / \lambda_c$); ρ , u , μ , C_P , λ_c – відповідно густина, швидкість вздовж координати x , коефіцієнт динамічної в'язкості, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності газового потоку; T_w – температура поверхні обтічника; індекс « δ » – умови на зовнішній границі приграничного шару; T_r – температу-

ра відновлення у приграничному шарі, яка являє собою температуру повітря в безпосередній близькості від поверхні тіла і визначається за емпіричною формулою

$$T_r = T_\delta \left(1 + 0,2 \cdot \bar{r} \cdot M^2 \right), \quad (2)$$

де $\bar{r}$ – коефіцієнт відновлення, що характеризує частку кінетичної енергії зовнішнього потоку повітря, яка переходить у теплоємність

при повному гальмуванні потоку (для ламінарного режиму обтікання зазвичай приймають $\bar{r} = 0,85$, а для турбулентного режиму – $\bar{r} = 0,88 \dots 0,90$); M – число Маха ($M = \frac{u_\infty}{u_*}$, де u_* – швидкість поширення звуку у повітрі).

Для зон, близьких до критичної точки, залишається справедливою рівність $u_\delta = \beta x$, де β – функція тільки числа u_∞ незбудженого потоку перед ударною хвилею (для ламінар-

ного режиму зазначене співвідношення отримане шляхом вимірювання тиску та розрахунку швидкостей). Підстановка рівності $u_\delta = \beta x$ в (1) дає

$$q_w = f(Pr) \cdot \beta^{4/5} \cdot \mu_\delta \cdot x^{3/5} \cdot C_P \cdot (T_r - T_w). \quad (3)$$

Підставляючи у (3) відомі газодинамічні співвідношення, отримуємо наступний вираз для теплового потоку у випадку турбулентного режиму обтікання:

$$q_w = \frac{0,00042}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot R_w}{u_\infty} \right)^{4/5} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot x_0} \right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} \right)^{4/5} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} \right)^{1/5} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_P \cdot (T_r - T_w) \cdot (\sin \theta)^{3/5}. \quad (4)$$

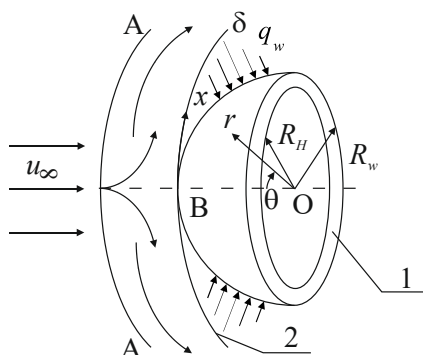


Рис. 2. Схема нагріву півсферичного обтічника:

1 – півсферична оболонка з оптичного матеріалу; В – передня критична точка (швидкість потоку дорівнює нулю); 2 – зовнішня межа приграничного шару товщиною δ , r , θ – сферичні координати; R_w , R_H – радіуси зовнішньої та внутрішньої поверхонь обтічника відповідно; індекс « ∞ » – значення параметрів у повітряному потоці, що набігає

Аналогічно для ламінарного режиму обтікання півсфери тепловий потік можна представити у вигляді

$$q_{w0}^{(2)} = \frac{0,0083}{Pr^{2/3}} \cdot \left(\frac{\beta \cdot R_w}{u_\infty} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{v_\infty}{u_\infty \cdot x_0} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} \right)^{1/2} \cdot \rho_\infty \cdot u_\infty \cdot C_P \cdot (T_r - T_w). \quad (5)$$

У формулах (4) та (5) вираз для β має вигляд

$$\beta = \frac{u_\infty}{2 \cdot R_w} \cdot \left(\frac{8 \cdot (\gamma_\infty - 1) \cdot M^2 + 2}{(\gamma_\infty + 1) \cdot M^2} \cdot \left[1 + \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot \frac{(\gamma_\infty - 1) \cdot M^2 + 2}{2 \cdot \gamma_\infty \cdot M^2 - (\gamma_\infty - 1)} \right]^{-\frac{1}{\gamma_\infty - 1}} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Співвідношення $\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty}$ та $\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty}$ визначаються розрахунком тиску за методом Ньюто-

на та адіабатичного розширення від критичної точки вздовж поверхні обтічника (в напрямку x):

$$\frac{\rho_\delta}{\rho_\infty} = 6,35 \cdot \left(1 - \frac{1}{7 \cdot M^2} \right)^{-2,5} \cdot \left(1 + \frac{5}{M^2} \right)^{-1} \cdot \bar{P}^{-5/2}, \quad (7)$$

$$\frac{\mu_\delta}{\mu_\infty} = 0,447 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{5}{M^2}\right)^{-1/2} \cdot \frac{1 + S/T_\infty}{1 + S/T_T} \cdot \bar{P}^{-3/14}, \quad (8)$$

де S – стала Сатерленда ($S = 110,4$ К); $\bar{P}$ – відношення тиску на зовнішній границі пограничного шару P_δ до тиску гальмування P_T ; T_T – температура гальмування.

