

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

1/2019

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

Редакційна колегія:

Фауре Е. В., д.т.н., доц.
(заступник головного редактора)
Антонюк В. С., д.т.н., проф.
Астрелін І. М., д.т.н., проф.
Базіло К. В., к.т.н., доц.
Бондаренко М. О., д.т.н., доц.
Бондаренко Ю. Ю., к.т.н., доц.
Вашенко В. А., д.т.н., проф.
Волошин М. Д., д.т.н., проф.
Вязовик В. М., д.т.н., доц.
Гальченко В. Я., д.т.н., проф.
Дідковський Р. М., д.т.н., доц.
Заболотній С.В., д.т.н., доц.
Кажіс Р., д.т.н., проф. (Литва)
Канашевич Г. В., д.т.н., проф.
Котов В. М., д.т.н., проф. (Білорусь)
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.
Прокопенко Т. О., д.т.н., доц.
Рудницький В. М., д.т.н., проф.
Сетлак Г., д.ф.н. (Польща)
Слатінеану Л., д.т.н., проф. (Румунія)
Ситник О. О., д.т.н., проф.
Столяренко Г. С., д.т.н., проф.
Тимченко А. А., д.т.н., проф.
Уткіна Т. Ю., к.т.н., доц.
Федоров Є. Є., д.т.н., доц.
Хоменко О. М., к.х.н., доц.

ЗАСНОВНИК – Черкаський державний
технологічний університет

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

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

**ПРОГРЕСИВНІ
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ**

**АВТОМАТИЗАЦІЯ І
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

Статті надійшли до редакції
з 10 січня по 05 березня 2019 року

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-15-89
vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

Сисоєнко С. В. (технічний секретар)
Мельник І. В. (відповідальний секретар)
тел. (0472) 51-36-39; e-mail: mal_04@ukr.net

1-2019

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

**Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu**

TEHNICHNI NAUKY

1 • 2019

**Видання включене до Переліку
наукових фахових видань України
як фахове видання з технічних наук
(категорія «В»)**

**Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:**

Index Copernicus Journals Master List,
CiteFactor,
Google Академія,
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory,
WorldCat
Наукова періодика України

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

pISSN 2306-4412 / eISSN 2306-4455

Затверджено науково-технічною
радою Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 1 від 26.03.2019 р.

При повному або частковому
передрукуванні матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

© Черкаський державний
технологічний університет, 2019
© Автори, 2019

ЗМІСТ

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ

<i>Мельник Р. П., Мельник О. Г.</i> Розроблення комп'ютеризованої системи прогнозування пожеж у житловому секторі.....	5
<i>Прокопенко Т. О., Обойщик О. Б.</i> Особливості використання чатботів для бізнесу у сучасних месенджер чатах	11
<i>Рудницький В. М., Хрульов М. В., Канашиевич Г. В., Числов А. І., Кривоус Г. В., Скуцький А. Б.</i> Дослідження динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні кута зсуву фази	17
<i>Кузьмінська Ю. М.</i> Практичне застосування моделей і методів управління креативністю і ризиками команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації.....	23
<i>Кірей К. О.</i> Розвиток і трансформація поняття «Big Data».....	33
<i>Тіторенко В. С.</i> Комплексне застосування емоційного інтелекту та методу Kanban в управлінні IT-проектами	41

АВТОМАТИЗАЦІЯ І ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Петрищев О. Н., Базило К. В.</i> Математическое описание биморфного пьезоэлектрического элемента	48
<i>Сандлер А. К., Карпілов О. Ю.</i> Волоконно-оптичний пристрій контролю ваги для залізничних поромів	64
<i>Кузьмич Л. В., Орнатський Д. П., Квасніков В. П.</i> Розробка способу та засобу вимірювань напружено-деформованого стану за допомогою тензодатчика	69
<i>Сандлер А. К.</i> Моделирование волоконно-оптического акселерометра маятникового типа	75
<i>Передерко А. Л.</i> Корекція температурного впливу на п'єзоелектричний акселерометр	82

CONTENTS

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, PROJECT MANAGEMENT

<i>Melnyk R. P., Melnyk O. G.</i> , Development of a computerized fire forecasting system in residential sector.....	5
<i>Prokopenko T. O., Oboishchyk O. B.</i> Specifics of using chatbots for business needs in modern messenger chats.....	11
<i>Rudnitsky V. M., Khrulev N. V., Kanashevych H. V., Chislov A. I., Krivous G. V., Skutskyi A. B.</i> Analysis of dynamic error of movement measurement method by measuring converter of inductosyn type based on phase shift measuring	17
<i>Kuzminska Yu. M.</i> Practical application of models and methods of management by creativity and risks of educational project teams in the field of further training.....	23
<i>Kirey E. A.</i> Development and transformation of Big Data concept.....	33
<i>Titorenko V. S.</i> Complex application of emotional intelligence and Kanban method in IT-project management	41

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

<i>Petrishchev O. N., Bazilo C. V.</i> Mathematical description of bimorph piezoelectric element.....	48
<i>Sandler A. K., Karpilov O. Yu.</i> Fiber-optic device of weight control for railway ferries.....	64
<i>Kuzmych L. V., Ornatskyi D. P., Kvasnikov V. P.</i> Development of the method and means of the measurement of stress-strain state by a strain gauge.....	69
<i>Sandler A. K.</i> Modeling of fiber-optic accelerometer of pendulum type.....	75
<i>Perederko A. L.</i> Correction of temperature influence on a piezoelectric accelerometer	82

Р. П. Мельник, к.т.н.,

О. Г. Мельник, к.т.н., с.н.с.

e-mail: indigo211212@gmail.com

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОЖЕЖ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ

Дослідження присвячене розробленню структурної схеми комп'ютеризованої системи для реалізації методу прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі. Розроблена комп'ютеризована система базується на використанні методу групового урахування аргументів за рахунок його адаптації до предметної області. Таблична реалізація методу забезпечить точне прогнозування пожеж у житловому секторі в реальному часі.

Встановлено, що найбільш ефективним методом підвищення швидкодії та достовірності роботи спеціалізованих засобів обчислювальної техніки є використання системи залишкових класів та інформаційної надлишковості. Подальші дослідження були спрямовані на пошук системи числення, яка найбільш ефективно реалізує систему залишкових класів з урахуванням сучасного розвитку обчислювальної техніки. Для забезпечення швидкості та достовірності реалізації системи залишкових класів запропоновано реалізувати її на основі позиційної двійково-четвіркової системи числення з постійною кількістю одиниць.

Ключові слова: прогнозування пожеж, житловий сектор, комп'ютеризована система, система числення.

Вступ. Згідно зі статистичними даними World Life Expectancy [1] Україна належить до країн з високим рівнем виникнення пожеж. Найбільша кількість пожеж, які створюють загрозу життю та здоров'ю людей, пошкоджують або знищують матеріальні цінності, виникає саме в житловому секторі. Порушення правил пожежної безпеки під час влаштування та експлуатації електроустановок є однією з основних причин виникнення пожеж (приблизно 15 % від загальної кількості [2]). Причинами такої ситуації з пожежною безпекою в країні є недосконалі законодавча база щодо питань цивільної і техногенної безпеки, неналежне фінансування підтримки існуючих та впровадження нових сучасних систем протипожежного захисту.

Одним із шляхів запобігання виникненню пожеж у житловому секторі є реалізація профілактичних заходів на основі сучасних інформаційних технологій. Виконання цього завдання суттєво залежить від достовірності та оперативності інформації, що підлягає моніторингу, на основі якого приймаються управлінські рішення.

На сьогодні залишається невирішеною проблема автоматизації прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі.

Таким чином, нами ставилося важливе науково-технічне завдання – розроблення методів і засобів з метою реалізації задачі прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень. Науковий інтерес до вивчення питання щодо автоматизованого проектування, створення різних систем моніторингу та управління з кожним днем лише зростає. Так, у роботі [3] виконано дослідження щодо контролю та управління електроспоживанням. У дослідженні [4] здійснено випробування контролю споживання електроенергії в окремих точках електромережі. В роботі [5] запропоновано систему моніторингу електроспоживання в режимі реального часу. Але ґрунтовний аналіз цих досліджень показав, що вони не адаптовані до використання у сфері пожежної безпеки, оскільки не враховують параметри електромереж та їхні зміни, що можуть бути причинами виникнення пожеж.

У роботі [6] описано нове рішення для побудови систем моніторингу пожежної безпеки, що полягає у застосуванні бездротових датчиків та передаванні даних контрольованих параметрів пожежі в он-лайн режимі. Однак розглянуті системи фіксують безпосереднє виникнення пожеж, а не їхнє попередження.

Можливість застосування апарату автоматизованих систем багаторівневого перетворення інформації для моніторингу пожежної безпеки та використання системи залишкових класів у випадку недостатньої інформативності розглянуто в роботі [7]. Продовженням вивчення питання щодо можливості використання системи залишкових класів з урахуванням розв'язання задачі прогнозування пожеж стала робота [8]. Але в дослідженнях [7, 8] не проведено аналіз і синтез кодованих систем числення, що адаптовані до реалізації системи залишкових класів.

Вивчення літературних джерел показало, що існуючі методи та засоби моніторингу пожеж не забезпечують виявлення саме передумов виникнення пожеж у житловому секторі. Все це дає можливість стверджувати, що доцільним є проведення дослідження щодо розроблення комп'ютеризованої системи прогнозування пожеж у житловому секторі на основі показників електромережі.

Метою роботи є розроблення структурної схеми комп'ютеризованої системи для реалізації методу прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі.

Виклад основного матеріалу. В період активної інформатизації всіх сфер діяльності людини зростають вимоги й до ефективності прийняття та реалізації оперативних і стратегічних рішень на всіх рівнях управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Ефективність прийняття рішень залежить від якості інформації, що обробляється, правильної її підготовки, аналізу, узагальнення та подання її в належній формі.

Це свідчить про актуальність розроблення систем збору, передачі, опрацювання, візуалізації та документування статистичної інформації. В свою чергу, правильно підготовлену статистичну інформацію можна використовувати для оцінювання, моделювання та оперативного прогнозування виникнення пожеж у житловому секторі [9].

Найбільш ефективним підходом до удосконалення пожежної безпеки житлового сектора є застосування технологій моніторингу з багаторівневим перетворенням інформації [10]. Ці технології дають змогу розв'язувати складні задачі отримання інтегральних показників стану об'єктів моніторингу пожежної безпеки як послідовність, в якій всі складові скоординовані між собою та адаптовані до зміни зовнішніх впливів.

У наукових роботах [11] доведено ефективність застосування методу групового урахування аргументів для прогнозування пожеж у житловому секторі та обрано показник, за допомогою якого можливо дистанційно виконати прогнозування споживання електроенергії. На основі даних для прогнозування передпожежного стану житлового сектора можна синтезувати адекватні прогнозні моделі за багаторядним алгоритмом методу групового урахування аргументів.

Модель прогнозування передумов виникнення пожежі в квартирі – це поліном Колмогорова–Габора, в якому використовуються лише операції додавання, віднімання, множення, піднесення до степеня, однак операцій ділення та порівняння немає. На кожному квартиру необхідно отримати таку модель, до того ж, отримані моделі з деяким часом стають застарілими та неактуальними, тому періодично потрібно їх перераховувати. Отримання даних із житлових приміщень потребує великих працевитрат, часу та наявності засобів обчислювальної техніки з високими технічними параметрами. Тому проведення постійного моніторингу стану електромережі житлових будинків є майже неможливим. Це стало основою для проведення подальших досліджень.

За результатами проведених досліджень і огляду існуючих підсистем збору первинних даних для прогнозування аварійного стану електромереж нами було розроблено структурну схему комп'ютеризованої системи, що зображена на рис. 1. Схема демонструє реалізацію методу прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі.

Система моніторингу складається з таких підсистем: збору даних, попередньої обробки даних, прогнозування та передачі даних. Підсистема збору даних призначена для отримання даних щодо електроспоживання з житлового сектора (W). В підсистемі попередньої обробки даних розраховується споживання електроенергії за певні інтервали часу, а також диференційне оцінювання споживання електроенергії. Підсистема прогнозування виконує головну роль в оцінюванні стану житлового приміщення і забезпечує оцінювання вхідних даних на основі моделі реалізації. Підсистема передачі даних отримує результат прогнозування (R) з підсистеми прогнозування та передає його по каналах зв'язку (S).



Рисунок 1 – Структурна схема комп'ютеризованої системи для реалізації методу прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі

До складу системи побудови моделей входять такі підсистеми: управління, синтезу моделей і перетворення моделей. Підсистема управління призначена для прийняття рішення на перебудову моделі за результатами прогнозування. Підсистема синтезу моделей працює з попередньо обробленими даними споживання електроенергії за певні проміжки часу та створює на основі методу групового урахування аргументів моделі конкретних квартир. Підсистема перетворення моделей відповідно перетворює синтезовані моделі в моделі, що допустимі для використання програмно-апаратними засобами підсистеми прогнозування.

Підсистема перетворення моделей реалізується на апаратному рівні, а підсистеми збору даних, попередньої обробки даних, прогнозування, управління та синтезу моделей – на програмному рівні.

У наукових роботах [7, 8] підтверджено можливість застосування системи залишкових класів для забезпечення швидкості розрахунку моделей квартир, обґрунтовано правильність вибору системи числення, яка найбільш ефективно виконує операції додавання, віднімання та множення. В зазначеній системі числення всі числа є своїми залишками від ділення на обрану систему основ. У результаті розрахунків поліномів кожної окремої квартири модель буде наведено у табличній формі.

Подальші дослідження були спрямовані на пошук системи числення для реалізації системи залишкових класів. Придатність для практичного використання системи числення визначається низкою факторів [12]: можливістю подання будь-якого числа в заданому діапазоні; однозначністю подання; простотою і стислістю запису чисел; легкістю оволодіння системою. Нами було досліджено можливості застосування двійково-шестіркової та двійково-четвіркової систем числення для обрання форми подання інформації. Основним недоліком двійково-шестіркової системи числення є складність перекодування з двійкової безнадлишкової системи числення, і навпаки [13]. Тому нами було обрано позиційну двійково-четвіркову систему числення з постійною кількістю одиниць.

Перевагами обраної системи числення є легке перетворення, гарантоване знаходження помилок та велика несиметрія нулів і одиниць, що дає можливість адаптуватися до реальних каналів зв'язку та обчислювальної техніки [12, 13]. У двійково-четвірковій системі числення з постійною кількістю одиниць система залишкових класів ефективно реалізується з урахуванням існуючої елементної бази комп'ютерної техніки, а також уможливорює гарантоване виявлення помилок прогнозування. На рис. 2 зображено результати проведеного дослідження щодо виявлення та пропускання помилок

у двійково-четвірковій системі числення з постійною кількістю одиниць залежно від розрядності інформації.

Як свідчать результати розрахунку, така система числення гарантовано виявляє всі помилки непарної кратності при значній простоті пристрою контролю інформації. З цього ви-

пливає, що двійково-четвіркову систему числення можна вважати перспективною для застосування в спеціалізованих обчислювальних системах прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі та системах управління пожежною безпекою.

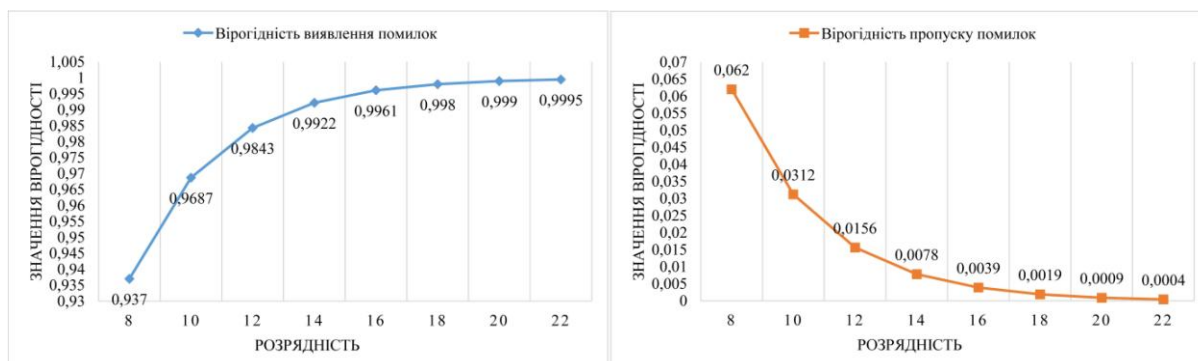


Рисунок 2 – Вірогідність виявлення і пропуску помилок у двійково-четвірковій системі числення з постійною кількістю одиниць залежно від розрядності інформації

Необхідно зазначити, що в цьому науковому дослідженні ми звертаємо особливу увагу саме на відсутність помилкового прогнозування. Помилки прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі можуть призвести до нераціонального використання сил і засобів органів і підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій та значної втрати коштів.

Висновок. Запропоновано структурну схему комп'ютеризованої системи для реалізації методу прогнозування передумов виникнення пожеж у житловому секторі. Розроблена комп'ютеризована система базується на використанні методу групового урахування аргументів за рахунок його адаптації до предметної області.

Список літератури

1. World health rankings. URL: <http://www.worldlifeexpectancy.com/cause-of-death/fires/by-country/> (дата звернення: 15.01.2019).
2. Аналіз масиву карток обліку пожеж (POG_STAT) за 12 місяців 2018 року. URL: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analiz-masivu-kartok-obliku-pozhezh.html> (дата звернення: 15.01.2019).
3. Jihyun Lee, Jiyeon Son, Jeu Young Kim, Jun Hee Park. Planning energy consumption of home appliances in real home network environments. *2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, 2012. P. 524–525. doi: 10.1109/ICCE.2012.6161802
4. Moayedi S., Shom S., Harms A., Alahmad M. Real time power monitoring detection based on sequence time domain reflectometry approach. *Journal of Computer and Communications*. 2018. No. 6. P. 92–103. doi: 10.4236/jcc.2018.61010
5. Alahmad M., Nader W., Neal J. et al. Real time power monitoring & integration with BIM. *IECON 2010 – 36th annual conference on IEEE industrial electronics society*. 2010, 7–10 Nov. P. 2454–2458. doi: 10.1109/IECON.2010.5675385
6. Vidyashree P., Pushpalatha S. The design and implementation of building fire monitoring system using zigbee-wifi gateway. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4. Iss. 7. P. 3030–3032.
7. Дендаренко В. Ю., Мельник О. Г., Чепурний Г. П. Побудова інформаційної системи моніторингу пожежної безпеки. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2014. Вип. 3 (40). С. 167–170.
8. Мельник О. Г. Формування вимог до векторної основи системи залишкових класів з урахуванням рішення задачі прогнозування пожеж у житловому секторі. *Системи*

- озброєння і військова техніка. 2015. № 1 (41). С. 165–167.
9. Мельник О. Г., Мельник Р. П. Оцінка оперативності прогнозування пожеж у житловому секторі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. № 4. С. 27–31.
 10. Голуб С. В. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища: монографія. Черкаси: Вид-во ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2007. 220 с.
 11. Мельник О. Г., Мельник Р. П. Застосування методу групового урахування аргументів до прогнозування пожеж у житловому секторі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали VII всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. участю. Черкаси, 2017. С. 7–8.
 12. Пантелєєва Н. М., Рудницький В. М. Теоретичні основи створення природно-надійних комп'ютерних систем: посібник. Черкаси: Брама-Україна, 2009. 200 с.
 13. Рудницький В. Н., Казаринова Н. Л., Нечипоренко О. В. Синтез арифметических устройств по условию надежности на основе систем счисления с постоянным числом единиц. *Збірник наукових праць ІПМЕ НАНУ*. 2005. Вип. 29. С. 3–11.
 5. Alahmad, M., Nader, W., Neal, J. et al. (2010). Real time power monitoring & integration with BIM. *IECON 2010 – 36th annual conference on IEEE industrial electronics society*, 7–10 Nov., pp. 2454–2458. doi: 10.1109/IECON.2010.5675385
 6. Vidyashree, P., Pushpalatha, S. (2017). The design and implementation of building fire monitoring system using zigbee-wifi gateway. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, iss. 7, pp. 3030–3032.
 7. Dendarenko, V. Yu., Melnyk, O. G., Chepurnyi, G. P. (2014). Construction of information system for fire safety monitoring. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl*, iss. 3 (40), pp. 167–170 [in Ukrainian].
 8. Melnyk, O. G. (2015). Formation of requirements to vector foundation of residual classes system taking into account the solution of the problem of fire forecasting in housing sector. *Systemy ozbroynnyia i vijskova tehnika*, No. 1 (41), pp. 165–167 [in Ukrainian].
 9. Melnyk, O. G., Melnyk, R. P. (2017). Evaluation of fire forecasting efficiency in housing sector. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnolohichnogo univer-sytetu. Seria: Tehnichni nauky*, No. 4, pp. 27–31 [in Ukrainian].
 10. Golub, S. V. (2007). Multilevel modeling in the technologies of environment monitoring: monograph. Cherkasy: Vyd-vo ChNU im. B. Khmelnytskoho, 220 p. [in Ukrainian].
 11. Melnyk, O. G., Melnyk, R. P. (2017). The use of group argument accounting method to fire forecasting in housing sector. *Nadzvychni situatsii: bezpeka ta zakhyst*: materials of the VII All-Ukr. sci.-pract. conf. with internat. participation. Cherkasy, pp. 7–8 [in Ukrainian].
 12. Pantjeljejeva, N. M., Rudnyckij, V. M. (2009). Theoretical foundations for the creation of natural reliable computer systems. Cherkasy: Brama-Ukraina, 200 p. [in Ukrainian].
 13. Rudnickij, V. N., Kazarinova, N. L., Nechiporenko, O. V. (2005). The synthesis of arithmetic units by reliance condition based on notation systems with fixed bit count. *Zbirnyk naukovykh prac IPME NANU*, iss. 29, pp. 3–11 [in Russian].

References

1. World health rankings. URL: <http://www.worldlifeexpectancy.com/cause-of-death/fires/by-country/>
2. The analysis of the set of fire accounting cards (POG_STAT) for 12 months of 2018. URL: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analiz-masivukartok-obliku-pozhezh.html>
3. Jihyun Lee, Jiyeon Son, Jeu Young Kim, Jun Hee Park (2012). Planning energy consumption of home appliances in real home network environments. 2012 *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, pp. 524–525. doi: 10.1109/ICCE.2012.6161802
4. Moayed, S., Shom, S., Harms, A., Alahmad, M. (2018). Real time power monitoring detection based on sequence time domain reflectometry approach. *Journal of Computer and Communications*, No. 6, pp. 92–103. doi: 10.4236/jcc.2018. 61010

R. P. Melnyk, Ph.D.,

O. G. Melnyk, Ph.D., senior researcher

e-mail: indigo211212@gmail.com

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Defense of Ukraine
Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

DEVELOPMENT OF A COMPUTERIZED FIRE FORECASTING SYSTEM IN RESIDENTIAL SECTOR

The research is devoted to the development of a structural scheme of the computerized system for the implementation of the method for predicting the preconditions of fire emergence in residential sector. The developed computerized system is based on the use of the method of group consideration of arguments due to its adaptation to the subject area. Table implementation of the method will provide accurate fire forecasting in residential sector in real time.