На базі порівняння з експериментальними даними отримана досить точна (відносна похибка 3...5%) формула для визначення розподілу тиску в напрямку θ [12]:

$$\bar{P} = 1 - (1,525 - 1,85 \cdot \bar{k}_0) \cdot (\sin \theta)^2 + (0,487 - 1,323 \cdot \bar{k}_0) \cdot (\sin \theta)^4, \quad (9)$$

де $\bar{k}_0$ – ущільнення повітря за прямим стрибком:

$$\bar{k}_0 = \frac{\gamma_\infty - 1}{\gamma_\infty + 1} + \frac{2}{(\gamma_\infty + 1) \cdot M^2}. \quad (10)$$

Тиск у точці гальмування визначається за формулою

$$P_T = P_\infty \cdot M^2 \cdot \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot \left[\frac{(\gamma_\infty - 1) \cdot M^2}{4 \cdot \gamma_\infty \cdot M^2 - 2 \cdot (\gamma_\infty - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma_\infty - 1}}. \quad (11)$$

Температура гальмування має вигляд

$$T_T = T_\infty \cdot \left(1 + \frac{\gamma_\infty - 1}{2} \cdot M^2\right). \quad (12)$$

При розрахунках кількість Pr_δ для повітря можна вважати постійною і рівною 0,71, оскільки вона мало залежить від температури. Питому теплоємність повітря C_p для випадку течії ідеального газу також можна вважати постійною величиною, що дорівнює $C_p = 10^3$ Дж/кг·К.

2. Результати розрахунків розподілів теплового потоку з приграничного шару вздовж поверхні обтічника та їх аналіз. За формулами (4), (5) з використанням спеціально розроблених пакетів прикладних програм [4, 8] було проведено розрахунки розподілів теплового потоку з приграничного шару вздовж поверхні обтічника (рис. 3–5).

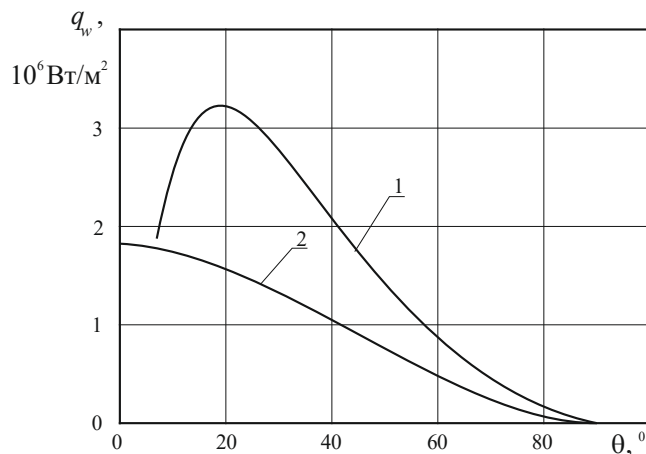


Рис. 3. Розподіл теплового потоку q_w вздовж поверхні обтічника при його надзвуковому обдуві потоком повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінальний режим обтікання

З результатів розрахунків, зображених на рис. 3–6, випливає, що місця розташування максимальних значень теплового потоку $(q_w)_{max}$ на поверхні обтічника істотно зале-

жать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення $(q_w)_{max}$ знаходяться поблизу передньої критичної точки ($\theta = 0^\circ$) обтічника; для турбулентного режиму

обтікання значення $(q_w)_{max}$ вже зміщуються від $\theta = 0^\circ$ до θ_{max} .

При цьому зі збільшенням швидкості обдуву потоком повітря від $u_\infty = 7 \cdot 10^2$ м/с до $u_\infty = 2 \cdot 10^3$ м/с значення $(q_w)_{max}$ зростають від $0,3 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання) та від $0,2 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (ламінальний режим обтікання).

Для ламінарного режиму обтікання $\theta_{max} = 0^\circ$ незалежно від u_∞ .

При турбулентному режимі обтікання для дослідженого діапазону зміни $u_\infty = 7 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с значення θ_{max} лежать у межах $19 \dots 23^\circ$, тобто θ_{max} практично не змінюється, що повністю відповідає отриманим експериментальним значенням.

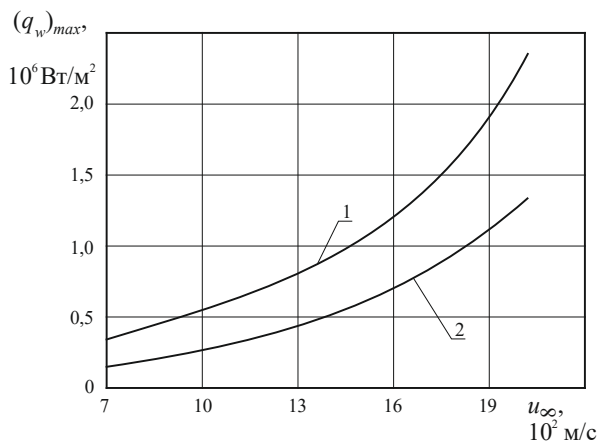


Рис. 4. Залежність максимальних значень теплового потоку $(q_w)_{max}$ від швидкості надзвукового обдуву потоком повітря обтічника ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м):

- 1 – турбулентний режим обтікання;
2 – ламінальний режим обтікання

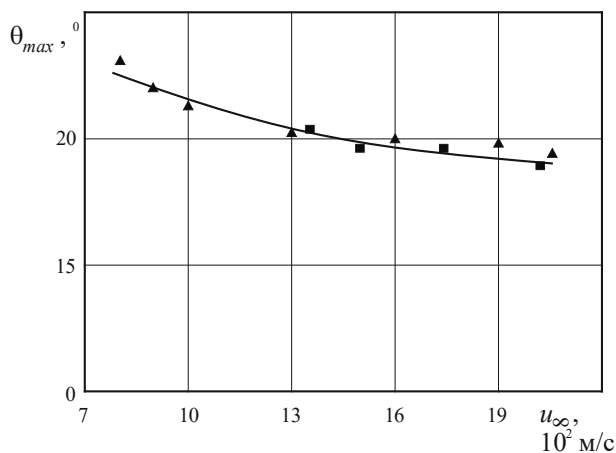


Рис. 5. Залежність $\theta_{max}(u_\infty)$ для турбулентного режиму обтікання півсфери ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м): $\blacktriangle$, $\blacksquare$ – результати лабораторних і натурних випробувань відповідно

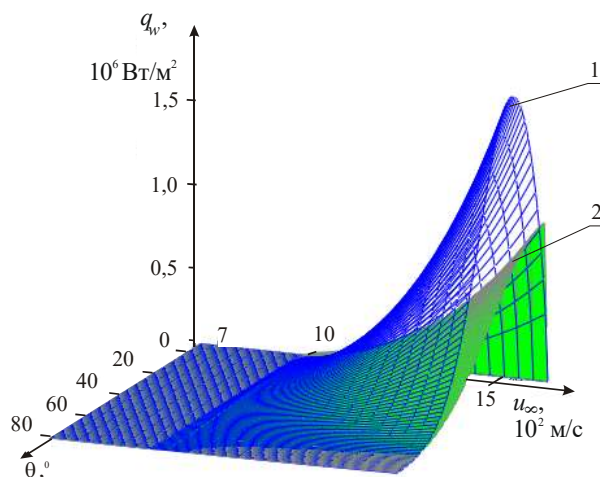


Рис. 6. Зображення розподілу теплового потоку $q_w(\theta, u_\infty)$ на зовнішній поверхні півсфери, яку обтікає надзвуковий потік повітря ($T_0 = 300$ К; $R_w = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м): 1 – турбулентний режим обтікання; 2 – ламінарний режим обтікання

Висновки:

1. Розташування максимальних значень теплового потоку $(q_w)_{max}$ на поверхні обтічника залежать від режиму обтікання: для ламінарного режиму обтікання значення $(q_w)_{max}$ знаходяться поблизу передньої критичної точки ($\theta = 0^\circ$) обтічника; для турбулентного режиму обтікання значення $(q_w)_{max}$ вже зміщуються від $\theta = 0^\circ$ до $\theta_{max} = 19 \dots 23^\circ$.

2. Тепловий потік у зонах максимального зовнішнього теплового впливу на поверхню обтічника істотно залежить від швидкості обдуву потоком повітря (для $u_\infty = 7 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3$ м/с значення $(q_w)_{max}$ зростають від $0,3 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (турбулентний режим обтікання) та від $0,2 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,3 \cdot 10^6$ Вт/м² (ламінарний режим обтікання).

Список літератури

1. Лазарев Л. П. Инфракрасные приборы самонаведения летательных аппаратов / Л. П. Лазарев. – М. : Машиностроение, 1970. – 231 с.
2. Обтекатели и защитные окна / [А. И. Лазарев, П. А. Захаров, А. И. Герасимов и др.]. – М. : ЦНИИ информации, 1982. – 312 с.
3. Тарасов В. В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушников. – М. : Логос, 2004. – 444 с.
4. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе : монография / [В. А. Ващенко, Д. И. Котельников, Ю. Г. Лега и др.]. – К. : Наукова думка, 2006. – 368 с.
5. Спеціальні методи обробки оптичного скла : навч. посіб. / [М. П. Бочок, Н. П. Будко, В. А. Ващенко та ін.]. – Чернігів : Чернігів. держ. технол. ун-т, 2001. – 215 с.
6. Получение функциональных слоев в оптическом стекле и керамике методом электронной обработки / [Г. Н. Дубровская, Г. В. Канашевич, В. А. Ващенко и др.]. // Функциональные покрытия на стеклах : сб. докл. Междунар. науч.-практ. симпозиума. – Харьков : НТЦ ХФТИ «Константа», 2003. – С. 135–137.
7. Яценко І. В. Дослідження залежностей енергетичних характеристик СЕП від його керованих параметрів при впливі на виробі мікрооптики і інтегральної оптики / І. В. Яценко // Труды Одесского политехнического института : сб. – 2009. – Вып. 2 (32). – С. 143–149.
8. Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів / Ващенко В. А., Яценко І. В., Лега Ю. Г., Кириченко О. В. – К. : Наукова думка, 2011. – 562 с.
9. Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making / Yatsen-