It is established that the use of the system of residual classes and information redundancy is the most effective method for increasing the speed and reliability of the work of specialized computing means. Further research was aimed at finding a numerical system that most effectively implements the system of residual classes, taking into account the current development of computer technology. To ensure the speed and reliability of the implementation of the system of residual classes, it is proposed to implement it based of a positional biquaternary system with a constant number of units.

In a biquaternary system with a constant number of units, the system of residual classes is effectively implemented taking into account the existing elemental base of computer technology. As the results of the calculations show, such a system of calculations is guaranteed to detect all errors of odd multiplicity with a significant simplicity of information control. It follows that a binary quadruple system can be considered promising for the use in specialized computer systems to predict the preconditions for the emergence of fires in the residential sector and fire safety management systems.

In this research we have paid special attention to the lack of false prediction. Mistakes in forecasting the preconditions for the emergence of fires in the residential sector may lead to inefficient use of forces and means of bodies and units of the State Emergency Service of Ukraine and significant loss of funds.

Keywords: fire forecasting, residential sector, computerized system, numerical system.

Т. О. Прокопенко, д.т.н., доцент,
e-mail: t.prokopenko@chdtu.edu.ua

О. Б. Обойщик, студент

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

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧАТБОТІВ ДЛЯ БІЗНЕСУ У СУЧАСНИХ МЕСЕНДЖЕР ЧАТАХ

Пропонується аналіз особливостей використання чатботів у сучасних компаніях для вирішення бізнес-задач у процесі спілкування в сучасних месенджер чатах. Подано визначення чатботів і досліджено їх основні функції. Розглянуто основні переваги використання технології чатботів для задоволення сучасних потреб бізнесу. Запропоновано узагальнену класифікацію чатботів. Зроблено висновки про можливість та доцільність застосування різних типів чатботів для бізнесу у сучасних чатах обміну миттєвими повідомленнями.

Ключові слова: чатбот, бот, месенджер чат, штучний інтелект, потреби бізнесу, класифікація.

Вступ. Питанню застосування чатботів для задоволення бізнес-потреб приділяється особливо гостра увага впродовж багатьох років. Сьогодні використання чатботів для забезпечення віртуального спілкування бізнесу зі своїми потенційними та існуючими користувачами є актуальною задачею, що надасть можливості швидкого обміну інформацією між бізнесом і клієнтами в сучасних месенджер чатах для розв'язання будь-яких питань консультування, можливості одночасного обслуговування десятків тисяч клієнтів, доступності бізнесу 24/7 та інших переваг [14].

Для різних компаній, що існують у бізнес-середовищі, важливим є своєчасне та швидке забезпечення користувачів необхідною інформацією. Саме тут у нагоді стає технологія чатботів, яку багато експертів вважають майбутнім сфери обслуговування та управління клієнтами [11].

Для розв'язання цих питань необхідним є визначення самого поняття чатбота та огляд класифікації існуючих ботів, основних функцій, які вони виконують, і принципів роботи чатботів у месенджер чатах на основі імітації мовної поведінки людини у процесі спілкування зі споживачами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання штучного інтелекту на сьогоднішній день все більше знаходить своє застосування у вигляді чатботів, що стають доступними для клієнтів бізнесу різного типу через сучасні месенджер чати, якими щоденно

користуються мільйони людей по всьому світу. Наразі все актуальнішою проблемою для бізнесу стає побудова та використання чатботів для оптимізації своїх бізнес-процесів і створення умов цілодобової онлайн-присутності для обслуговування та консультування своїх клієнтів, а також нагального вирішення їхніх питань без необхідності залучення людських ресурсів, що значно знижує фінансові витрати. Проблеми онлайн-комунікацій між користувачами в Інтернеті, у тому числі за участі віртуального співрозмовника, розглянуто в працях В. А. Михайлова [2], В. А. Плешакова [3], В. Л. Сілаєвої [4], Г. Д. Ушакова [6]. Особливості застосування чатботів для бізнесу у сучасних месенджерах ґрунтовно описано в статтях зарубіжних авторів, а саме: Крістен Хейлі [14], Саварама Сутхара [12], Шейна Кетермана [10], Алекса Галерта [8] та інших. Однак для прийняття правильного рішення для розробки та використання чатботів для бізнесу необхідно визначити основну мету і сукупність завдань для розв'язання штучним інтелектом, щоб обрати необхідний вид чатбота для задоволення нагальних потреб.

Метою статті є аналіз основних функцій чатбота, дослідження можливостей використання різних видів чатботів для бізнесу у чатах обміну миттєвими повідомленнями.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розвиток методів і засобів штучного інтелекту разом з поширенням додатків для

обміну миттєвими повідомленнями, або ж месенджер чатів, забезпечили можливість створення чатботів. Чатботи є програмою, що використовує обмін повідомленнями як інтерфейс, через який можна виконувати будь-яку кількість завдань, і яка здатна відповідати на питання користувачів, а також самостійно ставити їх, таким чином підтримуючи діалог, імітуючи мовну поведінку справжньої людини. Чатботи використовують у різних сферах для розв'язання типових задач, зокрема в різних компаніях для вирішення бізнес-задач. Використання чатботів є особливо доцільним при застосуванні мобільних пристроїв, в яких обмін повідомленнями є основою мобільного досвіду, що широко застосовується користувачами з усього світу [1, 17].

Залежно від функцій, що реалізуються, чатботи прийнято поділяти на три основні типи [1]:

- *службові* – автоматизовані програми, призначені для виконання допоміжних завдань, таких як облік учасників чату, гарантування безпеки учасників чату, підключення додаткових функцій у разі застосування певної команди тощо;

- *інформаційно-розважальні* – автоматизовані програми, що імітують мовну поведінку людини і виконують інформаційну, комерційну або розважальну функції, наприклад бот, що повідомляє користувачам прогноз погоди, бот-гра, бот, який здійснює продаж певного товару;

- *боти-утиліти* – автоматизовані сервісні програми, які полегшують користування іншими програмами, наприклад бот-перекладач, бот-калькулятор.

Залежно від способу програмування конкретні боти пропонуються поділити на дві великі групи [15]:

- **скриптові** чатботи, які працюють за попередньо підготовленими командами або скриптами. Тобто під час розмови з цим типом чатботів користувачеві потрібно вибрати одну з запропонованих опцій на кожному кроці спілкування, для того щоб визначити наступний крок;

- **розумні** чатботи, що побудовані за допомогою можливостей штучного інтелекту. Замість підготовлених відповідей, такий чатбот відповідає пропозиціям по запропонованій користувачем темі на основі наявної інформації. Штучний інтелект дає можливість таким чатботам бути більш гнучкими за рахунок роз-

пізнавання введеного користувачами текстового висловлювання, а також вдосконалюватися за рахунок постійного навчання моделі.

Згідно з [15] експерти в цій галузі розглядають такі функції чатботів:

- забезпечення безперервного функціонування сервісу обслуговування клієнтів;

- персоналізація процесу комунікацій з новими та існуючими клієнтами бізнесу;

- впорядкування процесу здійснення покупок користувачами та надання консультацій під час цього процесу;

- автоматизація повторюваних завдань.

Для різних компаній, які хотіли б розширити свій вплив в Інтернеті, чатботи можуть відіграти важливу роль у реалізації історії успіху. Боти можуть використовуватися в усіх бізнес-галузях, де можлива комунікація з користувачем. Передбачаючи величезний потенціал, підприємства починають інтенсивно вкладати кошти у розвиток чатботів для власного бізнесу з метою автоматизації значної кількості процесів, які раніше виконували співробітники компанії, наприклад консультування. Ряд світових брендів і виробників вже запустили власних ботів у популярних месенджер чатах, включаючи HP, 1-800-Flowers та CNN [17]. Велике значення має те, що великі технологічні компанії створили власні відкриті платформи та інтерфейси для розробки чатботів, серед яких Microsoft, Facebook, Google, Amazon, IBM, Apple, Samsung тощо [8].

Такі українські компанії, як Київстар, ПриватБанк, Альфа-Банк, Нова пошта тощо вже мають власних ботів. Чатботи також активно використовуються на порталі Донор.ua, у сервісі реєстрацій компаній bot.lawyer, у сервісі моніторингу реєстраційних даних українських компаній та судового реєстру для захисту від рейдерських захоплень і контролю контрагентів OpenDataBot. Українцями також було розроблено Telegram-бот iGov [5].

Завдяки бізнес-рішенню, яке пропонує технологія чатботів, власникам надається можливість застосовувати технології штучного інтелекту. Крім того, використання якісного чатбота гарантує більш швидку й точну службу підтримки для клієнтів, що підвищить репутацію бренду. Очікується, що незабаром кожний бізнес буде мати власний чатбот. Боти стануть такими ж поширеними, як номери бізнес-телефонів, а з більш розвиненими системами штучного інтелекту чатботи зможуть

повністю замінити людську допомогу у виконанні певних завдань [10].

Однією з основних причин значної популярності чатботів є небажання користувачів завантажувати нові чи оновлені додатки на свої мобільні пристрої, для того щоб користуватися певними послугами. З цього випливає, що створювати, просувати і вводити в експлуатацію нову програму, яка зрештою не буде застосована, є неприбутковим. Маючи здатність функціонувати на різних платформах, чатботи можуть вирішити цю проблему. Згідно з даними 2018 State of Chatbots Report від компанії Drift (рис. 1) загальна кількість користувачів різних месенджер чатів становить 4,1 мільярда

людей, тому, використовуючи чатботи в месенджер чатах, бізнес може скористатися наступними перевагами, надзвичайно важливими для споживачів [8]:

- можливість отримання швидкої відповіді на поставлені користувачами питання різного рівня складності;
- функціонування чатботів в режимі 24 години на добу;
- зручність спілкування у месенджер чатах;
- можливість швидко зареєструвати скаргу та отримати зворотний зв'язок;
- доброзичливість, доступність та ін.

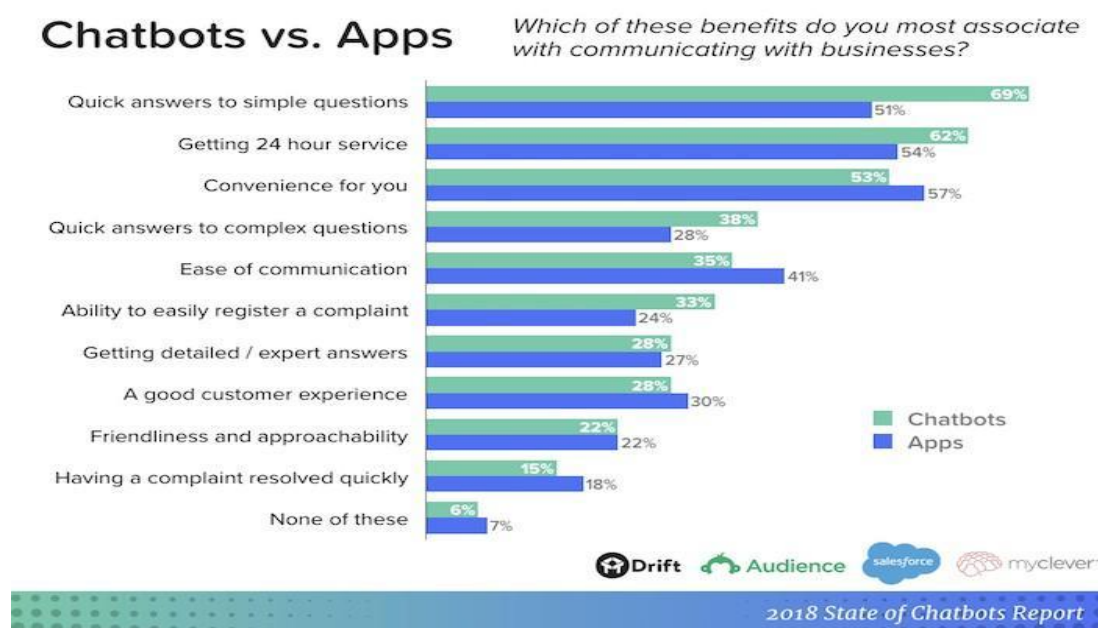


Рисунок 1 – Переваги чатботів над мобільними додатками згідно з 2018 State of Chatbots Report від компанії Drift

Використання в бізнесі автоматизованих чатботів може привести до значного скорочення витрат на трудові ресурси. Хоча повна автоматизація роботи служби підтримки клієнтів не є можливою у найближчі роки, проте автоматизація таких процесів, як онлайн-продажі та консультування клієнтів через месенджер чати приведе до оптимізації фінансових ресурсів компанії. Крім того, чатботи дадуть бізнесу можливість позбавити виконавців від виконання рутинних завдань, а величезна швидкість і можливість одночасної обробки мільйонів запитів від користувачів допоможе отримати лояльність споживачів [15].

Чатботи можуть запропонувати цілодобовий інформаційний обмін, надійність, точ-

ність і безвідмовну продуктивність. Розвиток ефективного бота приведе до стабільного та постійного вирішення поставлених компанією бізнес-задач. Крім того, чатботи надають користувачам можливість дослідження способів спілкування, що забезпечить аналіз отриманих даних, покращення роботи чатбота в подальшому і побудову надійної бізнес-моделі, яка дасть значну перевагу над існуючими конкурентами.

Наразі існує величезний потенціал у використанні чатботів у різних компаніях для забезпечення швидкого реагування на запити клієнтів. Згідно з дослідженнями InsideSales і Harvard Business Review (рис. 2) п'ятихвилинна затримка у відповіді користу-

вачу може призвести до втрати здійснення користувачем можливої покупки. Затримка у наданні відповіді у десять хвилин зменшить шанси отримати ефективний контакт з потенційним споживачем до 400 % [8].

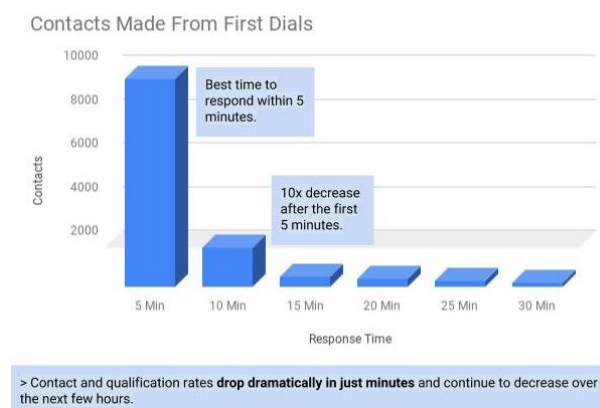


Рисунок 2 – Вплив затримки надання відповіді на ефективність комунікацій з користувачами

Таблиця 1 – Узагальнена класифікація чатботів

За способом програмування	За можливостями застосування						
	за функціями, що реалізує чатбот			за призначенням			
скриптові	службові	інформаційно-розважальні	боти-утиліти	інформаційно-пошукові	консультуючі	контролюючі	рутинні
розумні				автоматизовані функції спілкування з користувачем			

Відомий футуролог Реймонд Курцвейл, який займає посаду технічного директора в сфері машинного навчання і обробки природної мови в компанії Google, прогнозує, що до 2029 р. чатботи будуть володіти такими ж мовними можливостями, як і люди. Саме тоді гостро постане питання працевлаштування людей, більшість професій яких замінить використання чатботів та штучного інтелекту [7].

Висновки. Отримані результати показують, що в різних компаніях важливим є процес обміну інформаційними повідомленнями з метою вирішення різних бізнес-задач, що надасть можливості оптимізації робот компанії. Застосування при цьому технології чатботів та штучного інтелекту, коли «розумні» чатботи, імітуючи мовну поведінку людини, надають можливості для швидкого та постійного обміну інформацією в режимі 24/7 по всьому світу, є актуальним

Згідно з дослідженнями першоджерел найдоцільнішими видами ботів для різних типів бізнесу є інформаційно-розважальні ро-

Таким чином, чатботи є одним із найпростіших способів вирішення задач обміну інформаційними повідомленнями між користувачами, що забезпечить отримання інформації в обмежений часовий термін. Телефонні дзвінки, електронні листи та навіть веб-форми не можуть дозволити надати відповідь користувачам упродовж декількох секунд, на що натомість спроможна сучасна технологія чатботів. Тому, в різних компаніях доцільним є застосування технології чатботів, що забезпечить можливості швидкого отримання необхідної інформації та вплине на ефективність компанії в цілому.

Проаналізувавши різні підходи до класифікації чатботів, пропонується узагальнена класифікація чатботів, що дасть можливість чіткого визначення способів обміну інформацією з метою ефективного використання часу.

зумні боти, які виконують функції співрозмовника-помічника, який в змозі вирішити нагальні потреби користувача в будь-який час і день тижня в режимі онлайн.

Внаслідок проведеного аналізу стає очевидним, що екосистема чатботів значно зросла протягом останнього десятиліття та охоплює безліч видів ботів, розроблених за допомогою різноманітних технологій для популярних в усьому світі чатів обміну миттєвими повідомленнями. Важливо відзначити, що розробка чатбота для бізнесу у будь-якому сучасному месенджер чаті є надзвичайно актуальною для сьогодення на національному та зарубіжному ринках і потребує обробки й аналізу великого обсягу інформації, пов'язаної з цілями, яких бізнес хоче досягнути, створивши цей продукт. Рішення щодо типу та доцільності побудови чатбота завжди приймаються на основі цієї інформації, тому досить важливим є процес отримання необхідної інформації, її ефективної обробки й аналізу, що полегшує прийняття рішення. Тому запропоновано узагальнену

класифікацію чатботів, що забезпечить можливості вибору необхідного чатбота для вирішення бізнес-задач і дасть змогу досягнути запланованих результатів для ефективної роботи компанії.

Список літератури

1. Бот (программа). Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%82_\(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%82_(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0))
2. Михайлов В. А., Михайлов С. В. Особенности развития информационно-коммуникативной среды современного общества. *Актуальные проблемы теории коммуникации*: сб. науч. трудов. Санкт-Петербург, 2004. С. 34–52.
3. Плешаков В. А. Киберсоциализация человека в информационном пространстве. *Информация и образование: границы коммуникаций INFO'2009*: сб. науч. трудов. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2009. С. 51.
4. Силаева В. Л. Интернет как социальный феномен. *Социс*: сетевой журн. 2008. № 11. С. 101–107. URL: http://www.isras.ru/files/File/Socis/2008-11/Silaeva_14.pdf
5. Современные IT технологии для бизнеса: зачем компаниям боты и облака. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/publications/2017/03/20/622844/>
6. Ушакова Г. Д., Балабанова Ю. В. Особенности виртуального общения посредством чатов. *Филологический журнал: межвуз. сб. науч. статей*. 2004. Вып. XII. С. 59–61.
7. Чатботы – кто вони? URL: <http://thefuture.news/chatbot>
8. Chatbot report 2018: global trends and analysis. URL: <https://chatbotsmagazine.com/chatbot-report-2018-global-trends-and-analysis-4d8bbe4d924b>
9. Chatbots 101: building a chatbot for business with wells fargo. URL: <https://chatbotsjournal.com/chatbots-101-building-a-chatbot-for-business-with-wells-fargo-85ecf03f736d>
10. Reasons to have a chatbot for your business. URL: <https://chatbotslife.com/reasons-to-have-a-chatbot-for-your-business-59e0c7427cf2>
11. The true chatbot superpower for businesses and it's not AI. URL: <https://medium.com/@shanejekterman/chatbot-messaging-is-powerful-ai-is-hype-so-what-is-messaging-ebd0620c93fb>
12. Top 10 platforms to build a chatbot for your business. URL: <https://chatbotsmagazine.com/top-10-platforms-to-build-a-chatbot-for-your-business-6393ed047be7>
13. Trending: how to use facebook messenger chatbot for business. URL: <https://medium.com/@kris10haley/trending-how-to-use-facebook-messenger-chatbot-for-business-96fe5dac337d>
14. V-Soft consulting chatbots 101. URL: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1629777/Chatbots%20101.pdf?t=1526138378633>
15. What is a chatbot and how to use it for your business. URL: <https://medium.com/swlh/what-is-a-chatbot-and-how-to-use-it-for-your-business-976ec2e0a99f>
16. Chatbot tips for businesses. URL: <https://chatbotsmagazine.com/10-chatbot-tips-for-businesses-894b39be34f4>
17. 80 % of businesses want chatbots by 2020. *Business Insider*. URL: <https://www.businessinsider.com/80-of-businesses-want-chatbots-by-2020-2016-12>

References

1. Bot (program). Material from Wikipedia – the free encyclopedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%82_\(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D1%82_(%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0))
2. Mikhailov, V. A., Mikhailov, S. V. (2004). Peculiarities of the development of information and communication environment of modern society. *Actualnyye problemy teorii kommunikatsiy*: coll. of sci. papers, pp. 34–52 [in Russian].
3. Pleshakov, V. A. (2009). Cybersocialization of a person in information space. *Informat-siya i obrazovaniye: granitsy kommunikatsiy, INFO'2009*: coll. of sci. papers, Gorno-Altajsk: RIO GAGU, p. 51 [in Russian].
4. Silaeva, V. L. (2008). Internet as a social phenomenon. *Socis*, No. 11, pp. 101–107. URL: http://www.isras.ru/files/File/Socis/2008-11/Silaeva_14.pdf
5. Modern IT technologies for business: why do companies needs bots and clouds. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/publications/2017/03/20/622844/>
6. Ushakova, G. D., Balabanova, Yu. V. (2004). Peculiarities of virtual communication through chat. *Filologicheskij zhurnal*: coll. of sci. papers, iss. 12, pp. 59–61 [in Russian].