- ko I., Antoniuk V., Bondarenko M., Vashchenko V. // *Innovations in discrete productions: International journal for science and innovations for the industry*, ISSN 114-8907, YEAR III, ISSUE 1/2015, Sofia. – P. 13–15.
10. Yatsenko I. V. Experimental and statistical models of impact determination of the electron beam parameters on surface layers properties of optical elements in precision instruments building // “Pratsi. Odes’kyi politechnichniy universytet”, 2016. – Issue 1 (48). – P. 63–69.
11. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
12. Гинзбург И. П. Аэрогазодинамика / И. П. Гинзбург. – М. : Высшая школа, 1966. – 404 с.
6. Dubrovskaya, G. N., Kanashevich, G. V., Vashchenko, V. A. et al. (2003). Obtaining of functional layers in optical glass and ceramics by means of electronic processing. *Funktsionalnye pokrytiya na styeklah*: collection of reports of Internat. scient.-pract. symposium. Kharkov : NTC HFTI “Kons-tanta”, pp. 135–137 [in Russian].
7. Yatsenko, I. V. (2009) Research of dependences of BEF energy characteristics from its managed parameters when exposed to products of micro-optics and integrated optics. *Trudy Odesskogo politechnicheskogo instituta*, 2 (32), pp. 143–149 [in Ukrainian].
8. Vashchenko, V. A., Yatsenko, I. V., Lega, Y. G. and Kyrychenko, O. V. (2011) The fundamentals of electronic processing of optical materials goods. Kyiv : Naukova dumka, 562 p.
9. Yatsenko, I., Antoniuk, V., Bondarenko, M. and Vashchenko, V. (2015). Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making. *Innovations in discrete productions: International journal for science and innovations for the industry*, (1), Sofia, pp. 13–15, ISSN 114-8907.
10. Yatsenko, I. V. (2016) Experimental and statistical models of impact determination of the electron beam parameters on surface layers properties of optical elements in precision instruments building. *Pratsi. Odes’kyi politechnichniy universytet*, 1 (48), pp. 63–69.
11. Abramovich, G. N. (1969) Applied gas dynamics. Moscow, Nauka, 824 p. [in Russian].
12. Ginsburg, I. P. (1966) Aerogasdynamics. Moscow : Vyschaya shkola, 404 p. [in Russian].

References

I. V. Yatsenko¹, Ph.D., associate professor,
e-mail: irina.yatsenko.79@mail.ru

V. I. Gordienko², D.Tech.Sc.,

O. V. Kirichenko³, D.Tech.Sc., senior staff scientist,

V. A. Vaschenko¹, D.Tech.Sc., professor,

V. V. Tsybulin¹

¹Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18030, Ukraine

²State enterprise Research and Production Complex "Photoprylad"
B. Vyshnevetskogo str., 85, Cherkasy, 18000, Ukraine

³Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroyiv Chornobyl'ya
of National University of Civil Protection of Ukraine
Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

DETERMINATION OF THERMAL SHOCK EXTERNAL INFLUENCES ON IR-DEVICES AT THEIR OPERATION

To improve the reliability of IR-devices in the conditions of high temperature supersonic gas flows it is necessary at the design stage to predict the most dangerous areas on fairings surface, within which there are maximum external thermal influences that lead to the destruction of IR-devices. By this time the processes of heating of optical ceramics fairings in the form of hemispherical shells by oncoming supersonic airflow for different flow regimes are insufficiently investigated.

The aim of this work is to simulate thermal effect of supersonic airflow on the surface of optical fairings of IR-devices and to find the locations in which there are maximum external thermal influences, leading to their destruction and IR-devices failure.

The results of experimental and theoretical investigations of the process of thermal influence of supersonic gas flow in hemispherical fairings on optical ceramics of IR-devices are presented. Analytical expressions for the distributions of heat flux from boundary layer along the surface of the fairing are received and the location of its sites subjected to a maximum external thermal influences is installed. The location of the maximum values of heat flux $(q_w)_{max}$ on the surface of the fairing depends on the flow regime: for laminar flow the values $(q_w)_{max}$ are close to the front of critical point ($\theta = 0^\circ$) fairing; for turbulent flow the values $(q_w)_{max}$ have already shifted from $\theta = 0^\circ$ to $\theta_{max} = 19...23^\circ$. Heat flux in the zones of maximum external thermal impact on the surface of the fairing substantially depends on the velocity of blowing airflow (for $u_\infty = 7 \cdot 10^2 ... 2 \cdot 10^3$ m/s values $(q_w)_{max}$ increase from $0,3 \cdot 10^6$ W/m² to $2,3 \cdot 10^6$ W/m² (turbulent flow regime) and from $0,2 \cdot 10^6$ W/m² to $1,3 \cdot 10^6$ W/m² (laminar flow regime).

Keywords: external thermal influences, optical fairings, optical ceramics.

Статтю представляє д.т.н., професор В. А. Ващенко, Черкаський державний технологічний університет.

ДВЕ СТОРОНЫ ОДНОГО ЧЕЛОВЕКА

*Памяти профессора Валерия Михайловича Шарапова
(из воспоминаний коллег)*

26 октября 2014 года навсегда остановилось сердце известного в широких кругах ученого, заслуженного деятеля науки и техники Украины, доктора технических наук, профессора и просто очень хорошего и талантливого человека – Валерия Михайловича Шарапова. Прошло два года, долгих и тяжелых года...



Официальная биография Валерия Михайловича Шарапова, которую он сам озвучивал и описывал в различных источниках информации, звучала так.

В 1962 г. закончил Шосткинский химико-технологический техникум по специальности «Технология производства взрывчатых веществ», а в 1969 г. – филиал Московского инженерно-физического института (в настоящее время это Северский государственный технологический институт Министерства атомной промышленности Российской Федерации) по специальности «Автоматика и электроника ядерных установок».

Кандидатскую диссертацию Валерий Михайлович защитил в 1977 г. в Томском институте автоматики, электроники и систем управления. К защите докторской по специальности «Вычислительные машины, системы и сети, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» на тему «Методы и средства синтеза анизотропных пьезоэлектрических преобразователей физических величин» он шел почти 20 лет, и, наконец, в 1996 г. в Одесском национальном политехническом университете Валерию Михайловичу Шарапову

покорилась и эта вершина.

Дальше была работа в атомном центре «Томск-7», на ГП НПК «Фотоприбор», в НИИ «Химаналит», в НПО «Фонон». Некоторые приборы и системы, в разработке которых, работая на производстве, принимал участие В. М. Шарапов, выпускались серийно промышленностью и используются до сих пор. Его трудовая книжка изобилует записями о многочисленных премированиях за различные рационализаторские предложения, внедрение новой техники, высокие результаты в изобретательстве, а также благодарностями за высокие показатели в труде. В 1975 г. Валерий Михайлович был награжден знаком «Победитель социалистического соревнования», а в 1976 г. – «Ударник IX пятилетки».

В 1988 г. В. М. Шарапову присвоили ученое звание старшего научного сотрудника.

Свою преподавательскую деятельность Валерий Михайлович начал сначала по совместительству в 1978 г. на кафедре радиотехники тогда еще Черкасского инженерно-технологического института, а желание навсегда связать себя с научно-педагогической деятельностью пришло в 1993 г. Именно в этом году в трудовой книжке В. М. Шарапова появилась первая запись: «Принят на должность доцента кафедры радиотехники как избранный по конкурсу».

В январе 1999 г. В. М. Шарапова назначили заведующим кафедрой приборов точной механики. В 2000 г. он получил ученое звание профессора этой кафедры, а в 2005 г. его заслуги для системы образования и науки были оценены на наивысшем уровне, и Указом президента Украины от 23 августа 2005 г. № 1193 Валерию Михайловичу присвоили почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Украины».

С ноября 2000 по март 2005 г. Валерий Михайлович был проректором по научно-исследовательской работе и параллельно руководил кафедрой. А еще, начиная с 2000 г. и до самой смерти, был заместителем главного редактора научно-технического журнала «Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки», стоял у истоков создания и открытия специализированного ученого совета по защите кандидатских диссертаций по специальностям 05.13.05 и 05.13.06.

Имея разносторонние интересы, в 1998 – 2000 гг. работал по совместительству профессором и заведующим кафедрой менеджмента Восточно-Европейского университета экономики и менеджмента.

Работая на кафедре компьютеризированных и информационных технологий в приборостроении ЧГТУ, Валерий Михайлович преподавал такие дисциплины, как: «Преобразующие устройства приборов», «Технология приборостроения», «Технология обучения», «Введение в специальность». К сфере его интересов относились: датчики, приборы и системы для атомной, ракетной промышленности, медицинские приборы, пьезоэлектрические датчики, системный анализ, технологии управления социальными системами, неразрушающие методы контроля и другое. Он успешно руководил бюджетной и хозяйственной тематиками.

Он создал и успешно руководил научной школой пьезотехники, в рамках которой при его жизни были успешно защищены две докторские (Лукашенко В. М., Мусиенко М. П.) и 15 кандидатских диссертаций (Чудаева И. Б., Сарвар И., Мусиенко М. П., Роттэ С. В., Кисиль Т. Ю., Бондаренко Ю. Ю., Трёмбовецкая Р. В., Марченко С. В., Раевский Н. В., Туз В. В., Сотула Ж. В., Базило К. В., Филимонов С. А., Куницкая Л. Г., Коваленко А. М.) по специальности 05.13.05.

Был автором более 900 научных публикаций, в том числе: 19 монографий и учебных пособий, более 500 патентов на изобретения.

Наиболее значимыми своими трудами Валерий Михайлович всегда называл монографии, особенно те, что вышли во всемирно известных издательствах, таких как: Springer (Германия) или Техносфера (Россия).