7. Chatbots – who are they? URL: <http://thefuture.news/chatbot>
8. Chatbot report 2018: global trends and analysis. URL: <https://chatbotsmagazine.com/chatbot-report-2018-global-trends-and-analysis-4d8bbe4d924b>
9. Chatbots 101: building a chatbot for business with wells fargo. URL: <https://chatbotjournal.com/chatbots-101-building-a-chatbot-for-business-with-wells-fargo-85ecf03f736d>
10. Reasons to have a chatbot for your business. URL: <https://chatbotslife.com/reasons-to-have-a-chatbot-for-your-business-59e0c7427cf2>
11. The true chatbot superpower for businesses and it's not AI. URL: <https://medium.com/@shanejkettermen/chatbot-messaging-is-powerful-ai-is-hype-so-what-is-messaging-ebd0620c93fb>
12. Top 10 platforms to build a chatbot for your business. URL: <https://chatbotsmagazine.com/top-10-platforms-to-build-a-chatbot-for-your-business-6393ed047be7>
13. Trending: how to use facebook messenger chatbot for business. URL: <https://medium.com/@kris10haley/trending-how-to-use-facebook-messenger-chatbot-for-business-96fe5dac337d>
14. V-Soft consulting chatbots 101. URL: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1629777/Chatbots%20101.pdf?t=1526138378633>
15. What is a chatbot and how to use it for your business. URL: <https://medium.com/swlh/what-is-a-chatbot-and-how-to-use-it-for-your-business-976ec2e0a99f>
16. 10 Chatbot tips for businesses. URL: <https://chatbotsmagazine.com/10-chatbot-tips-for-businesses-894b39be34f4>
17. 80% of businesses want chatbots by 2020. *Business Insider*. URL: <https://www.businessinsider.com/80-of-businesses-want-chatbots-by-2020-2016-12>

T. O. Prokopenko, *Dr.Tech.Sc, accociate professor*,
e-mail: t.prokopenko@chdtu.edu.ua

O. B. Oboishchyk, *student*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SPECIFICS OF USING CHATBOTS FOR BUSINESS NEEDS IN MODERN MESSENGER CHATS

The article contains the analysis of peculiarities of using chatbots for business needs on the basis of simulation of a person speech behavior in the process of communication in modern messenger chats. The definition of chatbots, their classification and major functions are considered. The nature of messenger apps together with the concept and place of messenger bots as an important tool for business needs satisfaction are disclosed. The main advantages of using the chatbot technology for meeting modern business needs are reviewed. Judging by the emerging trends in the development of an online chatbot service, a hypothesis is put forward in the article that the market for tools using artificial intelligence and chatbots in the business needs satisfaction sector will only grow. It has been analyzed that the universal interactive systems combining the services of virtual and real consultants in one window will obviously be improved and used more and more widely by various market players in the nearest future. Following the integration within the chat of a virtual consultant with the human operator, it is assumed in the article that we can expect the integration of the online service with the internal systems of different types of businesses. It is hypothesized that this will allow to take into account the client's profile in its entirety and integrity in the dialogue process, increase the targeting of recommendations and proposals. Conclusions about the possibility and expediency of using various types of chatbots for business needs in modern instant messenger chats are made. The generalized chatbots classification which will ensure the possibilities of the necessary chatbot choice for business tasks solution and allow to achieve the planned results for efficient company work is proposed.

Keywords: chatbot, bot, messenger chat, artificial intelligence, classification, business needs.

В. М. Рудницький, д.т.н., професор,
e-mail: rvn_2008@ukr.net

М. В. Хрульов, к.т.н., доцент,
e-mail: hrulev@ukr.net

Г. В. Канашиевич, д.т.н., професор,
e-mail: kgv-elbeam@rambler.ru

А. І. Числов, ст. викладач,
e-mail: a.i.chislov@gmail.com

Г. В. Кривоус, зав. лабораторіями,
e-mail: krivous_gv@gmail.com

А. Б. Скуцький, студент
e-mail: xronlol@gmail.com

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОХИБКИ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИПУ ІНДУКТОСИН, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ВИМІРЮВАННІ КУТА ЗСУВУ ФАЗИ

У статті розглянуто метод вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні кута зсуву фази, виникнення та зміну в часі динамічної похибки методу вимірювання. Визначено залежність максимальної абсолютної динамічної похибки переміщення від швидкості переміщення і частоти напруги живлення.

В результаті виконаного аналізу зроблено висновок про можливість використання розглянутого методу без компенсації динамічної похибки при правильному виборі значень швидкості, частоти напруги живлення індуктосина і точності вимірювання. З другого боку, застосування методів компенсації динамічної похибки дасть можливість істотно розширити експлуатаційні характеристики методу вимірювання, а саме підвищити максимальне значення швидкості і точності вимірювання.

Ключові слова: похибка вимірювання, метод вимірювання, вимірювання переміщення, вимірювальний перетворювач, індуктосин.

Постановка проблеми. Вимірювачі переміщення широко застосовуються в різних технічних і технологічних галузях. Однією з галузей застосування є системи ЧПУ, призначені для отримання деталі заданої форми із заданою точністю в результаті автоматизованої точкової взаємодії між інструментом і предметом обробки [1].

Відомі вимірювачі переміщення таких типів: індуктосини, обертові трансформатори (ОТ), селісини, оптичні датчики [2, 3], а також вимірювачі переміщення на основі лазерів [4].

Вимірювачі переміщення типу індуктосин відзначаються надійністю, довговічністю, низькою статичною похибкою вимірювання, простотою обслуговування.

Вимірювачі переміщення типу індуктосин використовують один із видів перетворення кутового переміщення [5]:

- переміщення → амплітуда → код;
- переміщення → фаза → час → код.

Нині найбільшого поширення набули вимірювачі переміщення типу індуктосин, що базуються на перетворенні кутового переміщення в амплітуду [6].

З другого боку, в експлуатації дотепер перебуває значна кількість обладнання, в якому використовуються вимірювачі переміщення типу індуктосин, що базуються на перетворенні кутового переміщення в фазу [5, 7].

Таким чином, завдання дослідження динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, з метою корекції динамічної похибки, є актуальним і становить певний науковий і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [8] розглянуто загальні положення теорії похибок.

Методи проектування фазових цифрових перетворювачів «кут–код», похибки перетворювачів і методи їх корекції розглянуто в [5].

Принципи роботи вимірювальних перетворювачів типу індуктосин досліджено в [5, 7, 9].

Похибки фазових перетворювачів кута розглянуто в [5].

Відомі методи підвищення точності перетворення кутового переміщення в амплітуду. Модель компенсації помилок, що базується на автономній ідентифікації даних, яка створена для підвищення точності системи вимірювання кута, досліджено в [10].

Метод вимірювання положення за допомогою індуктосинів, в якому використовується масштабування амплітуди, розглянуто в [11].

Виклад основного матеріалу. При вимірюванні переміщення заготовки за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин або обертового трансформатора (ОТ), що базується на вимірюванні зсуву фази, поступальний рух заготовки перетвориться в кут повороту ротора індуктосина або ОТ. Кут повороту ротора перетворюється в зсув по фазі вихідного сигналу [5].

На нерухомі ортогональні обмотки індуктосина подаються напруги живлення $U_{\sin}(t) = k A \sin 2\pi f t$ і $U_{\cos}(t) = A \cos 2\pi f t$, де f – частота 2,5 ... 10 kHz [7, 9]. Вихідний сигнал $U_{out}(t) = k A \sin(2\pi f t + \varphi)$ знімається з вимірювальної обмотки, розташованої на роторі, причому зсув фази φ визначається положенням вимірювальної обмотки відносно ортогональної обмотки живлення.

Відповідно, за виміряним значенням зсуву фази φ можна визначити величину переміщення, що привело до зміни фази

$$S = k \varphi, \quad (1)$$

де S – переміщення заготовки;

k – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача, що зв'язує переміщення і фазу φ ;

φ – виміряне значення зсуву фази вихідного сигналу, відповідне переміщення (положення) S заготовки.

Вимірювання фази вихідного сигналу $U_{out}(t)$ виконується один раз за період T напруги живлення $U_{sin}(t)$, яка виконує роль опорного сигналу. Вимірювання фази вихідного сигналу

полягає у вимірюванні відрізка часу τ_{msr} між початком періоду опорного сигналу $U_{sin}(t)$ і початком періоду вихідного сигналу $U_{out}(t)$.

Початком періоду сигналу $U_{sin}(t)$ будемо вважати моменти $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зміни знака опорного сигналу $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ з негативного на позитивне значення. Аналогічно для вихідного сигналу $U_{out}(t)$ початком періоду вважатимемо моменти $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$.

У моменти $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ цикл вимірювання зупиняється. У моменти $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ виконується зчитування виміряного значення і запуск нового циклу вимірювання.

Таким чином, відрізок часу $\tau_{msr\ i}$ визначається як

$$\tau_{msr\ i} = t_{i+1} - t_{msr\ i}.$$

Вимірювання відрізка часу $\tau_{msr\ i}$ полягає в підрахунку лічильником CNT кількості імпульсів заданої частоти f_{msr} за час $\tau_{msr\ i}$. Таким чином, величину переміщення (1) можна пов'язати з часом вимірювання $\tau_{msr\ i}$ або зі станом лічильника CNT :

$$S = k \varphi = k_1 \tau_{msr} = k_2 CNT,$$

де k_1 – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача, що зв'язує переміщення і фазу φ через час вимірювання τ_{msr} ;

k_2 – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача, що зв'язує переміщення і фазу φ через стан лічильника CNT і частоту f_{msr} ;

CNT – стан лічильника вимірювання часу $\tau_{msr\ i}$ (кількість імпульсів частоти f_{msr}).

Часові діаграми, зображені на рис. 1, демонструють описаний вище метод вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази.

Абсолютна похибка [8] переміщення визначається як:

$$\Delta = S_{valid} - S_{msr}, \quad (2)$$

де Δ – абсолютна похибка переміщення;

S_{valid} – дійсне значення переміщення;

S_{msr} – виміряне значення переміщення.

У моменти $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ фіксується миттєве положення заготовки. У разі відсутності руху положення заготовки не змінюється до моментів $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зчитування виміряного значення. В цьому випадку в момент зчитування $S_{valid} = S_{msr}$ і, відповідно до (2), абсолютна похибка методу вимірювання $\Delta = 0$.

У разі наявності руху положення заготовки змінюється протягом часу від моментів $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ кілька разів до моментів $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зчитування вимірюваного значення протягом часу:

$$\tau_{rmn} = T - \tau_{msr}, \quad (3)$$

де τ_{rmn} – відрізок часу між моментом $t_{msr\ i}\{t_{msr\ 0}, t_{msr\ 1}, t_{msr\ 2}, \dots\}$ фіксації миттєвого положення заготовки (початок періоду вихідного

сигналу U_{out}) і моментом $t_i\{t_0, t_1, t_2, \dots\}$ зчитування вимірюваного значення (початок наступного періоду опорного сигналу $U_{sin}(t)$);

T – період опорного сигналу $U_{sin}(t)$, протягом якого виконується вимірювання;

τ_{msr} – відрізок часу між початком періоду опорного сигналу $U_{sin}(t)$ і початком періоду вихідного сигналу $U_{out}(t)$.

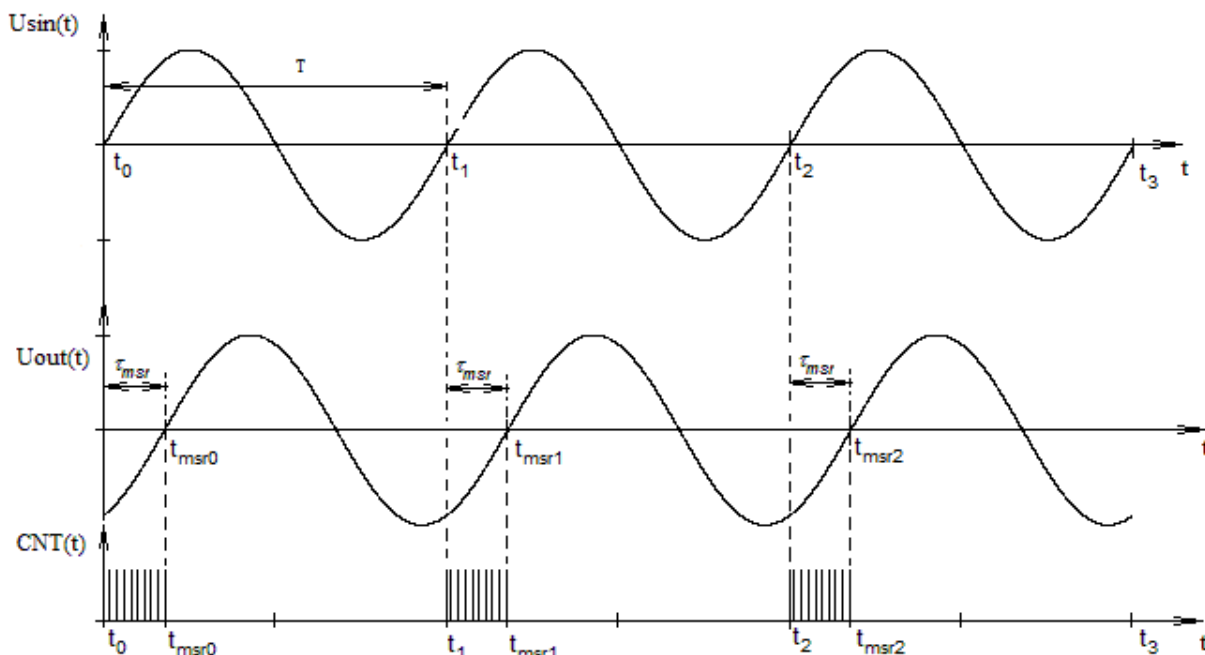


Рисунок 1 – Вимірювання переміщення, що базується на вимірюванні зсуву фази

В цьому випадку в момент зчитування $S_{valid} \neq S_{msr}$ і, відповідно до (2), абсолютна похибка методу вимірювання $\Delta \neq 0$. Оскільки протягом часу τ_{rmn} від моменту вимірювання до моменту зчитування вимірюваного значення заготовка буде переміщатися, в загальному випадку з деякими швидкістю V і прискоренням a , дійсне значення переміщення визначиться наступним чином:

$$S_{valid} = S_{msr} + V \tau_{rmn} + \frac{a \tau_{rmn}^2}{2}. \quad (4)$$

Тоді абсолютна динамічна похибка методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, з урахуванням (2) і (4) визначиться як

$$\Delta = V \tau_{rmn} + \frac{a \tau_{rmn}^2}{2}. \quad (5)$$

Часова діаграма, зображена на рис. 2, демонструє процес виникнення і зміну в часі абсолютної динамічної похибки методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази.

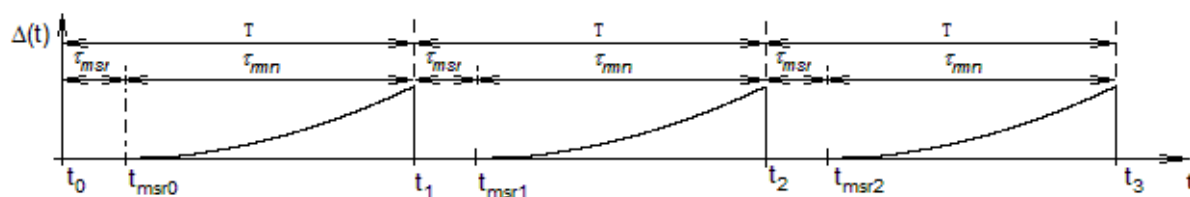


Рисунок 2 – Абсолютна динамічна похибка методу вимірювання переміщення, що базується на вимірюванні зсуву фази

З (3) випливає, що при $\tau_{msr} = 0$ τ_{rmn} набуде максимального значення, рівного T . Тоді максимальна абсолютна динамічна похибка визначиться як

$$\Delta_{MAX} = VT + \frac{aT^2}{2}, \quad (6)$$

де Δ_{MAX} – максимальна абсолютна динамічна похибка переміщення.

Виведемо максимальну абсолютну динамічну похибку (6) через частоту f опорного сигналу $Usin(t)$:

$$\Delta_{MAX} = \frac{V}{f} + \frac{a}{2f^2}. \quad (7)$$

На рис. 3 зображено графіки, отримані на основі (7), що демонструють залежність максимальної абсолютної динамічної похибки Δ_{MAX} від швидкості переміщення заготовки V при фіксованих значеннях частоти напруги живлення f і прискоренні a , рівному 0 м/с^2 .

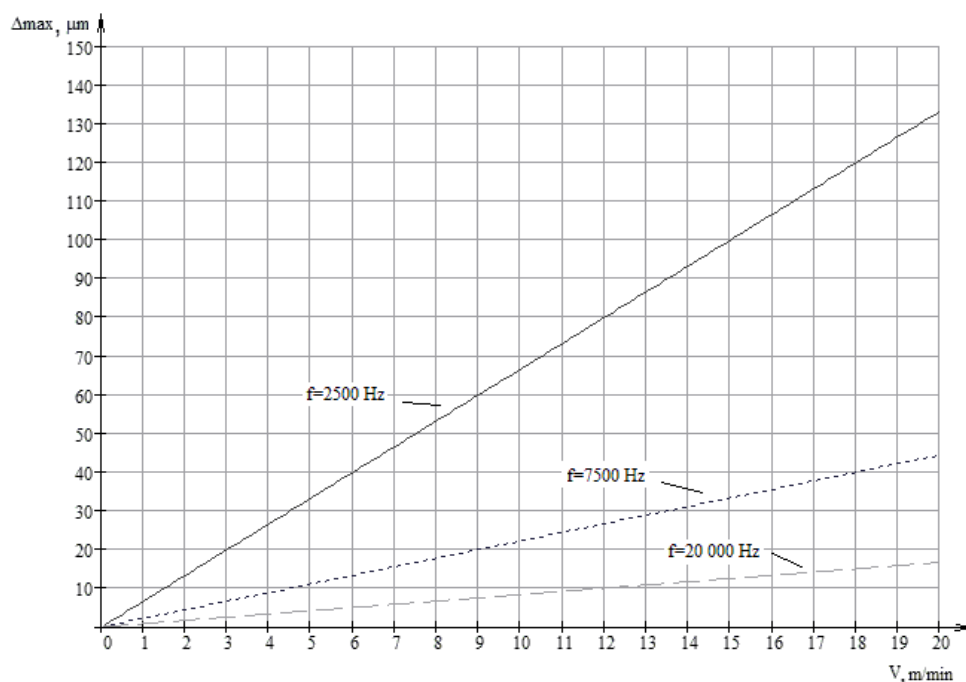


Рисунок 3 – Залежність максимальної абсолютної динамічної похибки Δ_{MAX} від швидкості переміщення V

Розрахунки, виконані з використанням (7), показують, що при швидкості $V = 15 \text{ м/хв}$ (швидкість швидкого переміщення), прискоренні $a = 5 \text{ м/с}^2$ і частоті напруги живлення $f = 2,5 \text{ кГц}$ максимальна абсолютна динамічна похибка Δ_{MAX} становить $0,1 \text{ мм}$, що є прийнятним для цього швидкісного режиму.

Вплив зміни прискорення a від 0 м/с^2 до $\pm 5 \text{ м/с}^2$ на величину максимальної абсолютної динамічної похибки Δ_{MAX} становить $0,0004 \text{ мм}$, що в більшості випадків є допустимим.

З другого боку, максимальна абсолютна динамічна похибка Δ_{MAX} не перевищує $0,001 \text{ мм}$, забезпечується при швидкості робочого переміщення V , не більшій $0,09 \text{ м/хв}$, що

менша швидкості 5 м/хв [1], прийнятої як максимальна швидкість робочого переміщення для верстатів з ЧПУ, застосовуваних у машинобудуванні.

При зміні частоти напруги живлення f від $2,5 \text{ кГц}$ до 20 кГц максимальна абсолютна динамічна похибка Δ_{MAX} зменшується у 8 разів і не перевищує $0,001 \text{ мм}$ при швидкості V , не більшій $1,2 \text{ м/хв}$.

Висновки. На максимальну абсолютну динамічну похибку методу вимірювання переміщення за допомогою вимірювального перетворювача типу індуктосин, що базується на вимірюванні зсуву фази, впливають: швидкість, прискорення заготовки і частота напруги живлення обмоток індуктосина,

Використання розглянутого методу можливе без компенсації динамічної похибки при правильному виборі значень швидкості, точності вимірювання і частоти напруги живлення індуктосина.

Застосування компенсації динамічної похибки дасть змогу істотно розширити експлуатаційні характеристики методу вимірювання, а саме підвищити максимальне значення швидкості робочого руху і точність вимірювання.

Список літератури

1. Кошкин В. Л. Аппаратные системы числового программного управления. Москва: Машиностроение, 1989. 248 с.
2. Резольверы – преобразователи угловых перемещений на основе вращающегося трансформатора. *СКБИС*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=10>
3. Инкрементные линейные фотоэлектрические преобразователи перемещений. *СКБИС*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1>
4. Лазерные датчики перемещения. *СКБИС*. URL: <http://www.mega-sensor.ru/measure/mes-displ/>
5. Петропавловский В. П., Синицын Н. В. Фазовые преобразователи угла. Москва: Машиностроение, 1984. 134 с.
6. Synchro/resolver conversion: handbook. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. URL: <https://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
7. Устройство 2С42–65: руководство по эксплуатации 3.035.090 РЭ. 1991. Ч. 1. 84 с.
8. Миронов Э. Г., Бессонов Н. П. Метрология и технические измерения: учеб. пособ. Москва: КНОРУС. 2015. 422 с.
9. Хрулев Н. В. Структура микроконтроллера измерителя перемещения на основе индуктосина. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. Хмельницький, 2015. № 1. С. 136–139.
10. Liu C. J., Qi M., Zou J. B. Error modeling of inductosyn angle measuring system. *Journal of Harbin Institute of Technology*. 2009. № 41.9. P. 51–55.

of Harbin Institute of Technology. 2009. № 41.9. P. 51–55.

11. Zhenghua C. J. E. L. L., Yunjie W. High speed and accuracy position measuring method based on inductosyn. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2005. № 4.

References

1. Koshkin, V. L. (1989). Hardware systems of numerical program control. Moscow: Mashinostroenie, 248 p. [in Russian].
2. Resolvers – angular displacement transducers based on a rotating transformer. *SKBIS*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=10>
3. Incremental linear photoelectric displacement transducers. *SKBIS*. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=1>
4. Laser displacement sensors. *SKBIS*. URL: <http://www.mega-sensor.ru/measure/mes-displ/>
5. Petropavlovskiy, V. P., Sinitsyn, N. V. (1984). Phase angle converters. Moscow: Mashinostroenie, 134 p. [in Russian].
6. Synchro/resolver conversion: handbook. Data Device Corporation 105 Wilbur Place, Bohemia, New York 11716-2482. URL: <https://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
7. The device 2C42–65: operation manual 3.035.090 RE (1991). P. 1, 84 p. [in Russian].
8. Mironov, E. G., Bessonov, N. P. (2015). Metrology and technical measurements: study guide. Moscow: KNORUS, 422 p. [in Russian].
9. Khrulev, N. V. (2015). Structure of a microcontroller displacement meter based on inductosyn. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tehnichni nauky*. Khmelnytsky, No. 1, pp. 136–139 [in Russian].
10. Liu, C. J., Qi, M., & Zou, J. B. (2009). Error modeling of inductosyn angle measuring system. *Journal of the Harbin Institute of Technology*, No. 41.9, pp. 51–55.
11. Zhenghua, C. J. E. L. L., Yunjie, W. (2005). High speed and accuracy position measuring method based on inductosyn. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, No. 4.

V. M. Rudnitsky, *D.Tech.Sc., professor*,
e-mail: rvn_2008@ukr.net

N. V. Khrulev, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: hrulev@ukr.net

H. V. Kanashevych, *Dr.Tech.Sc., professor*,
e-mail: kgv-elbeam@rambler.ru

A. I. Chislov, *senior lecturer*,
e-mail: a.i.chislov@gmail.com

G. V. Krivous, *head of laboratories*,
e-mail: krivous_gv@gmail.com

A. B. Skutskyi, *student*
e-mail: xronlol@gmail.com

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

ANALYSIS OF DYNAMIC ERROR OF MOVEMENT MEASUREMENT METHOD BY MEASURING CONVERTER OF INDUCTOSYN TYPE BASED ON PHASE SHIFT MEASURING

Movement meters are used in various technical and technological areas. Movement meters of the following types: inductosyns, rotary transformers, selsyns, optical grating displacement transducers and also laser based movement meters, are known. Movement meters of the inductosyn type based on conversion of angular moving to amplitude the greatest distribution was gained now. But currently a significant amount of equipment, in which inductosyn movement measuring meters are used, is in operation. Inductosyns are characterized by such features as reliability, durability, low static measurement error and ease of maintenance.

The method based on angular displacement conversion into a phase is one of the methods for movement measuring with inductosyns. The availability of dynamic error is a significant disadvantage of this method.

Thus, the task of the analysis of dynamic error of movement measurement method by measuring converter of inductosyn type based on phase shift measuring is relevant and has scientific and practical interest.

The article describes a movement measurement method by measuring converter of inductosyn type based on phase shift measuring. The occurrence and time behavior of dynamic error of the method are considered. The dependence of maximum absolute dynamic error of movement on the movement speed and supply voltage frequency is determined.

As a result of the performed analysis, it is concluded that the considered method can be used without dynamic error compensation at the correct choice of speed, frequency of inductosyn supply voltage and measurement accuracy values. However, the use of dynamic error compensation methods will give the possibility to expand the measurement method characteristics that is to increase the maximum value of movement speed and measurement accuracy.

Keywords: *measurement error, measurement method, movement measurement, measuring converter, inductosyn.*

Ю. М. Кузьмінська, директор Вищої школи управління
e-mail: jkuzminskaya@gmail.com

Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом»
вул. Фрометівська, 2, м. Київ, 03039, Україна

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ КРЕАТИВНІСТЮ І РИЗИКАМИ КОМАНД ОСВІТНІХ ПРОЕКТІВ У СФЕРІ ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ

Сучасне життя потребує швидкого та постійного розвитку: професійні знання, здобуті людиною, вже за кілька років стають застарілими та потребують оновлення. У професійній діяльності від працівників постійно вимагається мобільність і здатність до змін. Нерівномірність підготовки кадрів, перевиробництво кадрів одного профілю йде на шкоду іншим професіям, актуалізує потребу в пожиттєвому навчанні. Тому якраз в управлінні освітніми проектами у сфері підвищення кваліфікації, яка є складовою навчання впродовж життя і плацдармом для вирощування сучасних кадрів, добре себе зарекомендував саме проектний менеджмент.

Зазвичай команда освітнього проекту складається з креативних осіб, підібраних з-поміж внутрішніх працівників навчального закладу. Управління такими командами пов'язане з певними ризиками персоналу, що може в подальшому шкодити успішному завершенню освітнього проекту. Робота з командами, члени яких мають високий креативний потенціал, потребує додаткових і дієвих інструментів та методів управління.

Статтю присвячено аспектам практичного застосування розроблених автором моделей та методів управління креативністю і ризиками команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації. На прикладі освітнього проекту розробки та запуску програм підвищення кваліфікації за ваучерами в приватному закладі вищої освіти було виконано оцінювання креативності членів команд освітнього проекту за допомогою соціометричного методу перехресного оцінювання, й експертним методом визначено ризики персоналу, що найбільше впливають на результат проекту. За допомогою методу управління трудовими ресурсами освітніх проектів з урахуванням їх креативності та ризиків було визначено ступінь довіри до кожного члена команди проекту для подальшого планування проектним менеджером трудових ресурсів на критичному шляху освітнього проекту.

Ключові слова: освітній проект, сфера підвищення кваліфікації, команда проекту, управління, креативність, ризики, ступінь довіри.

Постановка проблеми. В сучасній освіті вищі навчальні заклади все частіше та частіше починають співпрацювати з бізнесом та державою, брати участь у спільних проектах щодо підготовки фахових кадрів для потреб ринку праці, починаючи впроваджувати в свою діяльність проектний підхід.

Освіта впродовж життя є загальновищаною необхідністю, яку Європейський Союз розглядає як важливий елемент соціальної моделі сучасного суспільства. Головним завданням навчання впродовж життя є навчання дорослого населення або безперервне підвищення кваліфікації дорослих громадян для всебічного задоволення їх освітніх потреб і забезпечення їхньої конкурентоспроможності на ринку праці.

Під підвищенням кваліфікації розуміють підвищення рівня готовності особи до

виконання її професійних завдань та обов'язків або набуття особою здатності виконувати додаткові завдання та обов'язки шляхом набуття нових знань і вмінь у межах професійної діяльності або галузі знань [1].

Освітній проект у сфері підвищення кваліфікації – це проект, який реалізується в галузі вищої освіти, результатом якого є набуті особою нові та/або вдосконалені раніше набуті компетентності у межах професійної діяльності або галузі знань, і щодо якого чітко визначено мету та базові обмеження: зміст, час, вартість, якість, ризики, ресурси.

Метою підвищення кваліфікації є зростання рівня знань та умінь усіх громадян за невеликий термін часу протягом усього життя за рахунок навчання за окремими темами, розділами, модулями чи дисциплінами на курсах підвищення кваліфікації, професій-

них курсах, курсах цільового призначення, дистанційних курсах, семінарах, тренінгах, майстер-класах, «воркшопах», «хакатонах» тощо. Всі ці освітні проекти, основним фактором впливу на успішний кінцевий результат яких є людський фактор, є типовими.

Останнім часом до управління командами освітніх проектів активно застосовуються креативні підходи. Інтерес до креативного управління або творчого підходу до вирішення завдань у рамках проекту обумовлений популяризацією використання високої оригінальності й нестандартності мислення для вирішення ключових проблем проекту.

Застосування до управління командами освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації креативних технологій є необхідною, але ризикованою справою, адже при управлінні такою командою неможливо буде спрогнозувати негативні результати та уникнути їх.

Аналіз останніх досліджень. Виходячи зі сформульованої вище проблеми, автором виконано аналіз робіт, присвячених застосуванню методології управління проектами в освітній сфері. Аналіз показав, що управління проектами і програмами в освітній галузі є вже досить дослідженим явищем. Так, багато робіт було присвячено застосуванню інструментів проектного менеджменту та проектно-орієнтованому управлінню у вищих навчальних закладах [2–5], але проблематика управління креативними командами освітніх проектів та їх ризиками саме у сфері підвищення кваліфікації була недостатньо вивченою, тому досліджувалася автором протягом тривалого часу.

Так, в результаті проведених досліджень автором у роботах [6, 7, 8] було побудовано моделі креативного управління освітніми проектами у сфері підвищення кваліфікації: концептуальну, математичну та когнітивну, а в роботі [9] було виконано оцінювання креативності в освітніх проектах у сфері підвищення кваліфікації за допомогою методу перекресної соціометричної оцінки. В свою чергу, в роботі [6] також було розроблено метод управління трудовими ресурсами освітніх проектів з урахуванням їх креативності та ризиків.

Кінцевим результатом цієї роботи стало застосування на практиці розроблених автором моделей і методів.

Метою статті є практичне застосування розроблених автором моделей і методів управ-

ління креативністю та ризиками команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації на прикладі реального проекту розробки та запуску програм підвищення кваліфікації за ваучерами в приватному закладі вищої освіти.

Виклад основного матеріалу. Ваучерна система становить альтернативу прямій закупівлі освітніх послуг через державну службу зайнятості та широко застосовується вже багато років у країнах Європи та країнах, що розвиваються.

Освітні проекти підвищення кваліфікації за ваучерами на сьогодні є досить важливими й актуальними як для самих вищих навчальних закладів, так і для держави в цілому.

Запровадження в своїй діяльності навчання за програмами підвищення кваліфікації за ваучерами для осіб старшого віку, в першу чергу, є доцільним саме для приватних закладів вищої освіти. В результаті, така спеціальна державна програма дасть можливість цим особам підвищити свою конкурентоспроможність на ринку праці, а закладу вищої освіти допоможе популяризувати свої освітні програми та підвищити власний імідж серед інших закладів освіти.

За два останні десятиліття перед Україною постала проблема працевлаштування осіб, старших 45 років. Незважаючи на те, що працівники такого віку мають певні професійні навички та досвід, вони зовсім не користуються «попитом» на ринку праці, як виявилося, через найуразливішу сторону конкурентоспроможності населення старшого віку – освітньо-кваліфікаційний рівень.

В Україні люди, старші 45 років, здобували освіту ще за радянських часів, тобто за зовсім інших економічних, політичних та соціальних умов. Професійна спрямованість і зміст їхньої освіти також були орієнтовані зовсім на іншу структуру економіки, іншу організацію праці та інші технології. Через неактуальні дипломи формальна наявність вищої освіти далеко не завжди дає можливість влаштуватися на робочі місця відповідної кваліфікації [10]. Тому такі фахівці особливо потребують підвищення кваліфікації та оновлення отриманих раніше знань.

Сьогодні роботодавці під час підбору персоналу ставляться досить упереджено до осіб старшого віку та неохоче беруть їх на роботу, вважаючи «перенавчання» проблемним і не вигідним. Керівництво підприємств,

установ та організацій не готове вкладати в освіту та професійний розвиток працівників, яким залишилося 10-15 років до досягнення пенсійного віку. Як наслідок, статистика показує, що частка безробітних у цій віковій групі вдвічі вища, ніж серед молодших громадян працездатного віку [11].

Одним із інструментів практичного втілення концепції освіти впродовж життя, який дає можливість особам старшого віку бути конкурентоспроможними на ринку праці, є ваучер на професійну підготовку, спеціальна програма видачі якого почала застосовуватися в Україні в рамках активної політики ринку праці з 2013 р.

Ваучер – це документ встановленого зразка, що дає особі одноразове право на перепідготовку, підготовку на наступному освітньо-кваліфікаційному рівні, спеціалізацію чи підвищення кваліфікації у навчальних закладах чи у роботодавця, тобто документ, який забезпечує право громадянина на навчання коштом держави [12].

Програма передбачає не тільки навчання тих, хто залишився без роботи, але й можливість підвищення конкурентних пе-

ревар для співробітників за рахунок держави. Для цього необхідно мати бажання навчатися і відповідати деяким критеріям: бути старшим 45 років (до настання пенсійного віку), мати страховий стаж, не менший ніж 15 років, надати до Центру зайнятості підтверджуючі документи [13].

Отримавши такий ваучер, громадянин може пройти підвищення кваліфікації за професіями та спеціальностями відповідно до затвердженого законодавством переліку [14], а також самостійно вибрати форму і місце навчання.

Протягом 2017–2018 рр. на базі одного з приватних закладів вищої освіти було успішно реалізовано освітній проект з розробки та запуску програм підвищення кваліфікації за ваучерами.

Навчальний заклад запропонував розробити для осіб старшого віку (старших 45 років) 10 програм підвищення кваліфікації за п'ятьма спеціальностями відповідно до своєї ліцензії та організувати навчання на курсах підвищення кваліфікації за ваучерами на базі одного зі своїх підрозділів – Вищої школи управління (табл. 1).

Таблиця 1 – Програми підвищення кваліфікації для осіб старшого віку за ваучерами

№	Спеціальність	Програма підвищення кваліфікації
1	Інженерія програмного забезпечення	Фахівець з розроблення комп'ютерних програм (Java SE)
		Програмування web-додатків мовою Python
		Web-програмування
		Фахівець з тестування програмного забезпечення (QA Testing)
		Інформаційне забезпечення IT-проектів
2	Комп'ютерна інженерія	Комп'ютерна грамотність: використання персонального комп'ютера для роботи на підприємствах, в організаціях (установах)
3	Менеджмент	Менеджер (управитель) житлового будинку (групи будинків)
4	Психологія	Практична психологія
		Медична психологія
5	Соціальна робота	Соціальний працівник

Керівником проекту було призначено директора Вищої школи управління, який відповідав за організацію та проведення підвищення кваліфікації фахівців у цьому приватному закладі освіти.

З-поміж співробітників навчального закладу (з відповідних підрозділів) було сформовано команду освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації, до якої входили: керівник проекту, асистент керівника проекту, офіс-менеджер, бухгалтер, юрист, менеджер

зі зв'язків з громадськістю та реклами і група викладачів (дев'ять осіб).

У ході роботи з членами команди освітнього проекту було виявлено, що кожен з них володіє достатньо високим креативним потенціалом, що може призвести до ризику незавершеності проекту або навіть його зриву.

У такому освітньому проекті, який ще й є обмеженим у строках виконання, при високій креативності членів команди проекту було вирішено зменшувати ризики таким чином,

щоб можна було після завершення отримати успішний проект з мінімальними втратами.

Для визначення, кого з членів команди можна було б поставити на виконання паралельних чи критичних робіт, або робіт з високим пріоритетом, було використано метод управління трудовими ресурсами освітніх проектів з урахуванням їх креативності та ризику [6].

В [15] було встановлено, що до ризиків, які найчастіше виникають в освітніх проектах у сфері підвищення кваліфікації, відносяться такі ризики персоналу: організаційний ризик (R1), кадровий ризик (R2), ризик плинності кадрів (R3), ризик недостатньої кваліфікації персоналу (R4), ризик помилки (R5), ризик менеджменту (R6), методичний ризик (R7), оскільки саме ці ризики, в ході досліджень, попали в червону зону ризиків.

Відповідно до методу, в першу чергу, необхідно було оцінити виділені ризики членів команди освітнього проекту:

$$R_j = \sum_{i=1}^7 RR_{ij}, \quad i = \overline{1,7}, \quad j = \overline{1,k}, \quad (1)$$

де i – порядковий номер ризику, що оцінюється, j – номер члена команди освітнього проекту, k – кількість членів команди освітнього проекту, RR_{ij} – проранжований i -й ризик j -го члена команди проекту.

Визначені ризики найбільше пов'язані саме з управлінням командою освітнього проекту, тому в процесі оцінювання ризиків було використано експертний метод. Експертиза мала індивідуальний та очний характер.

Експертом, який проводив оцінювання інших членів команди освітнього проекту, виступав керівник проекту, адже за попереднім досвідом роботи в інших проектах він вже добре знав можливості кожного з них. Експерту необхідно було оцінити ризики асистента керівника проекту, офіс-менеджера, бухгалтера, юриста і менеджера зі зв'язків з громадськістю та реклами, кожен з яких був поставлений на виконання різних задач. Сам експерт теж мав право голосу – він оцінював свої ризики самостійно, тобто для оцінювання ризиків керівника проекту було використано метод самооцінки.

Група викладачів не брала участі в оцінюванні, тому що вони були поставлені на виконання тільки однієї задачі – розробки навчальних планів та програм підвищення кваліфікації, їх навчально-методичного забезпечення.

Для оцінювання ризиків керівнику проекту необхідно було заповнити шість

відповідних анкет: на себе і на кожного члена команди освітнього проекту (табл. 2). Колонки цієї анкети відповідали номерам учасників оцінювання, а в рядках були вказані ризики кожного члена команди освітнього проекту, що необхідно оцінити: ймовірність виникнення ризику ($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$) та ступінь впливу ризику на хід проекту ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$).

Ймовірність, як завжди, визначається суб'єктивно і не може бути 100 % або навіть 80 %, оскільки така ймовірність виводить проблему з розряду ризиків і переводить у розряд фактів. Отже, з урахуванням цього керівник проекту оцінював значення ймовірностей P_j від 0 до 1 (у відповідних колонках табл. 2) для кожного ризику як для кожного члена проектної команди, так і для себе.

Далі керівник проекту оцінював ступінь впливу кожного ризику на хід проекту для кожного члена команди проекту від 0 до 1 за такою шкалою (у відповідних колонках табл. 2):

0,0 – 0,2 – дуже низький;

0,2 – 0,4 – низький;

0,4 – 0,6 – середній;

0,6 – 0,8 – високий;

0,8 – 1,0 – дуже високий.

Далі необхідно було проранжувати ризики (табл. 3), тобто визначити RR_{ij} (Risk Ranking) для кожного ризику за формулою

$$RR_{ij} = P_{ij} \times V_{ij}, \quad i = \overline{1,7}, \quad j = \overline{1,k}, \quad (2)$$

де P_{ij} – ймовірність виникнення i -го ризику, що оцінюється, j -го члена команди освітнього проекту; V_{ij} – вплив на хід освітнього проекту i -го ризику, що оцінюється, j -го члена команди освітнього проекту.

Результати оцінювання ризиків, яке проводилося за цією схемою, наведено в табл. 2 і 3.

Достовірність наведених результатів було підтверджено на практиці експериментальним шляхом під час реалізації проекту.

Наступним кроком було оцінювання креативності членів команди освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації за допомогою методу перехресної соціометричної оцінки, який використовують для вивчення внутрішньокolleктивних (внутрішньокomандних) зв'язків шляхом виявлення відносин між членами команди проекту. Тут цей метод було застосовано для дослідження міжособистісних відносин між членами команди проекту та у команді в цілому з метою їх поліпшення.

Таблиця 2 – Анкета оцінювання ризиків

Члени команди проекту Ризики, що оцінюються	Керівник проекту		Асистент керівника проекту		Офіс-менеджер		Бухгалтер		Юрист		Менеджер зі зв'язків з громадськістю та реклами	
	P_1	V_1	P_2	V_2	P_3	V_3	P_4	V_4	P_5	V_5	P_6	V_7
R1	0,1	0,8	0,2	0,8	0,3	0,6	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,6
R2	0,1	0,8	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4
R3	0,1	0,8	0,3	0,8	0,4	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	0,5	0,5
R4	0,1	0,8	0,3	0,7	0,6	0,4	0,5	0,6	0,2	0,7	0,4	0,6
R5	0,3	0,7	0,3	0,6	0,7	0,5	0,4	0,7	0,4	0,5	0,2	0,5
R6	0,3	0,7	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2	0,4
R7	0,4	0,5	0,3	0,6	0,3	0,4	0,2	0,7	0,2	0,7	0,2	0,6

Таблиця 3 – Результати оцінювання ризиків керівником проекту

Номер параметра	Керівник проекту	Асистент керівника проекту	Офіс-менеджер	Бухгалтер	Юрист	Менеджер зі зв'язків з громадськістю та реклами
RR1	0,08	0,16	0,18	0,09	0,20	0,12
RR2	0,08	0,12	0,10	0,04	0,12	0,12
RR3	0,08	0,24	0,12	0,15	0,24	0,25
RR4	0,08	0,21	0,24	0,30	0,14	0,24
RR5	0,21	0,18	0,35	0,28	0,20	0,10
RR6	0,21	0,30	0,24	0,15	0,06	0,08
RR7	0,20	0,18	0,12	0,14	0,14	0,12
R_j	0,94	1,39	1,35	1,15	1,10	1,03

Індекс креативності кожного члена команди освітнього проекту, достовірність розрахунку якого також була підтверджена експериментальним шляхом вже в ході реалізації проекту, був розрахований за формулою

$$K_j = \sum_{m=1}^N \frac{\sum_{j=1}^{k-1} K_{mj}}{k-1}, m = \overline{1, N}, j = \overline{1, k-1}, \quad (3)$$

де j – номер члена команди проекту, k – кількість членів команди проекту, m – порядковий номер параметра креативності, N – кількість параметрів креативності, K_{mj} – кількість балів при оцінюванні m -го параметра креативності j -го члена команди освітнього проекту.

Процедура перехресного соціометричного опитування має низку переваг: вона проста; займає мало часу; викликає зацікавленість; легко піддається статистичній обробці; доступна для всіх членів команди освітнього проекту; дає підстави і можливість змінювати взаємовідносини в команді.

В роботах [8, 9] було визначено та описано 10 параметрів креативності членів команди освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації: рутинність ($K1$), консервативність ($K2$), прогресивність ($K3$), ініціативність

($K4$), новизна ($K5$), деструктивність ($K6$), оптимальність ($K7$), інноваційність ($K8$), ефективність ($K9$), динамічність ($K10$), тобто в нашому випадку $N = 10$.

Як об'єкти дослідження були обрані ті самі шість членів команди освітнього проекту, що й при оцінюванні ризиків, які добре знають один одного по спільній роботі: керівник проекту, асистент керівника проекту, офіс-менеджер, бухгалтер, юрист, менеджер зі зв'язків з громадськістю та реклами.

Під час оцінювання параметрів креативності кожний учасник анкетування отримав анонімну анкету (табл. 4). Колонки цих анкет відповідали номерам членів команди, а в рядках були відзначені оцінювані якості – параметри креативності.

Цього разу опитуваному необхідно було поставити оцінки іншим п'яти учасникам анкетування за такою чотирибальною шкалою (у відповідних колонках табл. 4):

4 – якість виражена сильною мірою, виявляється часто;

3 – якість виражена середньою мірою, виявляється час від часу;

2 – якість виражена слабо, виявляється рідко або взагалі відсутня;

1 – важко відповісти.

Сам опитуваний свої параметри креативності не оцінював, адже була ймовірність того, що в його самооцінці можна буде виявити відхилення від дійсності. Тобто в цьому випадку для підвищення об'єктивності оцінки

ця частина перехресного соціометричного методу не використовувалася.

Приклад анкетування параметрів креативності подано в табл. 4, де керівник проекту оцінює решту членів команди освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації.

Аналогічно було проведено оцінювання параметрів креативності по решті учасників анкетування.