Вот некоторые из них:

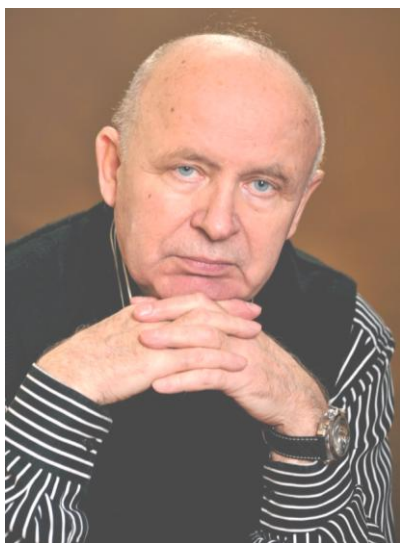
1. Sharapov V., Sotula Zh., Kunitskaya L. Piezoelectric electroacoustic transducers. – Springer Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2013. – 240 p.
2. Sharapov V. Piezoceramic sensors. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2011. – 498 p.
3. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Сотула Ж. В., Куницкая Л. Г. Электроакустические преобразователи. – М.: Техносфера, 2013. – 280 p.
4. Шарапов В. М. и др. Датчики. – М.: Техносфера, 2012. – 616 с.
5. Шарапов В. М. и др. Пьезоэлектрические датчики. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Шарапов В. М. и др. Универсальные технологии управления. – М.: Техносфера, 2006. – 496 с.
7. Шарапов В. М. и др. Пьезоэлектрические преобразователи: справ. пособие. – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с., ил.
8. Шарапов В. М. и др. Пьезокерамические преобразователи физических величин. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 631 с.
9. Шарапов В. М. и др. Теория автоматического управления: учеб. пособие. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 200 с.
10. Шарапов В. М. и др. Технологии приборостроения. – Черкассы: Брама, 2009. – 320 с.
11. Шарапов В. М., Шейнов В. П. Технологии управления проектами. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – 520 с.
12. Шарапов В. М., Шарапова Е. В. Технологии управления: практический менеджмент. – Черкассы: ЧГТУ, 2005. – 563 с.
13. Шарапов В. М. и др. Пьезокерамические трансформаторы и датчики. – Черкассы: Вертикаль, 2010. – 278 с.
14. Шарапов В. М. и др. Емкостные датчики. – Черкассы: Брама-Украина, 2010. – 184 с.
15. Шарапов В. М., Сотула Ж. В., Куницкая Л. Г. Пьезоэлектрические электроакустические преобразователи. – Черкассы: Вертикаль, 2012. – 255 с.

Некоторые из последних и значимых публикаций:

1. Шарапов В. М., Сотула Ж. В., Куницкая Л. Г., Ткаченко А. С. Изменение параметров пьезоэлектрических преобразователей с помощью добавочных элементов // Современная электроника (Москва). – 2013. – № 3. – С. 56–57.
2. Шарапов В. М., Салогор А. М., Сотула Ж. В., Заика В. М. Применение объёмных резонаторов в пьезоэлектрических электроакустических преобразователях // Современная электроника (Москва). – 2013. – № 5 – С. 58–60.

3. Sharapov V. M., Petrishchev O. N., Sotula Zh. V., Bazilo K. V. The research of parameters of dynamic stress strained state of asymmetric bimorph piezoceramic elements // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 4.
4. Шарапов В. М., Петрищев О. Н., Прохоренков А. М., Сотула Ж. В., Базило К. В. Методы повышения звукового давления мономорфных акустических пьезоэлементов // Известия вузов. Приборостроение. – Санкт-Петербург, Россия. – 2014. – № 5. – С. 47–50.
5. Шарапов В. М., Совлуков А. С., Сотула Ж. В., Базило К. В., Заика В. М. Пьезоэлектрический преобразователь с резонатором Гельмгольца // Датчики и системы (Москва). – 2014. – № 3. – С. 18–21.
6. Sharapov V. M., Prokhorenkov A. M., Istratov R. A., Sovlukov A. S. Study of multiple-stage continuous-discrete port overload systems // The 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. – Germany. – 2013.

Была и другая сторона этого многогранного человека.



Мало кто знал, например, что Валерий Михайлович был кандидатом в мастера спорта СССР по футболу. Что у него был брат-близнец Леонид, родившийся на 2 минуты позже него, а покинувший этот мир на 10 лет раньше. Что, кроме Леонида, были еще два старших брата и сестра. Большинство коллег считало, что он одинок, но он никогда не был один. Помимо пьезопреобразователей, его главным хобби была фотография. По словам жены его брата Владимира, он часами мог сидеть с фотоаппаратом и ожидать события, чтобы получить желаемый кадр. Он выпустил несколько фотоальбомов со своими любительскими фото. А еще Валерий Михайлович великолепно играл на фортепиано и саксофоне, а когда инструментов под рукой не было, он мог выстукивать любимые мелодии просто на письменном столе так, как будто бьет по клавишам. А как он танцевал! Особенно танго! Глаза в глаза и вел партнершу по танцполу или просто по набережной так, что случайные зрители сначала замирали от восхищения, а

потом неистово аплодировали. Так мог только он. Вроде «маленький, толстый и лысый», как он сам о себе говорил, но сколько же в нем было обаяния, шарма и харизмы.

Валерий Михайлович был уникальным человеком. Таких людей, как он, на планете рождаются единицы. А я лично таких, как он, больше не встречала в своей жизни. Он сам всегда говорил, что незаменимых людей нет. Так он ставил нас, немножко зарвавшихся и зазнавшихся молодых ученых, уже имеющих собственное мнение и взгляд на все вещи в мире, на место. Вводил так называемую «обратную связь». «Незаменимых нет» – иногда мне кажется, что я слышу его голос, и на глаза набегают слезы, потому, что его самого нельзя заменить, по крайней мере, для меня, для его родных и близких, для его учеников. Такого, как ОН, рядом больше не будет никогда. Я очень долго думала о том, как написать эту статью памяти, какие слова подобрать, а потом решила писать сердцем. Писать искренне, как всегда относилась к нему, потому, что Валерий Михайлович был мне как второй отец. Так же искренне, как иногда не понимала некоторых его требований и спорила, так же искренне, как на его похоронах я не верила, что в гробу лежит этот дорогой моему сердцу человек. Я так радуюсь, когда он мне снится, еще живой и как всегда бесконечно энергичный. Я могу разговаривать о нем часами... Тихие слезы будут катиться по щекам, а горячая и безграничная боль будет греть душу, хотя и напрасными, однако искренними надеждами на то, что пока я буду говорить, он будет опять рядом... Будет ругать, что я слишком громко читаю лекцию и, как всегда, не закрыла двери в аудиторию, а потому мешаю ему рассуждать над статьей или очередной идеей относительно нового направления исследований. Как мне этого не хватает... Не хватает его звонков каждый вечер, чтобы поделиться идеей или спросить какой-нибудь бытовой пустяк. Это моя тоска. Я не знаю, не хватает ли его еще кому-нибудь на планете так же, как мне. Недавно, пересматривая старые файлы на компьютере, я нашла письмо одиннадцатилетней давности. Профессор Альф-

ред Николаевич Куценко, который написал его, был близким и давним другом Валерия Михайловича, настоящим одесситом, известным физиком, талантливым юмористом и просто очень хорошим человеком. Это письмо было адресовано и посвящено 60-летию Валерия Михайловича. Письмо было написано с юмором, дружеской любовью и уважением к его таланту. И, когда я сейчас перечитывала его, каждое слово вызывало в сердце и в душе целую бурю чувств и эмоций, потому что каждый, кто знал Валерия Михайловича, безапелляционно увидит его в каждом прочитанном слове этого письма. Я приведу это письмо лишь частично, но с оригинальным авторским оформлением.

Дорогой Валерий Михайлович!

Быть может, Вам известно, что в настоящее время я упорно работаю над книгой **всей моей жизни** – «**Неполным содраньем сочинений**» (**Физики дошутятся**). В её рамках я заинтересовался этимологией имён (этимология физической терминологии – это моё хобби)... Направляю свой последний шедевр, посвящённый лично Вам. Если что-нибудь Вам не понравится, прошу не обижаться – **это наука**, а против науки не попрёшь...

ВАЛЕРИЙ МИХАЙЛОВИЧ ШАРАПОВ (09.01.1944)

*Мало иметь хорошее имя.
Надо ещё и соответствовать ему
Неизвестный классик*

*Всем хорош Шарапов, только нет на него Жеглова.
Известный классик*

Энергия такого словосочетания – это энергия любви и уважения!

Наиболее характерные черты: внутренняя сила и способность долго аккумулировать напряжение, общительность и безапелляционность, человечность и способность понять чужую беду и помочь ближнему, разносторонность и широта взглядов. Он иногда горячится, но необидчив и способен оценить шутку в свой адрес. Это самодостаточная личность, готовая в нужную минуту постоять за себя. **Палец в рот ему не клади!** С юности он испытывает потребность закалять характер, чтобы подчеркнуть своё мужество. Он может реализовать себя в **науке**, искусстве, спорте, медицине, коллекционировании, например, различных сортов чая и кофе (если позволят финансовые возможности), самовыразиться на руководящих постах, ибо он мастерски владеет имеющимися в его распоряжении педагогическими методами **кнути и пряника**. Следует отметить, что **характер Валерия Михайловича соткан из противоречий**. Это самолюбивый и своевольный человек, любящий и любимый женщинами, одновременно нежный и резкий, скрытный и дипломатичный, расчётливый эгоист и бескорыстный альтруист, высокообразованный эрудит, имеющий в любой области своё собственное мнение, с быстрым умом, подчиняющимся более **интуиции**, чем **логике**. В этом можно легко убедиться, втянув его в дискуссию. В споре его скрытность и дипломатичность испаряются, он способен кого угодно убедить в чём угодно и заразить своими эмоциями...

Камень-талисман: кварц, титанат бария, цирконат свинца, турмалин, сегнетова соль, яшма, изумруд.

Пожелаем же Валерию Михайловичу здоровья и бодрости, счастья и взаимопонимания в семье и творческом коллективе, достижения намеченных целей, финансового благополучия, пристойной пенсии и максимальной валентности во всех отношениях!

09.01.2004 г.

И вот прошло два года, два долгих и тяжелых года без Валерия Михайловича. Рука не поднимается убрать его портреты из кабинета, где раньше работал он, а теперь работаю я. Иногда мне кажется, что благодаря этим портретам он всегда рядом и что именно он помог мне пережить эти последние два года сумятицы в университете. Когда он заболел, кафедра на своем заседании возложила на меня ответственность за исполнение обязанностей заведующего. И я посчитала себя обязанной сделать все, чтобы светлая память о моем Учителе жила и не угасала. Вместо него возглавила научно-исследовательскую тему, как координатор продолжила международный проект, взяла на себя руководство аспирантами, которые начинали свои научные работы под его началом, а еще взяла под свое крыло научную школу, которую решили переиме-

новать в Школу пьезотехники имени профессора В. М. Шарапова. И сегодня могу с уверенностью сказать, что он бы гордился и мной, и своей научной школой.