Таблиця 4 – Зразок заповненої анкети оцінювання параметрів креативності

Оцінюваний параметр креативності	Керівник проекту	Асистент керівника проекту	Офіс-менеджер	Бухгалтер	Юрист	Менеджер зі зв'язків з громадськістю та реклами
K_1	-	3	3	3	1	1
K_2	-	3	3	3	1	3
K_3	-	1	2	3	3	4
K_4	-	2	1	3	4	3
K_5	-	2	1	4	3	2
K_6	-	3	3	4	4	3
K_7	-	1	2	2	2	1
K_8	-	1	2	3	3	1
K_9	-	1	3	1	1	3
K_{10}	-	2	1	3	3	2

Далі виконувався табличний етап обробки даних, що передбачав побудову таблиці, за

допомогою якої узагальнюються результати оцінювання (табл. 5).

Таблиця 5 – Узагальнені результати оцінювання

Сума всіх оцінок по кожному параметру креативності	Керівник проекту	Асистент керівника проекту	Офіс-менеджер	Бухгалтер	Юрист	Менеджер зі зв'язків з громадськістю та реклами
$K_{(1,1)} \dots K_{(1,6)}$	12	13	11	10	15	16
$K_{(2,1)} \dots K_{(2,6)}$	12	11	11	13	19	10
$K_{(3,1)} \dots K_{(3,6)}$	20	17	15	14	15	15
$K_{(4,1)} \dots K_{(4,6)}$	20	17	15	8	8	16
$K_{(5,1)} \dots K_{(5,6)}$	19	11	13	6	7	11
$K_{(6,1)} \dots K_{(6,6)}$	9	9	10	10	12	9
$K_{(7,1)} \dots K_{(7,6)}$	20	16	12	19	17	16
$K_{(8,1)} \dots K_{(8,6)}$	20	14	11	15	14	14
$K_{(9,1)} \dots K_{(9,6)}$	20	16	11	20	20	13
$K_{(10,1)} \dots K_{(10,6)}$	20	14	13	12	14	13

У табл. 6 представлено остаточні розрахунки для визначення індексу креативності кожного члена команди освітнього проекту.

Оскільки суть методу управління трудовими ресурсами освітніх проектів з урахуванням їх креативності та ризиків полягає в тому, що один з членів команди ставиться в ситуацію вибору щодо інших членів коман-

ди проекту за тим чи іншим критерієм, то його було застосовано при оцінюванні ступеня довіри до кожного члена команди проекту.

Далі було визначено інтегральний показник оцінки «креативність–ризик» кожного члена команди освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації, який враховував як креативність, так і ризики.

Таблиця 6 – Розрахунок індексу креативності кожного члена команди проекту

Індекс креативності	Керівник проекту	Асистент керівника проекту	Офіс-менеджер	Бухгалтер	Юрист	Менеджер зі зв'язків з громадськістю та реклами
K_1	2,4	2,6	2,2	2	3	3,2
K_2	2,4	2,2	2,2	2,6	3,8	2
K_3	4	3,4	3	2,8	3	3
K_4	4	3,4	3	1,6	1,6	3,2
K_5	3,8	2,2	2,6	1,2	1,4	2,2
K_6	1,8	1,8	2	2	2,4	1,8
K_7	4	3,2	2,4	3,8	3,4	3,2
K_8	4	2,8	2,2	3	2,8	2,8
K_9	4	3,2	2,2	4	4	2,6
K_{10}	4	2,8	2,6	2,4	2,8	2,6
K_j	34,4	27,6	24,4	25,4	28,2	26,6

Оскільки якісна співпраця членів команди проекту починається зі ставлення та довіри кожного члена команди проекту один до одного, то цей показник був названий автором «ступінь довіри» і позначався як CR_j .

Отже, в результаті проведеного дослідження ступінь довіри кожного члена команди освітнього проекту було визначено за формулою

$$CR_j = K_j - R_j. \quad (4)$$

У ході нашого дослідження для кожного члена команди проекту було визначено ступінь довіри за такою шкалою (у відповідній колонці табл. 7):

3,0 – 10,38 – низький;

10,38 – 17,76 – нижчий середнього;

17,76 – 25,14 – середній;

25,14 – 32,52 – вищий середнього;

32,52 – 39,9 – високий.

Остаточні розрахунки індексу CR_j представлені у табл. 7.

Таблиця 7 – Розрахунок ступенів довіри

Члени команди проекту	K_j	R_j	CR_j	Ступінь довіри
1	34,40	0,90	33,50	високий
2	27,60	1,39	26,21	вищий середнього
3	24,40	1,35	23,05	середній
4	25,40	1,15	24,25	середній
5	28,20	1,10	27,10	вищий середнього
6	26,60	1,03	25,57	вищий середнього

Таким чином, ми отримали команду в основному з високими та середніми ступенями довіри, серед членів якої будуть обиратися ті, у кого індекс CR_j є найбільшим, а отже, лише таких членів команди проекту необхідно було б призначати на паралельні або критичні роботи, або на роботи з високим пріоритетом.

У цьому випадку найбільші ступені довіри були у проектного менеджера ($CR_1=33,5$), юриста ($CR_5=27,1$), асистента керівника проекту ($CR_2=26,21$) та менеджера зі зв'язків з громадськістю та реклами ($CR_6=25,57$), тому

такі роботи будуть розподілені саме серед цих членів команди освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації.

Достовірність отриманих результатів була підтверджена експериментально в ході реалізації цього проекту розробки та запуску програм підвищення кваліфікації за ваучерами в приватному закладі вищої освіти, під час якого індекс CR_j кожного члена команди було контрольно перераховано. Отримані фактичні результати дуже близько збіглися з плановими: $CR_1 = 34,15$; $CR_2 = 28,38$; $CR_3 = 30,40$; $CR_4 = 25,93$; $CR_5 = 30,2$; $CR_6 = 28,16$.

Висновки. Такий метод управління трудовими ресурсами дасть можливість попередити або хоча б якось застрахуватися від ризиків, пов'язаних з членами команди освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації та їх високою креативністю. За допомогою представленої методики оцінювання вже на етапі планування проекту можна буде врахувати майбутні ризики та креативність. А отже, проектний менеджер зможе розставляти по критичних задачах креативних членів команди проекту таким чином, щоб проект був максимально успішним.

Список літератури

1. Проект положення про післядипломну освіту у сфері вищої освіти України. URL: old.mon.gov.ua/img/zstored/files/Проект%20Положення%20про%20ПДО.doc
2. Білощицький А. О. Методологія проектно-векторного управління освітніми середовищами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.22 «Управління проектами та програмами»; МОНМС України, Київ, нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2012. 35 с.
3. Рулікова Н. С. Управління портфелем інноваційних проектів вищих навчальних закладів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.13.22; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. Миколаїв, 2009. 20 с.
4. Коляда О. П. Проектно-ориєнтованная формализация стратегического компонента функциональной деятельности высшего учебного заведения. *Управління проектами та розвиток виробництва*: зб. наук. праць. 2008. № 3 (27). С. 81–87.
5. Рач В. А., Борзенко-Мірошніченко А. Ю. Проектно-орієнтовані моделі управління та оцінки діяльності вищих навчальних закладів. *Управління проектами та розвиток виробництва*: зб. наук. праць. 2009. № 1 (29). С. 81–89.
6. Кузьмінська Ю. М. Метод управління трудовими ресурсами освітніх проектів. *Управління проектами: інновації, нелінійність, синергетика*: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф. магістрів, аспірантів та науковців. Одеса: ОДАБА, 2014. Т. 2. С. 122–125.
7. Кузьмінська Ю. М. Когнітивна модель взаємовпливів ризиків проектів в сфері післядипломної освіти. *Управління проектами у розвитку суспільства*: тези доп. XII міжнар. конф. Київ: КНУБА, 2015. С. 144–146.
8. Кузьмінська Ю. М. Концептуальна модель управління командами освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації. *Управління проектами: стан та перспективи*: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф. Миколаїв: НУК, 2018.
9. Лепський В. В., Кузьмінська Ю. М. Застосування методу перехресної соціометричної оцінки до визначення креативності команди проекту. *Вісник НТУ «ХПІ»*: зб. наук. праць. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 2 (1111). С. 172–177.
10. Ткаченко Л. Г. Ваучери на навчання осіб віком старше 45 років як інструмент активної політики ринку праці. *Демографія та соціальна економіка*. 2015. № 2 (24). С. 41–52.
11. Офіційний веб-сайт Держстату України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/rp/eans/eans_u/arch_znsmv_u.htm
12. Про зайнятість населення: Закон України. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5067-17>
13. Про затвердження Порядку видачі ваучерів для підтримання конкуренто-спроможності осіб на ринку праці: постанова КМУ № 207 від 20.03.2013 р. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/207-2013-%D0%BF#n13>
14. Про затвердження Переліку професій, спеціальностей, напрямів підготовки та підвищення кваліфікації, для навчання за якими може бути виданий ваучер: наказ Мінсоцполітики № 661 від 25.06.2015 р. зі змінами та доповненнями. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0817-15>
15. Кузьмінська Ю. М. Кадрові ризики в проектах післядипломної освіти. *Стан та перспективи розвитку соціально-економічних систем в епоху економіки знань*: матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля. Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2014. С. 77–80.

References

1. Draft regulations on postgraduate education in higher education of Ukraine. URL:

- old.mon.gov.ua/img/zstored/files/Проект%20Положення%20про%20ПДО.doc
2. Biloshchitsky, A. O. (2012). Methodology of the project and vector management by educational environments: author's abstract for Dr.Tech.Sc.: 05.13.22 "Project and program management"; MONMS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, 35 p. [in Ukrainian].
 3. Rulikova, H. S. (2009). Portfolio management of innovative projects of higher educational establishments: author's abstract for Ph.D.: 05.13.22; Admiral Makarov National University of Shipbuilding. Mykolaiv, 20 p. [in Ukrainian].
 4. Koliada, O. P. (2008). Project-oriented formalization of strategic component of functional activity of a higher educational institution. *Upravlinnya proektamy ta rozvytok vyrobnytstva*: coll. of sci. works, No. 3 (27), pp. 81–87 [in Russian].
 5. Rach, V. A., Borzenko-Miroshnichenko, A. Yu. (2009). Project-oriented models of management and evaluation of the activities of higher educational institutions. *Upravlinnya proektamy ta rozvytok vyrobnytstva*: coll. of sci. works, No. 1 (29), pp. 81–89 [in Ukrainian].
 6. Kuzminska, Yu. M. (2014). Method of management by educational projects labor forces. *Upravlinnya proektamy: innovatsiyi, neliniynist, synergetyka*: materials of the fifth Internat. conf. of masters, postgraduates and scientists. Odesa: ODABA, Vol. 1, pp. 122–125 [in Ukrainian].
 7. Kuzminska, Yu. M. (2015). Cognitive model of mutual influence of risks of projects in the field of postgraduate education. *Upravlinnya proektamy u rozvytku suspilstva*: abstracts of the twelfth Internat. conf. Kyiv: KNUBA, pp.144–146 [in Ukrainian].
 8. Kuzminska, Yu. M. (2018). Conceptual model of educational project team management in the field of further training. *Upravlinnya proektamy: stan ta perspektyvy*: materials of the XIV Internat. sci.-pract. conf. Mykolayiv: NUK [in Ukrainian].
 9. Lepsky, V. V, Kuzminska, Yu. M. (2015). Application of the cross-sociometric evaluation method in the determination of project team creativity. *Visnyk NTU "KhPI"*: coll. of sci. works. *Seriya: Strategichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, programamy ta proektamy*. Kharkiv: NTU "KhPI", No. 2 (1111), pp. 172–177 [in Ukrainian].
 10. Tkachenko, L. H. (2015). Vouchers for the training of persons over 45 years of age as an active labor market policy tool. *Demografiya ta sotsialna ekonomika*, No. 2 (24), pp. 41–52 [in Ukrainian].
 11. State Statistics Service in Ukraine. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/rp/eans/eans_u/arch_znsmv_u.htm
 12. Law of Ukraine "On employment of the population". URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/5067-17>
 13. CMU Resolution "On approval of the Procedure for issuing vouchers for maintaining the competitiveness of individuals in the labor market" No. 207 dated March 20, 2013. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/207-2013-%D0%BF#n13>
 14. Order of the Ministry of Economic Affairs and Finance "On approval of the List of professions, specialties, directions of training and advanced training, for which training may be issued voucher" No. 661 dated 2015.06.25 with amendments and additions. URL: <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0817-15>
 15. Kuzminska, Yu. M. (2014). Personnel risks in postgraduate education projects. *Stan ta perspektyvy rozvytku sotsialno-ekonomichnyh system v epohu ekonomiky znan*: materials of the Third Internat. sci.-pract. conf. of students, postgraduates and young scientists. V. Dahl Eastern Ukrainian National University. Luhansk: vyd-vo SNU im. V. Dahlya, pp. 77–80 [in Ukrainian].

Yu. M. Kuzminska, Director of the Higher School of Management
e-mail: jkuzminskaya@gmail.com
PJSC «Interregional Academy of Personnel Management»
Frometivska str., 2, Kyiv, 03039, Ukraine

**PRACTICAL APPLICATION OF MODELS AND METHODS OF MANAGEMENT
BY CREATIVITY AND RISKS OF EDUCATIONAL PROJECT TEAMS
IN THE FIELD OF FURTHER TRAINING**

Modern life requires rapid and continuous development: professional knowledge, gained by a person, becomes outdated in several years and needs to be updated. In professional activities, there is always request for mobility and ability to change. The unevenness of staff training, overproduction of personnel in one profile harms other professions, actualizing the need for lifelong learning. Therefore, in the management by educational projects in the field of further training, which is a component of lifelong learning and a springboard for the growth of modern staff, project management works better.

Typically, a team of educational project consists of creative individuals selected from among the internal staff of educational institution. The management by such teams involves certain personnel risks, which may further undermine the successful completion of an educational project. The work with teams, the members of which have high creative potential, requires additional and effective tools and methods of management.

The article is devoted to aspects of practical application of author's models and methods of managing the creativity and risks of educational project teams in the field of further training. The author has made an assessment of the members' creativity using the sociometric cross-evaluation and the expert methods. The assessment has been based on an example of educational project for the development and launch of qualification improvement programs with vouchers in a private institution of higher education. This helped to identify personnel risks which influence the project results the most. The article shows how using the method of labor resources management in educational projects, taking into account creativity and risks, and the method of cross-evaluation, it is possible to determine the criteria of trust to each member of the project team for further planning the project by a human resources manager on the critical path of an educational project.

Keywords: educational project, sphere of professional development, project team, management, creativity, risks, degree of trust.

К. О. Кірей, к.п.н., доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення
e-mail: kirey.kea@gmail.com, katernyna.kirey@chmnu.edu.ua
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, Україна

РОЗВИТОК І ТРАНСФОРМАЦІЯ ПОНЯТТЯ BIG DATA

У статті розглядається розвиток і трансформація поняття «Великі дані» (Big Data). Нині це поняття не має чіткого трактування. Теоретичне дослідження показало, що його розвиток доцільно розглядати в історичному контексті. Спочатку вважалося, що критерієм віднесення до категорії Big Data, перш за все, є потік даних, більший 100 Гбайт на день. Однак виявилося, що цього недостатньо, щоб однозначно віднести продукт до категорії Big Data. Згодом як такий критерій було запропоновано використовувати якісні ознаки – «певну кількість V»: Volume – значне збільшення обсягу даних у корпоративних системах; Variety – різноманітність форматів і структур даних; Velocity – швидкість отримання і обробки даних для задоволення запиту тощо. Однак такий підхід не розкриває це поняття повною мірою, а торкається окремих його аспектів. В інших дослідженнях можна побачити визначення цього поняття як неможливості обробки даних традиційними способами. Однак таке визначення можна вже вважати застарілим, адже технології обробки великих обсягів даних експерти вже не відносять до новітніх. Деякі фахівці пропонують взагалі відмовитися від цього поняття. Однак, зважаючи на його значне поширення, це не видається можливим. Розвиток інформаційних технологій змінив наше ставлення до даних та інформації, а це, у свою чергу, вплинуло на сутність поняття Big Data. Нині під цим скоріше розуміється особливий підхід – ідеологія обробки великих масивів «сирих» даних. Однак не виключено, що в майбутньому це поняття може зникнути як застаріле та неактуальне, адже великі обсяги даних і сучасні підходи до їх обробки стануть звичайними засобами, і не буде необхідності робити акцент на їх інноваційній складовій.

Ключові слова: великі дані, Big Data, інформаційні технології.

Вступ. Бурхливий розвиток інформаційних технологій, зокрема мережевих, технологій накопичення та зберігання даних, поява нових електронних сервісів сприяють значному зростанню потоків та обсягів даних. Це привело до зміни парадигми накопичення даних. Самі дані стали цінним ресурсом, який можна застосовувати у різних галузях. Відбувся перехід від парадигми накопичення даних – «ми знаємо, які дані нам потрібні, й збираємо саме їх» до – «ми не знаємо, які дані нам потрібні, збираємо усі дані, що можливо, а потім з'ясуємо їх цінність» [4]. З'явилися програмні й апаратні засоби, інформаційні системи, методи й технології роботи з великими обсягами даних і поняття, що описує усі ці явища – Big Data. Вже є багато ресурсів, що переймаються проблемами дослідження, використання та стандартизації великих даних. Установи, що займаються стандартизацією, також працюють над проблемами ефективного спільного використання джерел даних. Рішення з відкритими вихідними кодами дають можливість

досліджувати, вивчати й експериментувати з даними великого розміру. Таким даним вже присвячено багато наукових розробок, літератури, конференцій, форумів тощо. Серед усього цього слід звернути увагу на роботи, присвячені тематиці великих даних, таких авторів, як Дж. Гурвіц, А. Ньюджент, Ф. Халпер, М. Кауфман [13]. Провідними організаціями, що займаються стандартизацією великих даних, є:

- Фонд відкритих даних (The Open Data Foundation, ODaF (www.opendatafoundation.org)) – некомерційна організація, що сприяє впровадженню міжнародних стандартів метаданих і розробці інструментів з відкритими вихідними кодами для обробки статистичних даних.
- Альянс інформаційної безпеки (Cloud Security Alliance (cloudsecurityalliance.org)) – займається впровадженням ефективних методів гарантування безпеки хмарних обчислень і навчанням відповідних ІТ-спеціалістів. Зокрема, альянсом організовано робочу групу

з великих даних (Big Data Working Group), метою якої є пошук масштабованих методів захисту інформації та вирішення проблем забезпечення конфіденційності великих даних [10].

- Національний інститут стандартів та технологій (National Institute of Standards and Technology, NIST (www.nist.gov)) – американська державна установа, що розробляє нові стандарти. Зокрема, у березні 2012 р. інститут заснував проєкт з великих даних, метою якого є навчання установ щодо використання великих даних у наукових дослідженнях, охорони навколишнього середовища, розвитку біомедицини, системи навчання та гарантування безпеки країни.

- Фонд програмного забезпечення Apache (Apache Software Foundation, ASF (www.apache.org)) – забезпечує організаційну, юридичну та фінансову підтримку широкого кола проєктів, пов'язаних з розробкою ПЗ з відкритим вихідним кодом. Зокрема, одним із ключових проєктів фонду є керування платформою Hadoop, що забезпечує стандартні методи кластерної обробки наборів великих даних [7].

- Організація щодо розвитку стандартів структурованої інформації OASIS (Organization for the Advancement of Structured Information Standards (www.oasis-open.org)) –

здійснює некомерційну діяльність стосовно розробки стандартів великих даних.

Нині вже є багато рішень, пов'язаних з великими даними, серед яких слід звернути увагу на розробки таких компаній, як Google (Google AI (ai.google/research)), Amazon (Сервіси хмарних технологій (aws.amazon.com/ru/?nc2=h_lg)), IBM (www.ibm.com/analytics/products/cognitiveclass.ai/learn/big-data/), Oracle (Big Data, Big Data Appliance, Big Data Cloud Service, Big Data Connectors, Big Data Discovery, Big Data Platform, Big Data Preparation Cloud Service, Big Data SQL, Big Data Spatial and Graph (www.oracle.com/ru/products/oracle-a-z.html#b)), Microsoft (www.microsoft.com/en-us/sql-server/big-data) тощо. Аналітичні компанії також не обійшли стороною це явище. Так, аналітична компанія Gartner вперше згадує про великі дані у циклі зрілості технологій (Hype Cycle Emerging Technologies) за 2011 р. під назвою "Big Data and Extreme Information Processing and Management" [14]. За даними аналітичної компанії Forrester, у майбутньому буде спостерігатися значне зростання ринку рішень класу Big Data. У їхньому звіті прогнозується, що ринок таких рішень буде зростати, при цьому «нереляційні» платформи, такі як сегменти Hadoop і NoSQL, зростатимуть майже вдвічі швидше (рис. 1).

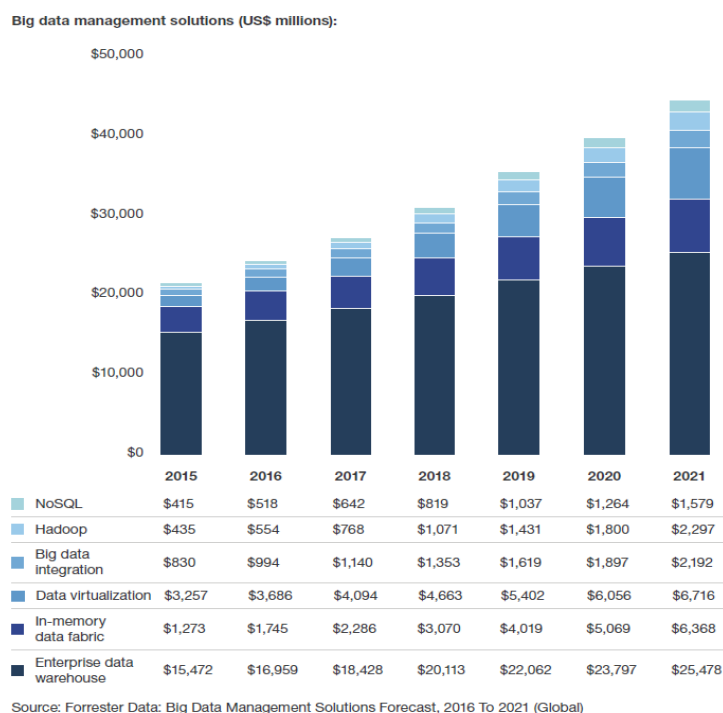


Рисунок 1 – Діаграма за період 2015–2021 рр. ринку рішень управління великими даними від компанії Forrester

Google Trends (trends.google.com) показує активне зростання вживання терміна Big Data у пошукових запитах, починаючи саме з 2011 р. (рис. 2). Така ж тенденція притаманна і нашій країні (рис. 3).