За эти два года защитилось еще два кандидата наук (Ткаченко А. и Заика В. М.), открыта специальность по подготовке PhD, новая смена аспирантов пришла на кафедру, учениками школы пьезотехники имени профессора В. М. Шарапова за эти два года опубликовано три монографии, один учебник, 10 учебных пособий, более 20 статей, в том числе три в изданиях, которые входят в наукометрическую базу Scopus, более 90 тезисов докладов на различных конференциях, получено более 20 патентов Украины на полезные модели.

Вот только некоторые из них:

1. Мікроскопія в нанотехнологіях / Ю. Ю. Бондаренко та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 260 с.
2. Біофізика в задачах та прикладах: навч. посіб. / Ю. Ю. Бондаренко та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2015.
3. Механизм возникновения и нейтрализация остаточного трибоэлектричества при сканировании кремниевым зондом атомно-силового микроскопа диэлектрических поверхностей / Ю. Ю. Бондаренко и др. // Журнал нано- та електронної фізики. – 2014. – Т. 6, № 2, 02018 (5 с.). (Фахова, Scopus, РИНЦ)
4. Улучшение характеристик электроакустических преобразователей для устройств ультразвуковой дальнометрии / В. М. Заика, К. В. Базило, В. В. Туз, О. И. Маштапа // Наукові праці : науково-методичний журнал. – Вип. 238, Т. 250. Комп'ютерні технології. – Миколаїв: Видво ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. – С. 54–58. (фахове видання)
5. Формування зносостійких покриттів на кремнієвих зондах для атомно-силової мікроскопії термовакuumним випаровуванням / М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та ін. // Твердые материалы. – 2015. – № 2. – С. 60–69. (Фахова, Scopus, РИНЦ)
6. Formation of wear-resistant coatings on silicon probes for atomic force microscopy by thermal vacuum evaporation / M. O. Bondarenko, Yu. Yu. Bondarenko and other // Journal of Superhard Materials. – 2015. – Vol. 37, No. 2, pp. 112–119. (Фахова, Scopus)
7. Принципы расчета пьезоэлектрических элементов с частично электродированными поверхностями / О. Н. Петрищев, В. М. Шарапов, Ж. В. Сотула, К. В. Базило // Радіоелектроніка, інформатика, управління (Запоріжжя). – 2015. – № 1. – С. 15–25. (фахове видання)
8. The research of piezoelectric electrodes for vibroacoustic interference therapy / K. V. Bazilo, O. N. Petrishchev, Yu. Yu. Bondarenko, L. G. Kuniyska, V. V. Medianik // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 2. – С. 12–15. (фахове видання)
9. П'єзоелектричні перетворювачі для роботехніки / Ж. В. Сотула, К. В. Базило, В. В. Туз // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 1. – С. 190–192. (фахове видання)
10. The accounting parameters of biological tissues in the virtual simulation of the interaction skin laser radiation / R. V. Trembovetskaya, T. Yu. Kisil, V. V. Tyshkov // Conference proceedings of III International scientific-practical conference "Information Technologies in Education, Science and Technology" (ITEST-2016), (Cherkasy, May 12-14, 2016). – Cherkasy: ChSTU, 2016. – pp. 32–34.
11. Куницкая Л. Г., Гусева А. Ю. Электронный термометр с непосредственным отсчетом // Проблеми інформатизації: матеріали третьої міжнар. наук.-техн. конф. – Черкаси: ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УЕІГН; Полтава: ПНТУ, 2015. – С. 74–75.
12. Електроакустичний перетворювач / К. В. Базило, О. М. Петрищев, Ю. Ю. Бондаренко, Л. Г. Куницька, А. М. Салагор // Патент України 107895, МПК H04R 17/00 за заявкою № 201512691 від 22.12.2015, опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.
13. Електроакустичний перетворювач / К. В. Базило, О. М. Петрищев, Ю. Ю. Бондаренко, Л. Г. Куницька, Ю. А. Петрушко // Патент України 107896, МПК H04R 17/00 за заявкою № 201512707 від 22.12.2015, опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

Мы с честью несем гордое имя «шараповцы» и светлая память об уникальном человеке и гениальном ученом Валерии Михайловиче Шарапове всегда будет в наших сердцах!

К.т.н., доцент Ю. Ю. Бондаренко

ВІСНИК
Черкаського державного технологічного університету

СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ

3 • 2016

VISNYK
Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu

SERIA: TEHNICHNI NAUKY

3 • 2016

Статті друкуються в авторській редакції

Технічний редактор Костенко О. А.

Коректура Костенко Т. В.

Комп'ютерна обробка Костенко О. А., Вознюк Т. І.

Видавець – Черкаський державний технологічний університет
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 896 від 16.04.2002 р.
Виготівник – ФОП Третьяков О. М.
вул. Слави, 1, м. Черкаси, 18000.