Проте виявилося, що це поняття вельми розпливчате, неоднозначне і викликає багато суперечностей серед фахівців. Отже, метою статті є дослідження сутності поняття Big Data (Великі дані) та окреслення подальшого напрямку розвитку цієї дефініції.

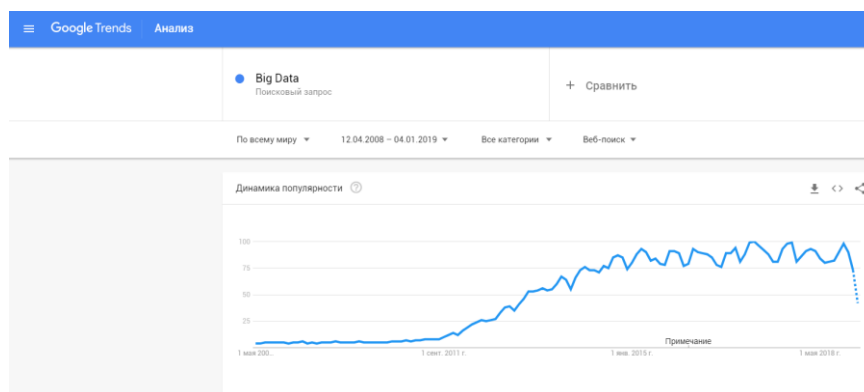


Рисунок 2 – Статистика використання пошукового запиту Big Data в світі за даними аналітичної платформи Google Trends

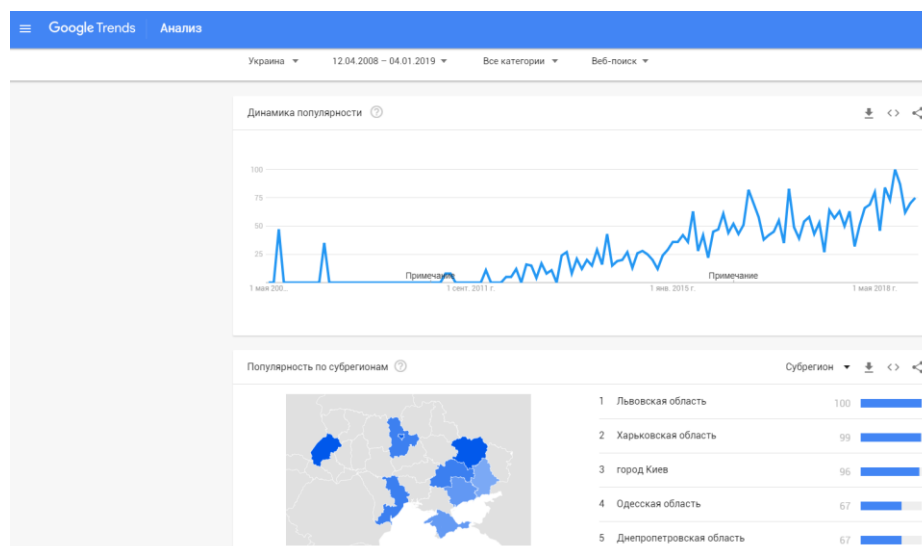


Рисунок 3 – Статистика використання пошукового запиту Big Data в регіонах України за даними аналітичної платформи Google Trends

Основна частина. Історично склалося, що поняття Big Data має дату появи – 4 вересня 2008 р., коли вийшов спеціальний номер британського журналу Nature, присвячений проблематиці бурхливого зростання глобальних даних та їхньої ролі у науці й суспільстві [8]. І саме тут уперше звернено увагу на зміну відношення до даних, дані розглядаються як ресурс на рівні природних копалин.

Спочатку фахівці стверджували, що критерієм відношення до категорії Big Data, перш за все, є потік даних, більший за 100 Гбайт на день. Проте виявилося, що цього недостатньо, щоб однозначно віднести продукт до категорії

Big Data. Згодом аналітична компанія Gartner вводить визначення поняття Big Data через «три V» [11]:

- Volume (об'єм) – це збільшення обсягів даних у корпоративних системах за рахунок збільшення обсягів транзакцій та використання традиційних і нових типів даних. Спеціалісти компанії Gartner наголошують на тому, що занадто великий обсяг даних породжує проблему їхнього зберігання, проте це також породжує проблему аналізу даних.
- Variety (різноманітність та неструктурованість даних) полягає у різноманітному фор-

маті наявних даних, це можуть бути табличні дані (бази даних), ієрархічні дані, документи, дані електронної пошти, дані вимірювання, відео, нерухомі зображення, аудіо, дані біржових цінних паперів, дані фінансових операцій тощо. Це породжує проблему переведення великих обсягів транзакційної інформації в рішення.

- Velocity (швидкість обробки) означає як швидкість отримання даних, так і швидкість їх обробки для задоволення запиту.

Такий підхід підхопили інші фахівці й розширили ознаки. Так, компанія Forrester визначає поняття Big Data як технологію в галузі апаратного і програмного забезпечення, яка об'єднує, організовує, керує й аналізує дані, що характеризуються «чотирма V»: об'ємом (Volume), різноманітністю (Variety), мінливістю (Variability) та швидкістю (Velocity) [12, с. 4–5]. Тут під об'ємом розуміється

дуже великий обсяг інформації, накопичений у базах даних, що складно обробляти та зберігати традиційними засобами СУБД. Аналітики компанії Forrester роблять акцент на необхідності використання нових підходів і вдосконалення наявних інструментів обробки та збереження даних. Розуміння ознаки різноманітності даних аналітиками компанії Forrester і Gartner є схожим. Швидкість тут розуміється як швидкість не тільки обробки даних, а й їх накопичення. Аналітики звертають увагу на те, що стали більш затребувані технології обробки даних у реальному часі. Також було додано четверту ознаку Variability – мінливість інформації. Наприклад, такою є інформація, що безперервно надходить з датчиків пристроїв або з Інтернету і має важливе значення для аналізу, прогнозування та прийняття рішень. На рис. 4 зображено діаграму співвідношення цих чотирьох ознак Великих даних.

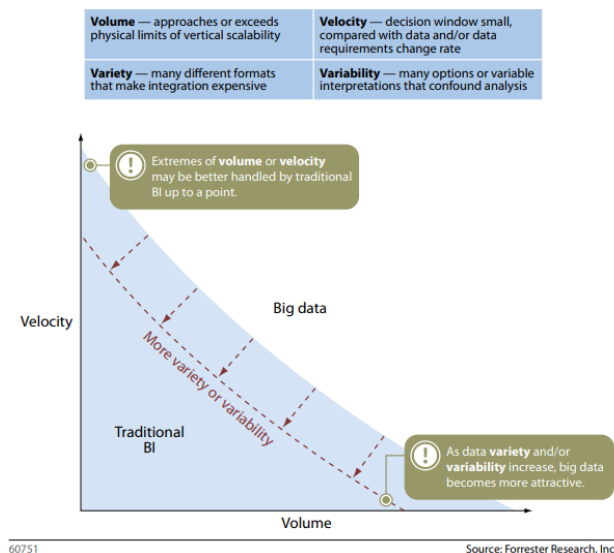


Рисунок 4 – Діаграми чотирьох ознак Великих даних за даними компанії Forrester [12, с. 5]

Згодом цей список ознак було поповнено: «п'ять V» (додано Viability – життєздатність, Value – цінність), «сім V» (додано Veracity – достовірність, Visualization – візуалізація) тощо. Так, наприклад, спеціалістами вітчизняного освітнього ресурсу про новітні технології «The Future» було виокремлено «п'ять V» [3]: Volume (об'єм), Velocity (швидкість), Variety (різноманітність), Variability (мінливість) та Veracity (достовірність). Під достовірністю тут розуміється саме виокремлення достовірних даних. Необхідність п'ятої ознаки пояснюється тим, що якість зафіксованих даних може дуже відрізнятись, що має істотний вплив на результати аналізу.

Надалі цей список «V» можна продовжувати, конкретизуючи його для кожної задачі або бізнес-процесу, проте такий підхід не розкриває це поняття повною мірою, а лише торкається окремих його аспектів. Як справедливо зазначає Джудіт Гурвіц: «Вищезазначені ознаки не завжди виражені у великих даних рівною мірою. Наприклад, методи роботи з великими даними можна застосувати для управління порівняно невеликим об'ємом різноманітних і складних даних або при обробці дуже простих даних, але у великій кількості» [2, с. 27]. Усі ці ознаки є якісними. Постають питання, коли, наприклад, обсяг даних великий, а коли він ще недостатньо великий, чим

це виміряти, що взяти за точку відліку, яку швидкість обробки вважати великою тощо.

Розглядаючи Big Data як технологію, тут можна виокремити три напрями за завданнями, що вирішуються:

- збір, первісне оброблення та зберігання даних для їхнього подальшого використання;
- структурування розрізненого контенту: текстового, графічного, відео, аудіо, звукового тощо;
- бізнес-аналітика на великих обсягах даних.

Для кожного напрямку існують свої вигоди та ознаки технологій цього класу. Отже, неможливо і немає потреби поєднувати в одному понятті усі ці напрями. Так, у статті про Великі дані з Вікіпедії надаються альтернативні визначення поняття Великих даних через зазначені ознаки і звертається увага на різний контекст розгляду цього поняття: «Великі дані (англ. Big Data) в інформаційних технологіях – набори інформації (як структурованої, так і неструктурованої) настільки великих розмірів, що традиційні способи та підходи (які здебільшого базуються на рішеннях класу бізнесової аналітики та системах управління базами даних) не можуть бути застосовані до них. Альтернативне визначення називає великими

даними феноменальне прискорення нагромадження даних та їх ускладнення. Важливо також відзначити те, що часто під цим поняттям у різних контекстах можуть мати на увазі як дані великого об'єму, так і набір інструментів та методів (наприклад, засоби масово-паралельної обробки даних системами категорії NoSQL, алгоритмами MapReduce чи програмними каркасами проекту Hadoop)» [1].

Фахівці сходяться на думці, що Big Data – це зонтичний термін, синергія величезної кількості технологій, багато з яких самі по собі гідні найпильнішого розгляду. Проте з'явилася нова галузь і сформовані підходи щодо роботи з даними. З'явилися засоби, що дають змогу працювати з конкретними бізнес-проблемами і знаходити розумні рішення задач нового рівня [9]. Так, аналітична компанія Forrester у своєму дослідженні TechRadar: Big Data, Q1 2016 описала поточний стан та перспективи розвитку 22 провідних технологій класу Big Data (рис. 5). Кількість і розмір стрілок у кружечках означають швидкість просування цієї технології по кривій розвитку TechRadar. Квадратик або вертикальні лінії показують те, що технологія практично не розвивається або досягла максимуму своїх можливостей.

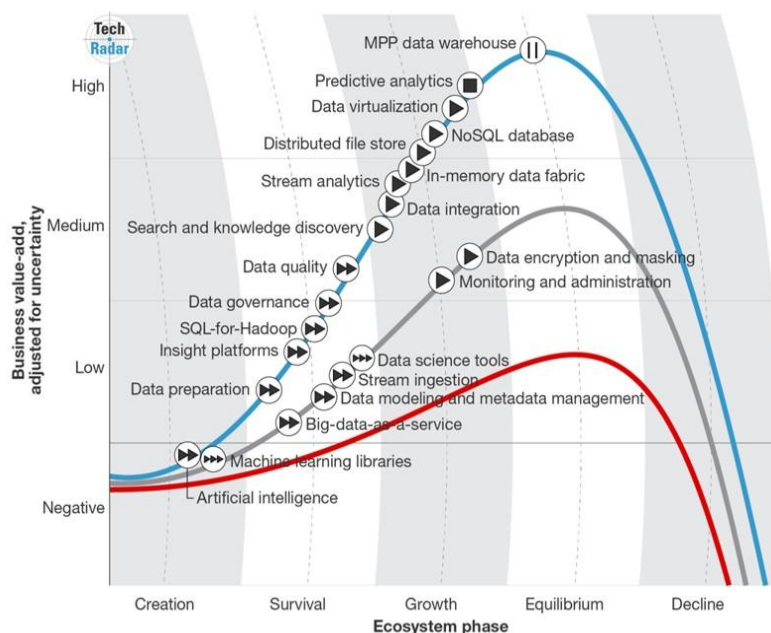


Рисунок 5 – Поточний стан та перспективи розвитку 22 провідних технологій Big Data від компанії Forrester

В інших дослідженнях можна натрапити на визначення цього поняття як неможли-

вості обробки даних традиційними способами. Проте таке визначення є тимчасовим,

адже способи, що нині є новітніми, завтра вже можуть стати традиційними. Так, зокрема, технології обробки великих обсягів даних експерти вже не відносять до новітніх. Компанія Gartner у циклі зрілості технологій за 2015 р. прибрала технологію Big Data (рис. 6). Аналітики компанії пояснюють це розмиванням

терміна – технології, що входять у поняття великих даних, стали повсякденною реальністю бізнесу. Тобто до складу поняття Big Data входить велика кількість технологій, що вже частково відносяться до інших популярних сфер і стали повсякденним робочим інструментом.



Рисунок 6 – Цикл зрілості технологій за 2015 р., складений компанією Gartner

Висновки. Отже, визначення поняття Big Data потребує інших підходів. Як протилежність цьому існують точки зору, коли взагалі пропонується відмовитися від цього поняття [5]. На думку багатьох експертів, настала епоха, коли важливо не просто вміти акумулювати інформацію, а витягувати з неї бізнес-вигоду. Першими цього висновку дійшли індустрії, які безпосередньо працюють зі споживачем: телекомунікаційна і банківська. Тепер процеси взаємодії виходять на новий рівень, даючи змогу налагодити зв'язок між різними пристроями з використанням інструментів доповненої реальності, та відкривають нові можливості оптимізації бізнес-процесів компаній. Нині спостерігається втрата інтересу з боку реального бізнесу до поняття великих даних. На діаграмі Gartner його місце зайняли інші більш вузько спрямовані технології. Це, у першу чергу, машинне навчання (Machine Learning) – засоби пошуку правил і зв'язків у дуже великих обсягах інформації. Такі технології дають можливість не просто перевіряти гіпотези, але й шукати невідомі раніше фактори впливу. Також, крім машин-

ного навчання, це технології для зберігання даних і паралельного доступу до них (NoSQL Database), попередньої обробки потоків інформації (Marshalling); рішення для візуалізації та самостійного аналізу (Advanced Analytics with Self-Service Delivery). Крім того, зберігають своє значення засоби інтелектуального аналізу даних (Business Intelligence і Data Mining), що виходять на новий технологічний рівень. Отже, в літературі починають вживатися інші поняття, що, на думку фахівців, є більш влучними, наприклад Data Mining. Проте відмовитися від поняття Big Data вже неможливо, адже воно глибоко увійшло у життя. Цей процес змінив наше відношення до даних та інформації, а це, у свою чергу, вплинуло і на сутність поняття Big Data. Якщо спочатку Big Data розумілося як певний стик технологій, то нині, як влучно зазначають IT-фахівці, це скоріше особливий підхід – ідеологія процесінгу інформації, що застосовується для обробки великих масивів «сирих» даних [6]. На нашу думку, такий підхід найбільш влучно відображає сутність поняття Big Data на сучасному етапі розвитку. Проте

у майбутньому це поняття може зникнути як застаріле та неактуальне, адже великі обсяги даних і сучасні підходи до їхньої обробки можуть стати звичайними засобами, і не буде потреби робити наголос на їх інноваційній складовій.

Список літератури

1. Великі дані. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії. 2019. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Великі_дані (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
2. Гурвиц Дж., Ньюджент А., Халпер Ф., Кауфман М. Просто о больших данных. Москва: Эксмо, 2015. 400 с.
3. Кравчук С. Що таке Big Data? The Future. URL: <http://thefuture.news/bigdata> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
4. Найдич А. Big Data: проблема, технология, рынок. КомпьютерПресс. 01.2012. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=22725> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
5. Реймер Д. Gartner: Big Data больше не существует! URL: <http://denreymer.com/gartner-end-of-big-data> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
6. Савчук И. Big Data – технология, рождающая новый тип бизнеса. *БИТ*. 2014. № 3 (36). URL: <http://bit.samag.ru/archive/article/1352> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
7. Apache Hadoop. The Apache Software Foundation. URL: <http://hadoop.apache.org> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
8. Big Data. *Nature*. 2008. Vol. 455 (7209). P. 1–136. URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v455/n7209/index.html> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
9. BIG DATA 2016: Форум умных решений. Издательство «Открытые системы», 07.04.2016. URL: <https://www.osp.ru/news/articles/2016/14/13048945> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
10. Big Data Working Group. Cloud Security Alliance. URL: https://cloudsecurityalliance.org/working-groups/big-data/#_overview (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
11. Gartner says solving 'Big Data' challenge involves more than just managing volumes of data. Gartner, STAMFORD, Conn., June 27, 2011. URL: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1731916> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.

12. Hopkins B., Evelson B. Expand your digital horizon with Big Data. Forrester Research, Inc. Reproduction Prohibited, September 30, 2011, 16 p.
13. Hurwitz & Associates. URL: <https://hurwitz.com> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.
14. Smith D. Hype cycle for cloud computing. Gartner, 27 July 2011. URL: <https://www.gartner.com/doc/1753115/hype-cycle-cloud-computing-> (дата звернення: 11.03.2019). Назва з екрану.

References

1. Big Data (2019). Wikipedia – the free encyclopedia. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Великі_дані (accessed 11 March 2019).
2. Hurwitz, J., Nugent, A., Halper, F., Kaufman, M. (2015). *Big Data for Dummies*. Moscow: Eksmo, 400 p. [in Russian].
3. Kravchuk, S. Is this Big Data? The Future. URL: <http://thefuture.news/bigdata> (accessed 11 March 2019).
4. Naidych, A. (2012). Big Data: problem, technology, market. ComPress. E-journal URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=22725> (accessed 11 March 2019).
5. Reymer, D. Gartner: Big Data no longer exists! URL: <http://denreymer.com/gartner-end-of-big-data> (accessed 11 March 2019).
6. Savchuk, I. (2014). Big Data is a technology that creates a new type of business. *BIT*, No. 3 (36). URL: <http://bit.samag.ru/archive/article/1352> (accessed 11 March 2019).
7. Apache Hadoop. The Apache Software Foundation. URL: <http://hadoop.apache.org> (accessed 11 March 2019).
8. Big Data (2008). *Nature*, vol. 455 (7209), pp. 1–136. URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v455/n7209/index.html> (accessed 11 March 2019).
9. BIG DATA 2016: Smart Solutions Forum (2016). Open Systems, 07 April. URL: <https://www.osp.ru/news/articles/2016/14/13048945> (accessed 11 March 2019).
10. Big Data Working Group. Cloud Security Alliance. URL: https://cloudsecurityalliance.org/working-groups/big-data/#_overview (accessed 11 March 2019).
11. Gartner says solving 'Big Data' challenge involves more than just managing volumes of

- data (2011). Gartner, STAMFORD, Conn., 27 June. URL: <http://www.gartner.com/newroom/id/1731916> (accessed 11 March 2019).
12. Hopkins, B., Evelson, B. (2011). Expand your digital horizon with Big Data. Forrester Research, Inc. Reproduction Prohibited, 30 September, 16 p.
13. Hurwitz & Associates. URL: <https://hurwitz.com> (accessed 11 March 2019).
14. Smith, D. (2011). Hype cycle for cloud computing. Gartner, 27 July. URL: <https://www.gartner.com/doc/1753115/hype-cycle-cloud-computing-> (accessed 11 March 2019).

E. A. Kirey, Ph.D., associate professor

e-mail: kirey.kea@gmail.com, kateryna.kirey@chmnu.edu.ua

Petro Mohyla Black Sea National University
68 Desantnykiv str., 10, Mykolaiv, Ukraine

DEVELOPMENT AND TRANSFORMATION OF BIG DATA CONCEPT

The article discusses the development and transformation of Big Data concept (Big Data). This concept does not have a clear interpretation today. Theoretical research has shown that it is reasonable to consider its development in a historical context. Initially it has been considered that the data flow, bigger than 100 Gb a day, is, first of all, a criterion of reference to category Big Data. However, it has turned out that this is not enough to clearly categorize the product as Big Data. Subsequently as such a criterion qualitative signs, that is "a certain number of V": Volume – a significant increase in the amount of data in corporate systems; Variety – a variety of formats and structures of available data; Velocity – the speed of receiving and processing data to satisfy the request, etc., have been used. However, this approach does not fully disclose this concept, but deals with its individual aspects. In other studies, you can find the definition of this concept as the inability to process data in traditional ways. However, such a definition can already be considered obsolete, since experts no longer refer technologies for processing large volumes of data to the latest ones. Some experts suggest to abandon this concept altogether. However, due to its wide spread, this is not possible. The development of information technologies has changed our attitude to data and information, and this, in its turn, has influenced the essence of Big Data concept. Now this rather means a special approach – the ideology of processing large amounts of "raw" data. However, it is possible that in future this concept may disappear as outdated and irrelevant one, because large amounts of data and modern approaches to their processing may become common tools and there will be no need to focus on their innovative component.

Keywords: Big Data, information technologies.

В. С. Тіторенко, студент

Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна
e-mail: vadym.titorenko@gmail.com

КОМПЛЕКСНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЕМОЦІЙНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МЕТОДУ KANBAN В УПРАВЛІННІ ІТ-ПРОЕКТАМИ

У статті представлено дослідження на тему поліпшення використання методу Kanban за допомогою застосування рішень зі сфери емоційного інтелекту. Було проведено аналіз критичних ситуацій, які можуть виникати під час впровадження та роботи в умовах вищезазначеного методу. На основі цього було виявлено, що значна частина подій, що не сприяють позитивному розвитку проекту, настала саме через недостатній рівень якості спілкування між членами проектної команди. Тобто серед інших факторів саме комунікації мають один із найвищих рівнів впливу на проект. Надалі проводитиметься дослідження ефективності рішення щодо підвищення рівня емоційного інтелекту членів проектної команди, щоб визначити, яким має бути результат таких дій. Цей процес пропонується проводити у формі регулярних і нерегулярних групових занять, що має спричинити збільшення продуктивності команди.

Ключові слова: метод Kanban, емоційний інтелект, управління проектами, підвищення продуктивності роботи, управління командою.

Вступ. Основним ресурсом ІТ-проекту є люди, а саме проектна команда. Гнучкі методології управління проектною командою, до яких і відноситься Kanban, довели свою ефективність в сучасних умовах. Проте етапи їх впровадження та застосування є досить складними. Це обумовлюється тим, що для проектного менеджменту результативність проекту залежить від людського фактора, який виражається якістю взаємовідносин та взаєморозуміння проектної команди. Ці характеристики напряду пов'язані зі сферою емоційного інтелекту, застосування навичок якого позитивно вплине на ефективність роботи проектної команди в умовах методу Kanban.

Аналіз першоджерел. В сучасних умовах найбільша увага приділяється ефективності та швидкості виконання робіт. Для цих цілей у сфері проектного менеджменту одним із найважливіших інструментів є методології управління проектами. Це питання є дуже важливим, тому по ньому було проведено значну кількість досліджень. Іншою важливою сферою нашого часу є емоційний інтелект, розуміння принципів якого допомагає отримати навички для ефективного спілкування. Темі емоційного інтелекту також присвячено велику кількість досліджень. Оскільки управління проектами значною мірою включає налаштування взаємодії між членами проектної ко-

манди, тому для збільшення продуктивності потрібно, щоб їх спілкування та співпраця були ефективними. Тобто комплексне застосування проектного менеджменту та навичок зі сфери емоційного інтелекту має позитивно вплинути на проект.

Аналіз джерел дав наступні результати.

Робота [1] надає загальні відомості про управління проектами: завдання проектного менеджера, управління проектною командою, управління ризиками тощо.

У роботі [2] автор розглядає особливості гнучких методологій управління проектами, а саме: їх переваги, недоліки і специфіку впровадження та роботи відповідно до цих методологій.

Робота [4] досліджує підхід до поєднання гнучких методологій управління проектами, а саме: методів SCRUM та Kanban. Також описано типові критичні ситуації, які можуть виникнути у ході впровадження поєднаних методів.

Отже, роботи [1], [2], [4] є основним підґрунтям частини дослідження, яка напряду стосується управління проектами.

Робота [8] Деніела Гоулмана містить рекомендації щодо того, як навчитися використовувати навички зі сфери емоційного інтелекту у бізнесі. В іншій своїй роботі [10] автор описує важливість коефіцієнта емоційного інтеле-

кту, а також показує, що цей показник важливіший за інший, більш популярний, – коефіцієнт інтелекту (intelligence quotient, IQ).

Доктор психологічних наук І. М. Андрєєва у роботі [9] описує, які саме переваги отримують люди, що володіють високим рівнем емоційного інтелекту, та як отримати ці навички.

Можна підсумувати, що роботи [8], [9], [10] підкреслюють важливість розвитку емоційного інтелекту людини та можливість застосування цих умінь на роботі та у бізнесі.

Провівши аналіз джерел, було виявлено, що поєднання проектного менеджменту з використанням навичок зі сфери емоційного інтелекту не було запропоновано та описано раніше.

Метою статті є дослідження підвищення продуктивності проектною командою й ефективності ІТ-проекту в цілому шляхом комплексного застосування емоційного інтелекту та методу Kanban.

Виклад основного матеріалу. Головною задачею проектного менеджера відповідно до роботи [5] є організація робочого процесу таким чином, щоб виконати проект на високому якісному рівні та, наскільки це можливо, в зазначені терміни. Це можна трактувати таким чином:

1) результат роботи проектною командою повинен відповідати вимогам замовника;

2) витрати ресурсів мають бути оптимальними;

3) члени проектною команди повинні отримати винагороду, що відповідає якості та обсягам виконаної ними роботи.

Для досягнення таких результатів вже існують готові рішення, до яких відносять гнучкі методології управління ІТ-проектами [2]. Однак будь-який ІТ-проект має свої особливості, що стосуються як організаційної, так і технологічної складової проекту. Тому кожна проектна команда потребує свою, відмінну від інших, ефективну конфігурацію управління ІТ-проектом [4]. До того ж, для ІТ-проекту характерна велика кількість змін до специфікації, що можуть виникати навіть у ході виконання завдань проекту. Тобто реальною може бути така ситуація: замовник вирішить, що функціонал поточної версії розроблюваного продукту не повністю відповідає його вимогам і потрібно буде внести зміни у специфікацію проекту. Якщо дотримуватися рекомендацій методу Kanban, то варто прийняти ці

зміни і модифікувати продукт таким чином, щоб задовольнити вимоги замовника проекту. В ІТ-проектах внесення змін до специфікації на будь-якому з етапів розробки є досить частим явищем. Для того щоб зменшити частоту появи змін, потрібно, за можливості, запобігати появі таких сценаріїв:

1. Поставлену замовником задачу розуміють неправильно.

2. Недостатнє уявлення самого замовника про те, якою має бути реалізація тієї чи іншої функції.

3. Завдання взагалі неможливо виконати, але виявити це вдалося не відразу.

У цьому випадку представлений типовий сценарій, що описано в роботі [1]. Проектний менеджер має враховувати та передбачити подібні ризикові ситуації, а також вживати заходів щодо зменшення негативних наслідків.

Для полегшення розробки програмних продуктів використовують уже готові рішення. До таких рішень відносять традиційні моделі розробки програмних продуктів. На рис. 1 зображено каскадну модель (побудовану на основі роботи [6]); на рис. 2 зображено ітераційну модель (яка побудована на основі роботи [7]), що відзначаються гнучкістю та можливостями застосування.

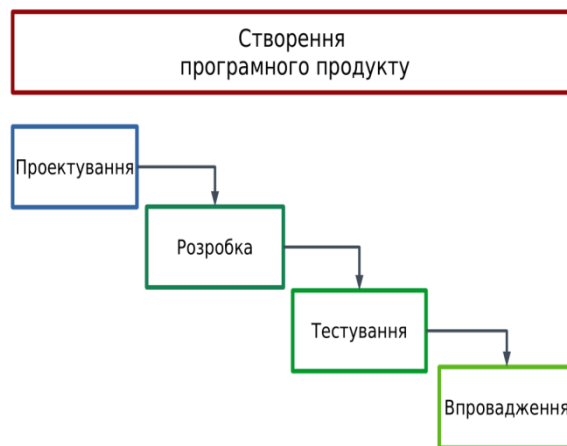


Рисунок 1 – Каскадна модель розробки

Каскадна модель розробки (також відома як cascade model чи waterfall model) не є новою і достатньо пристосованою до зміни вимог проекту, через це у більшості сучасних проектів ця модель не використовується.

Ітераційна модель розробки, в свою чергу, надає більше можливостей для оновлення проекту відповідно до зміни вимог. Також вона дає можливість демонструвати

замовнику прототипи програмного продукту, що дає змогу швидше визначити рівень відповідності поточної версії програмного продукту вимогам специфікації.

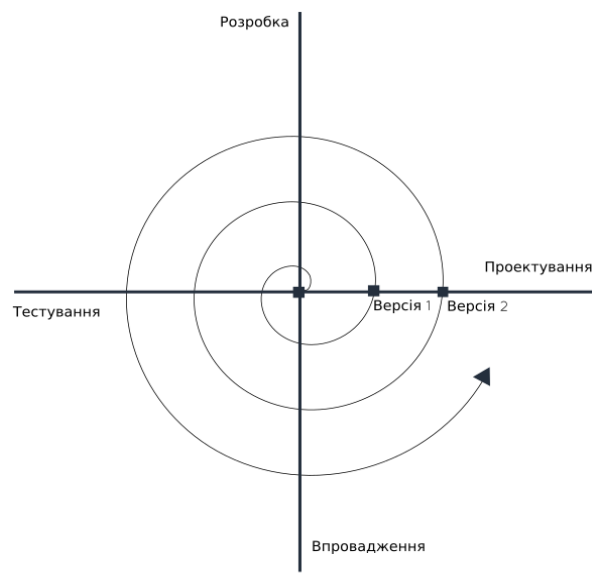


Рисунок 2 – Ітераційна модель розробки

Відповідно до рекомендацій гнучких методологій зміни можуть бути внесені на будь-якому з етапів розробки, на відміну від традиційних методологій, за якими всі завдання потрібно виконати згідно зі специфікацією, а всі зміни будуть обговорені після завершення робіт і прийняті до виконання. В останньому випадку існує висока ймовірність того, що проект має високий ризик не задовольнити замовника. Для виправлення помилок можна прийняти рішення щодо продовження термінів робіт, але тоді терміни виконання проекту будуть значно більшими за ті, що були обумовленими на початку розробки. Отже, в таких умовах гнучкі методології є ефективнішими.

Найбільш відомими представниками гнучких методологій є SCRUM та Kanban. SCRUM дає більше можливостей моніторингу та контролю за ходом виконання ІТ-проекту, що забезпечує достатній рівень стабільності. В свою чергу, Kanban надає членам проектною команди більше свободи та можливостей, які дають змогу проявити власні здібності та ініціативи, але в цих умовах процес контролю є складнішим.

Для проведення дослідження було обрано метод Kanban і простий академічний приклад ІТ-проекту.

Відповідно до обраного методу задачі між членами проектною команди поділяються наступним чином:

- кожен задачу повинен виконувати один із виконавців, який може її виконати швидше і якісніше за інших;
- значення завантаженості кожного з членів проектною команди має бути приблизно однаковим;
- завантаженість повинна бути оптимальною.

Одним із найважливіших елементів, що забезпечить збалансованість процесів у цьому методі, є Kanban-дошка [5]. Вона допомагає усім членам проектною команди бачити поточний стан виконання проекту, а також завдання, які потрібно буде зробити та виконані раніше. Цей інструмент використовується не тільки для візуалізації стану, але й для контролю.

Kanban-дошка дає можливість переглянути:

- поточний стан виконання проекту;
- всі доступні завдання;
- стан задач за допомогою категорій;
- завантаженість членів проектною команди;
- виконавців кожного завдання, якщо вони вже були призначені;
- відповідність кількості завдань до обмеження за їх максимальним значенням;
- затримки у виконанні завдань.

Взаємодія з Kanban-дошкою відбувається наступним чином. На початковому етапі проекту дошка містить колонки з назвами категорій (рис. 3). Найчастіше вони підписані стандартним способом:

- 1) потрібно виконати;
- 2) в розробці;
- 3) у тестуванні;
- 4) виконано.

Проте для різних галузей і різних проектних команд кількість колонок та їх значення можуть різнитися.

Задачі зазвичай відображаються у вигляді кольорових клейких стікерів. На рис. 3 вони позначені цифрами від одиниці до трьох і знаходяться в колонці «Виконати», тобто очікують виконання.

Успішність проекту залежить від оптимальної послідовності виконання задач проекту та їх своєчасного виконання.

Для виконання цих умов необхідно спочатку виконати пріоретизацію завдань і додати найважливіші з них у колонку «Виконати».

Далі потрібно поставити обмеження за максимальною кількістю робіт на всі колонки (окрім колонки «Виконано»). Якщо кількість завдань у колонці досягає значення максимальної кількості робіт, то нові завдання в цю колонку не додаються до того часу, поки хоча б одне завдання із вже прийнятих не буде виконано й перенесено в іншу колонку. Цей підхід використовується для того, щоб стимулювати швидше доробити вже прийняті завдання, замість того щоб витрачати час на виконання кількох робіт і, з великою ймовірністю, збільшити терміни виконання проекту чи навіть не завершити жодне з вибраних завдань.

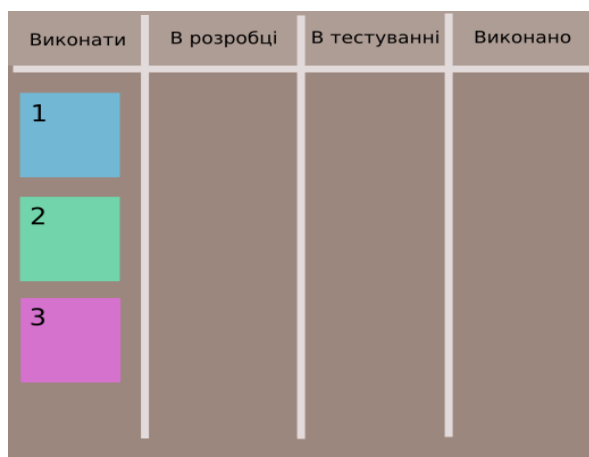


Рисунок 3 – Канбан-дошка на початковому етапі виконання проекту

Для наочності роботи Канбан-дошки далі буде продемонстровано варіант руху завдання 1 (рис. 4). Спочатку це завдання вноситься до списку робіт, які повинні бути виконаними (колонка «Виконати»). Потім розробник із проектної команди бере його на розробку і змінює стан цієї роботи на «В розробці», перемістивши стікер у відповідну колонку дошки. Після завершення виконання завдання його віддають на тестування і змінюють його стан на відповідний. Якщо функціонал не відповідає вимогам (тестування не пройдено), то його повертають на доопрацювання в розробку.

Після внесення змін цей функціонал знову тестують, і так доти, поки тестування не буде успішно складено. Як тільки це станеться, завдання 1 переноситься у колонку «Виконано» і вважається успішно завершеним. Всі інші роботи виконуються схожим чином.

Отже, Канбан-дошка – це ефективний інструмент, що наочно розкриває технологіч-

ну складову IT-проекту. Крім того, вона дає змогу заздалегідь помітити або передбачити критичні ситуації і за рахунок цього вчасно відреагувати та попередити негативні наслідки, що можуть бути в проекті.

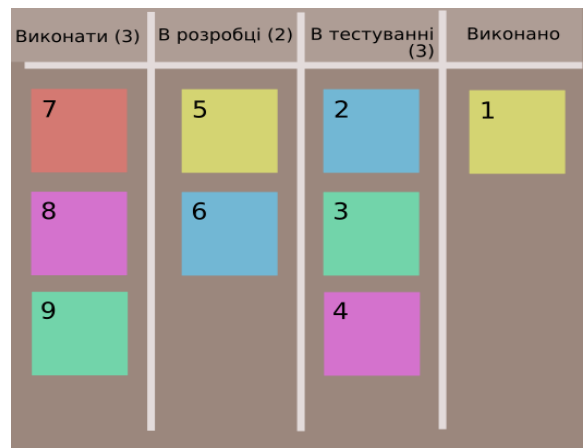


Рисунок 4 – Канбан-дошка на наступному етапі виконання проекту

Як уже було зазначено вище, метод Kanban є досить складним на етапі впровадження. Причина полягає у тому, що перед початком проекту необхідно правильно підібрати проектну команду, члени якої були б психологічно готові працювати у таких умовах. Вони мають бути готовими до того рівня довіри і свободи, який їм надається в рамках цього методу. Можливий також альтернативний варіант розвитку подій – команда вже сформована. В такому випадку проектному менеджеру необхідно приділити увагу їх підготовці.

Такі дії потрібні, тому що згідно з методом Kanban, базуючись на висловлюваннях роботи [4], в ході виконання проекту можуть виникати критичні ситуації, які потребують своєчасного і оптимального рішення. Для підтримки цього твердження можна навести уже зазначений приклад про появу неочікуваних змін з боку замовника. Члени проектної команди повинні бути готові до змін і сприймати їх як позитивне явище. Для проекту в цілому це є позитивним явищем, тому що виконання завдань з урахуванням цих змін приводить до того, що проект відповідає необхідному рівню якості. Якщо члени проектної команди не будуть підготовленими до обставин, то існує велика ймовірність, що вони отримають хибне уявлення про те, що цінність їх роботи була сумнівна, але здебільшого це не

так. Така ситуація може призвести до непорозуміння чи конфліктів або, за іншим перебігом подій, виконавці ніби й погодяться зі змінами у завданні, але несвідомо (можливо й свідомо) будуть виконувати завдання відповідно до його попередніх вимог.

Іншою критичною ситуацією для проекту може бути відстороненість від інших, одного чи декількох членів проектної команди. Може здатися, що важливість цієї ситуації перебільшена, але насправді вона несе досить велику загрозу як для поточного проекту, так і для майбутніх. Проблема полягає в тому, що такий працівник повною мірою не бере участь в обговореннях і через це він буде недостатньо обізнаним про деталі реалізації та перебіг виконання проекту, що може призвести до того, що виконане ним завдання не буде повною мірою відповідати вимогам. Також така відстороненість заважає створенню і підтриманню дружньої та відкритої атмосфери, яка є однією з основних причин успішності цього методу.

Також членам проектної команди необхідно пропонувати нові ролі, тим самим надаючи можливість отримання нового досвіду. Ця рекомендація методу Kanban дає можливість членам проектної команди ставати спеціалістами широкого профілю, які потрібні для забезпечення гнучкості ходу виконання проекту.

Тому, позитивний ефект командної роботи досягається за допомогою:

- 1) усвідомлення того, що робиться і для чого;
- 2) вміння комунікувати;
- 3) готовності до змін;
- 4) дружньої атмосфери.

Ці рішення походять зі сфери емоційного інтелекту. Подані переваги обрано згідно з роботою [9].

Емоційний інтелект – це множина навичок зі сфери психології, які дають можливість розуміти хід своїх думок, а також хід думок інших людей, що дозволяє зберігати спокій у випадках психологічного навантаження (наприклад стрес), а також вдосконалювати навички спілкування в цілому. Комплексне застосування методу Kanban і навичок емоційного інтелекту можна впроваджувати у формі групових занять, метою яких є підвищення рівня емоційного інтелекту. Участь у таких заняттях повинні брати всі члени проектної

команди, що забезпечить можливість отримання оптимальних результатів. Ці заняття потрібно проводити регулярно (наприклад 2–3 рази на тиждень), у ході їх проведення потрібно поєднувати теорію з конкретними прикладами, які безпосередньо стосуються проектної команди. Також варто проводити позачергові заняття для вирішення важливих поточних проблем, що стосуються сфери емоційного інтелекту.

Надалі, зважаючи на те, що Kanban згідно з роботою [4] рекомендує робити тільки те, що справді необхідно, у міру вдосконалення навичок проектної команди у сфері емоційного інтелекту варто зменшувати кількість регулярних занять. Потім має сенс рішення взагалі відмовитись від них, залишивши тільки позачергові заняття на вимогу членів проектної команди. Також було проведено прогнозування впливу цих занять на продуктивність роботи проектної команди. Такі заняття нададуть проектній команді більший рівень стійкості до стресових ситуацій, також будуть поліпшені навички спілкування. І це тільки основні переваги, які вже дають змогу не тільки працювати ефективніше, а й поліпшити в цілому якість життя, що знову ж таки позитивно впливає на продуктивність виконання робіт проекту членами проектної команди.

Впровадження занять по підвищенню рівня емоційного інтелекту є доцільним не тільки для методу Kanban. В умовах інших методологій приріст продуктивності також буде помітним. Наприклад, на основі робіт [3, 4] можна побачити, що методологія SCRUM має більш строгі обмеження, аніж Kanban. Ці обмеження призводять до психологічного тиску на членів проектної команди. Тобто потрібно посилити їхню стійкість до стресів, що напряму стосується сфери емоційного інтелекту, на підвищення рівня якого і націлені запропоновані заняття. Проте за рахунок наданого високого рівня свободи дій методу Kanban його поєднання з навичками емоційного інтелекту є найбільш ефективним і перспективним.

Висновок. Було проведено дослідження підвищення продуктивності проектної команди й ефективності ІТ-проекту в цілому шляхом комплексного застосування емоційного інтелекту та методу Kanban. Результати дослідження показують, що описане поєднання приведе до зростання продуктивності роботи

кожного окремого члена проектної команди, а для команди в цілому це дасть ще більш значні результати. Отже, описане вище комплексне застосування доцільно використати в управлінні IT-проектами. Також можна висунути припущення про те, що його можна частково застосувати і в інших галузях.

Список літератури

1. Руководство к своду знаний по управлению проектами. Atlanta: Project Management Institute, Inc., 2012. 792 с.
2. Стеллман Е., Грин Д. Постигаая Agile. Ценности, принципы, методологии. Санкт-Петербург: Манн, Иванов и Фербер, 2017. 480 с.
3. Schwaber K., Sutherland J. The definitive guide to Scrum: the rules of the game. Boston: Creative Commons, 2017. 19 p.
4. Книберг Х., Скарин М. SCRUM и Kanban: выжимаем максимум. Санкт-Петербург: C4Media, 2010. 78 с.
5. Мазур И. И., Шапиро В. Д., Ольдерогге Н. Г. Управление проектами: учеб. пособие. Москва: Омега-Л, 2004. 405 с.
6. What is SDLC waterfall model? URL: <https://www.softwaretestinghelp.com/what-is-sdlc-waterfall-model/>
7. SDLC models explained: agile, waterfall, V-shaped, iterative, spiral. URL: <https://existek.com/blog/sdlc-models/>
8. Гоулман Д. Эмоциональный интеллект в бизнесе. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 498 с.
9. Андреева И. Н. Азбука эмоционального интеллекта. Санкт-Петербург: БВХ Санкт-Петербург, 2012. 147 с.
10. Гоулман Д. Эмоциональный интеллект. Почему он может значить больше, чем IQ. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 544 с.

References

1. A guide to a knowledge management project (2012). Project Management Institute, Inc., 792 p. [in Russian].
2. Stellman, A., Green, D. (2017). Getting Agile. Values, principles, methodologies. St. Petersburg: Mann, Ivanov i Ferber, 480 p. [in Russian].
3. Schwaber, K., Sutherland, J. (2017). The definitive guide to Scrum: the rules of the game. Boston: Creative Commons, 19 p.
4. Kniberg, H., Skarin, M. (2010). SCRUM and Kanban: extract maximum. St. Petersburg: C4Media, 78 p. [in Russian].
5. Mazur, I. I., Shapiro, V. D., Olgerogge, N. H. (2004). Project management: tutorial. Moscow: Omega-L, 405 p. [in Russian].
6. What is SDLC waterfall model? URL: <https://www.softwaretestinghelp.com/what-is-sdlc-waterfall-model/>
7. SDLC models explained: agile, waterfall, V-shaped, iterative, spiral. URL: <https://existek.com/blog/sdlc-models/>
8. Goulman, D. (2013). Emotional intelligence in business. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 498 p. [in Russian].
9. Andreeva, I. N. (2012). ABC of emotional intelligence. St. Petersburg: BHV St. Petersburg, 147 p. [in Russian].
10. Goulman, D. (2013). Emotional intelligence. Why it might mean more than IQ. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 544 p. [in Russian].

V. S. Titorenko, student

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
vadym.titorenko@gmail.com

COMPLEX APPLICATION OF EMOTIONAL INTELLIGENCE AND KANBAN METHOD IN IT-PROJECT MANAGEMENT

The purpose of the article is to present an approach to improve the usage of Kanban method with the help of principles of emotional intelligence. An analysis of critical situations that may arise during the implementation and application of the above-mentioned method is conducted. Based on this

analysis, it is discovered that a significant part of the events that do not contribute to the positive development of the project are caused by the lack of understanding among the project team members. The communications themselves, among other factors, have one of the highest levels of influence on the project. Furthermore, the study of the effectiveness of the decisions to increase the level of emotional intelligence of the project team members in order to determine what the outcome of such actions should be will continue. This process is proposed to be conducted in the form of both regular and infrequent group activities, which, in turn, should lead to the increase in team productivity. This method can create positive psychological effect. The flexibility of the method is the reason of choice of Kanban as a base of this research. This feature provides opportunities for self-improvement of each project team member. The improvement of the level of emotional intelligence is chosen as a basis of self-improvement. The research is based on scientific articles on emotional intelligence, project management and Kanban method. Theoretical part of this research is affirmed by examples which describe common occurrences in project management. The prediction of potential results of those situations is also added. In conclusion the reasons of effectiveness of the combination of Kanban method with emotional intelligence skills is described.

Keywords: Kanban method, emotional intelligence, project management, increase of work productivity, team management.

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

¹Государственное предприятие «Киевский государственный
научно-исследовательский институт гидроприборов»

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БИМОРФНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Актуальность применения различных функциональных элементов пьезоэлектроники в силовых и информационных системах объясняется, прежде всего, их высокой надежностью, а также малыми габаритами и весом, что в значительной мере облегчает решение проблемы миниатюризации таких систем.

В работе рассмотрена конструкция и особенности математического описания биморфного пьезоэлектрического элемента, принцип действия которого основан на использовании осесимметричных колебаний поперечного изгиба. Получено решение задачи о возбуждении колебаний поперечного изгиба в биморфном пьезоэлектрическом элементе разностью электрических потенциалов, которую вырабатывает реальный генератор с выходным электрическим импедансом.

Ключевые слова: пьезоэлектрический диск, биморфный элемент, физические процессы, математическое описание.

Введение. Прежде чем обсуждать конструкцию и особенности математического описания биморфного пьезоэлектрического элемента, принцип действия которого основан на использовании осесимметричных колебаний поперечного изгиба, рассмотрим основные факты из теории поперечного изгиба круглых пластин.

В настоящем изложении будут рассматриваться тонкие круглые пластины, толщина которых на порядок меньше их диаметра. Кроме того, будем рассматривать такие частоты изменения знака напряженно-деформированного состояния пластины, на которых длина волны упругих возмущений (масштаб пространственной неоднородности напряженно-деформированного состояния) соизмерима с радиусом круглой пластинки и, соответственно, намного превышает её толщину. Это позволяет утверждать, что нормальные напряжения σ_{zz} практически не зависят от значений аксиальной координаты z .

В основе теории поперечного изгиба тонких пластин лежит так называемая гипотеза плоских поперечных сечений (гипотеза Кирхгофа [1]), суть которой заключается в следующем: *материальные точки пластины, которые до деформации располагались на прямой, перпендикулярной срединной поверхности пла-*

стины, после деформации вновь образуют прямую, нормальную деформированной срединной поверхности. Такое предположение о характере деформирования, так же как и гипотеза плоских поперечных сечений для изогнутого стержня, выражает тот факт, что угловыми деформациями поперечных сечений пластин и оболочек можно пренебречь в сравнении с их угловыми перемещениями. Это приемлемо в той мере, в какой толщина пластины мала по сравнению с двумя другими её размерами или, применительно к рассматриваемому случаю, по сравнению с радиусом внешнего контура пластины. Так же как и для балки, гипотеза плоских поперечных сечений для пластин игнорирует вдавливание сечений друг в друга, считая их пренебрежимо малыми.

Целью данной работы является решение задачи о возбуждении колебаний поперечного изгиба в биморфном пьезоэлектрическом элементе.

Обзор литературы. Существует множество публикаций, посвященных созданию и исследованию математических моделей пьезоэлектрических преобразователей. Начиная с монографии [2], основы расчета передаточных характеристик пьезоэлектрических преобразователей рассматривались, например, в работах [3–6].

Однако во многих работах описаны только процессы, происходящие в пьезоэлектрическом диске с поверхностью, полностью покрытой электродами. Существует также целый ряд работ разнородного характера, посвященных решению проблемы электромеханических колебаний пьезоэлементов с разделенными электродами (трансформаторного типа).

Работы, посвященные расчету параметров и характеристик пьезоэлектрических преобразователей, можно разделить на две группы. Первая группа включает работы, основанные на полевой (как в работе [7]) модели пьезокерамического диска, например [3, 4]. Вторая группа включает работы, основанные на использовании эквивалентных схем, например [5, 6]. Математические модели пьезоэлектрических преобразователей, построенные на основе анализа так называемых эквивалентных цепей, не учитывают тот очевидный факт, что движения материальных частиц пьезоэлектрического диска должны удовлетворять второму и третьему законам Ньютона. Игнорирование этой фундаментальной позиции выводит эти модели за пределы механики деформируемого твердого тела и, как следствие, гарантированно определяет их неадекватность реальным объектам и происходящим в них физическим процессам.

Поэтому актуальной задачей является разработка математической модели биморфного пьезоэлемента для информационно-измерительных систем.

Материалы и методы. Рассмотрим круглую пластину постоянной толщины $2h$, которая нагружена внешними силами, расположенными по поверхности $z = +h$ симметрично относительно оси Oz . Обозначим поверхностную плотность этих сил символом $\sigma_z^*(\rho, t)$ (рис. 1). Прогиб пластины в точке с текущей координатой ρ будем обозначать символом w , понимая при этом, что в общем случае это функция переменных ρ и t . Угол поворота нормали к срединной поверхности на рис. 1 обозначен символом ϑ . Функции w и ϑ связаны между собой очевидным соотношением $\tan \vartheta = -dw/d\rho$ как в случае статических прогибов, так и в общем случае изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния. При построении линейной теории пластин будем рассмат-

ривать только лишь малые прогибы. При этом, естественно, $\vartheta \ll 1$ и $\tan \vartheta \approx \vartheta$. По этой причине справедливо утверждение, что $\vartheta = -dw/d\rho$. Знак минус проставляется в соответствии с представленной на рис. 1 схемой деформирования пластины. Уменьшение прогиба, т. е. возрастание отрицательных значений w сопровождается увеличением угла поворота нормали ϑ в положительном направлении. Совокупность равноотстоящих от центра пластины нормалей образует цилиндрическую поверхность ($\rho = \text{const}, -h \leq z \leq h$), которая и является поворачивающимся поперечным сечением круглой пластины. Остается добавить, что знак, о котором шла выше речь, не является принципиальным и определяется договорным соглашением о направлении отсчета прогиба w .

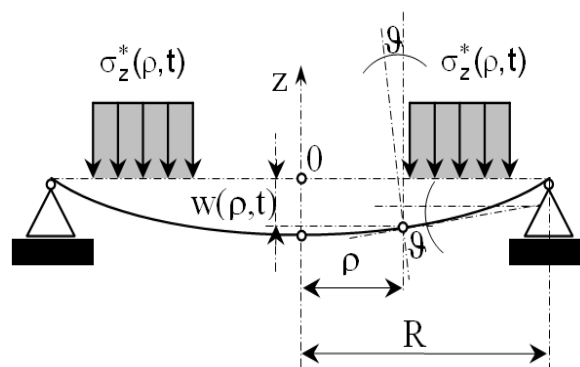


Рисунок 1 – Схема деформирования круглой пластины при осесимметричном нагружении внешними силами

Определим деформации, возникающие при осесимметричных прогибах круглых пластин.

Точки, расположенные на нормали A_1B_1 (рис. 2), после изгиба пластины образуют нормаль $A'_1B'_1$, повернутую на угол ϑ . Нормаль A_2B_2 поворачивается на угол $\vartheta + d\vartheta$. Направленный вдоль радиуса малый отрезок CD , имеющий до деформирования пластины длину $d\rho$ и расположенный на расстоянии z от срединной поверхности пластины, получит удлинение $\delta_\rho = z(\vartheta + d\vartheta) - z\vartheta = z d\vartheta$. Относительное удлинение этого отрезка в радиальном направлении, т. е. деформация, обозначается символом $\varepsilon_{\rho\rho}$. Её числовые значения рассчитываются по формуле $\varepsilon_{\rho\rho} = \delta_\rho/d\rho = z d\vartheta/d\rho$. Так как $\vartheta = -dw/d\rho$, то $\varepsilon_{\rho\rho} = -z d^2 w/d\rho^2$.

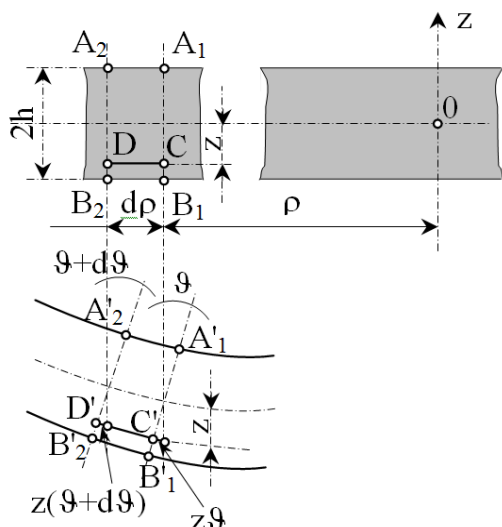


Рисунок 2 – К расчету деформации в радиальном направлении

Относительное удлинение в окружном направлении (символ $\varepsilon_{\varphi\varphi}$) может быть найдено из сравнения длины окружности до и после деформации пластины. До деформации длина окружности, проходящей, например, через точку С (рис. 2), равнялась, очевидно, $2\pi\rho$. После деформации пластины эта окружность должна содержать в себе точку С' и её длина становится равной $2\pi(\rho + z\vartheta)$. Изменение длины в окружном направлении $\delta_{\varphi} = 2\pi(\rho + z\vartheta) - 2\pi\rho = 2\pi z\vartheta$. Относительное изменение длины или деформация $\varepsilon_{\varphi\varphi} = \delta_{\varphi}/2\pi\rho = z\vartheta/\rho = -(z/\rho)(dw/d\rho)$.

Гипотеза плоских поперечных сечений, или, что то же самое, гипотеза Кирхгофа [1], применима только лишь в случае тонких пластин. При динамическом, изменяющемся во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$, напряженно-деформированном состоянии пластина считается тонкой в том случае, когда длина упругих возмущений в материале пластины, минимум, на порядок превосходит её толщину. При этом можно утверждать, что аксиальные, т. е. ориентированные вдоль координатной оси Oz напряжения и деформации практически не меняют своих значений по толщине пластины. Если поверхностную плотность равнодействующей внешних сил, которые прикладываются к нижней и верхней поверхности круглой пластины, обозначить символом $\sigma_z^*(\rho, t)$, то в случае тонкой пластины справедливо утверждение, что $\sigma_{zz}(\rho, z, t) = \sigma_z^*(\rho, t) \forall z \in [-h, h]$, где $\sigma_{zz}(\rho, z, t) -$

поверхностная плотность сил упругости, которые действуют внутри деформируемой пластины на площадках, перпендикулярны координатной оси и ориентированы вдоль направления той же оси. Таким образом, в объеме тонкой пластины реализуется напряженное состояние, при котором нормальные напряжения $\sigma_{\rho\rho}$ и $\sigma_{\varphi\varphi}$, действующие на площадках, перпендикулярных координатным линиям ρ и φ соответственно, не равны нулю, а напряжение $\sigma_{zz} = \sigma_z^*$ является постоянным во всем объеме деформируемой круглой пластины.

Запишем обобщенный закон Гука для изотропного твердого тела применительно к рассматриваемой ситуации:

$$\sigma_{\rho\rho} = (\lambda + 2G)\varepsilon_{\rho\rho} + \lambda\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda\varepsilon_{zz}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \lambda\varepsilon_{\rho\rho} + (\lambda + 2G)\varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda\varepsilon_{zz}, \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \lambda\varepsilon_{\rho\rho} + \lambda\varepsilon_{\varphi\varphi} + (\lambda + 2G)\varepsilon_{zz} = \sigma_z^*, \quad (3)$$

где λ и G – константы Ламе или модули упругости изотропного твердого тела; ε_{zz} – относительное изменение длины мысленно выделенного в объеме пластины малого отрезка, который до деформации был параллелен координатной оси Oz . Следует добавить, что деформирование упругого тела силами, которые ориентированы вдоль какого-либо направления, неизбежно сопровождается изменением его размеров в других направлениях, в частности – в направлениях, которые располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению действия сил, приложенных к твердому телу. Говоря другими словами, деформации $\varepsilon_{\rho\rho}$ и $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ в обязательном порядке порождают деформации ε_{zz} и наоборот.

Из соотношения (3) находим, что

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\lambda}{\lambda + 2G}(\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + \frac{\sigma_z^*}{\lambda + 2G}. \quad (4)$$

Исключая с помощью определения (4) аксиальный компонент тензора деформации ε_{zz} из соотношений (1) и (2), получаем следующий результат:

$$\sigma_{\rho\rho} = \frac{4G(\lambda + G)}{\lambda + 2G}\varepsilon_{\rho\rho} + \frac{2G\lambda}{\lambda + 2G}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \frac{\lambda}{\lambda + 2G}\sigma_z^*, \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{2G\lambda}{\lambda + 2G}\varepsilon_{\rho\rho} + \frac{4G(\lambda + G)}{\lambda + 2G}\varepsilon_{\varphi\varphi} + \frac{\lambda}{\lambda + 2G}\sigma_z^*. \quad (6)$$

Способность изотропного твердого тела деформироваться в направлениях, которые

располагаются в плоскости, перпендикулярной направлению действия внешних сил, количественно характеризуется с помощью коэффициента Пуассона ν . Можно доказать, что экспериментально определяемый коэффициент Пуассона в точности равен отношению модулей упругости, т. е.

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)}. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует, в частности, что коэффициент Пуассона принимает численные значения, которые не выходят за рамки замкнутого интервала чисел $[0, 0,5]$. Следует еще раз подчеркнуть, что термин «коэффициент Пуассона» применим исключительно к изотропным твердым телам. Применение его для описания упругих свойств анизотропных твердых тел, к которым, в частности, относится поляризованная пьезоэлектрическая керамика, является грубой ошибкой.

Используя определение (7) и равенство $E = 2G(1 + \nu)$, где E – модуль Юнга изотропного твердого тела, соотношения (5) и (6) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{\rho\rho} &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\rho + \nu\varepsilon_\varphi) + \frac{\nu\sigma_z^*}{1-\nu} = \\ &= -\frac{Ez}{1-\nu^2}\left(\frac{d^2w}{\rho^2} + \frac{\nu}{\rho}\frac{dw}{d\rho}\right) + \frac{\nu\sigma_z^*}{1-\nu}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi} &= \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_\rho) + \frac{\nu\sigma_z^*}{1-\nu} = \\ &= -\frac{Ez}{1-\nu^2}\left(\frac{1}{\rho}\frac{dw}{d\rho} + \nu\frac{d^2w}{\rho^2}\right) + \frac{\nu\sigma_z^*}{1-\nu}. \end{aligned} \quad (9)$$

Выделим мысленно из объема деформируемой пластины призматический элемент (рис. 3) высотой $2h$. Действующие на гранях этого элемента нормальные напряжения создают нормальные силы N_ρ и N_φ , которые возбуждают в круглой пластине осесимметричные радиальные колебания, и изгибающие моменты, которые обеспечивают существование осесимметричных колебаний поперечного изгиба. Обозначим линейную плотность моментов, существующих на гранях выделенного элемента, символами M_ρ и M_φ . По известным напряжениям $\sigma_{\rho\rho}$ и $\sigma_{\varphi\varphi}$ изгибающие моменты на гранях выделенного элемента определяются следующим образом:

$$M_\rho \rho d\varphi = \rho d\varphi \int_{-h}^{+h} z \sigma_\rho dz = -\rho d\varphi \frac{2Eh^3}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \right).$$

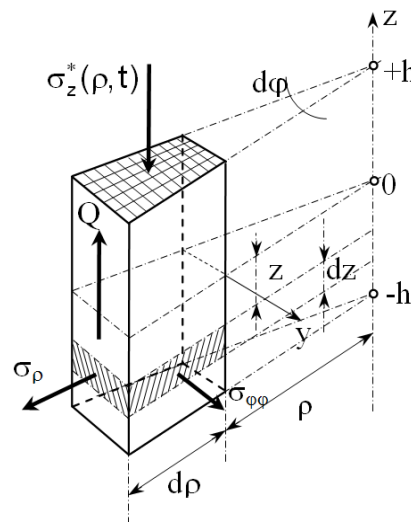


Рисунок 3 – К определению интегральных характеристик напряженного состояния круглой пластины при осесимметричном поперечном изгибе

При записи последнего выражения учтено, что

$$\frac{\nu\sigma_z^*}{1-\nu} \int_{-h}^h z dz = 0.$$

Линейная плотность M_ρ определяется выражением

$$M_\rho = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} \right), \quad (10)$$

где $D = \frac{2Eh^3}{3(1-\nu^2)}$ – изгибная жесткость пластины.

Рассуждая аналогичным образом, можно показать, что

$$M_\varphi = -D \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial w}{\partial \rho} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} \right). \quad (11)$$

Помимо нормальных напряжений, на площадках, перпендикулярных оси ρ , действуют касательные напряжения. Интегральной характеристикой этих напряжений является поперечная сила, линейная плотность которой обозначена на рис. 3 символом Q .

Для вычисления интегральной характеристики касательных напряжений рассмотрим сумму моментов сил, которые действуют на мысленно выделенный элемент пластины.

Эту сумму обозначим символом M_Σ и будем определять её относительно оси y (рис. 3), которая является касательной к дуге радиуса ρ в срединной плоскости пластины. Нелишнее напомнить, что момент сил является вектором, модуль которого равен произведению силы на плечо её приложения относительно выбранной оси. Направление вектора момента силы определяется нормалью $\vec{n}$ к плоскости, которую образуют векторы $\vec{r}$ (плечо приложения силы относительно выбранной оси) и $\vec{f}$ (вектор силы). При этом векторы $\vec{n}$, $\vec{r}$ и $\vec{f}$ образуют правостороннюю тройку, т. е. ближайший поворот вектора $\vec{r}$ к вектору $\vec{f}$ происходит против часовой стрелки, если за ним наблюдать с острия вектора $\vec{n}$ или, что тоже самое, с острия вектора $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{f}$. Сказанное иллюстрируется рис. 4, где показана ориентация вектора $d\vec{M} = \vec{r} \times d\vec{f}_p$, где $|\vec{r}| = z$, а величина модуля вектора силы указана на рисунке.

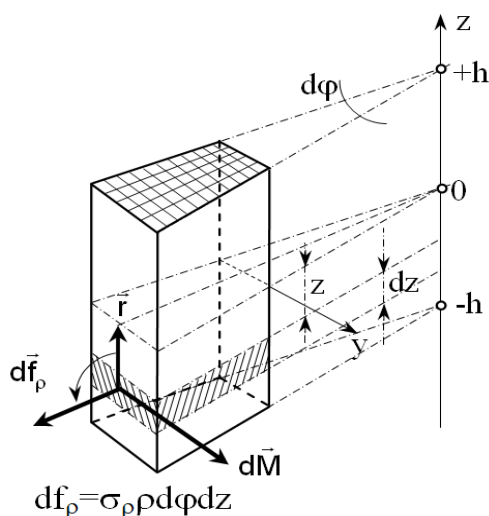


Рисунок 4 – К определению вектора момента силы

Принимая во внимание сказанное выше, можно построить векторную диаграмму моментов сил, которая показана на рис. 5. Очевидно, что искомая величина M_Σ будет равна алгебраической сумме проекций векторов моментов сил на ось y . Проектируя показанные на рис. 5 векторы на ось y , получаем

$$M_\Sigma = (M_p + dM_p)(\rho + d\rho)d\varphi + M(Q) - M_\varphi d\rho d\varphi - M(\sigma_z^*) - M_p \rho d\varphi. \quad (12)$$

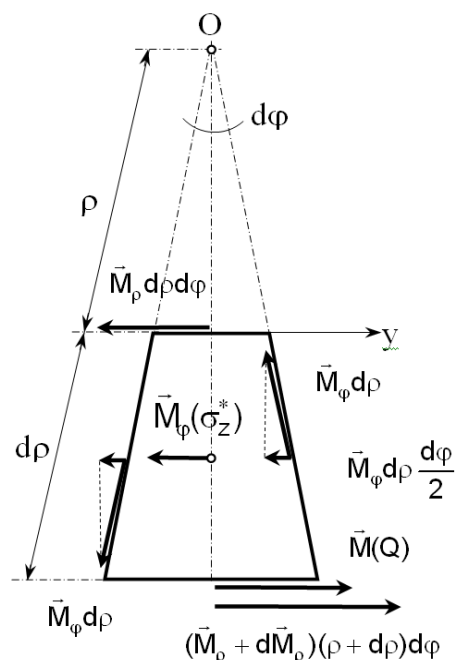


Рисунок 5 – Векторная диаграмма моментов сил

Так как момент поперечных сил $M(Q) = (Q + dQ)(\rho + d\rho)d\rho d\varphi$, а момент внешних нагрузок $M(\sigma_z^*) = \sigma_z^* \rho d\rho d\varphi / 2$, то выражение (12) можно представить в виде

$$M_\Sigma = \left[\frac{\partial(M_p \rho)}{\partial \rho} - M_\varphi + Q\rho \right] d\rho d\varphi + O^{(-2)} d\varphi, \quad (13)$$

где

$O^{(-2)} = dM_p d\rho - \sigma_z^* \rho d\rho (d\rho / 2) + dQ d\rho \cdot \rho + Q(d\rho)^2 + dQ(d\rho)^2$ – величина второго порядка малости по сравнению с первым слагаемым в формуле (13). Пренебрегая величинами порядка малости $(d\rho)^2$, запишем выражение (13) в виде

$$M_\Sigma \approx \left[\frac{\partial(M_p \rho)}{\partial \rho} - M_\varphi + Q\rho \right] d\rho d\varphi. \quad (14)$$

В соответствии с принципом Даламбера равнодействующая моментов внешних и внутренних сил M_Σ должна в любой момент времени уравниваться моментом силы инерции M_i массы выделенной призмы. Этот момент легко подсчитать, если воспользоваться диаграммой сил, показанной на рис. 6.

Действительно, элементарный момент силы δM_i относительно оси y определяется следующим образом:

$$\delta M_i = \delta F_i \xi = -\delta m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \xi = -2h\rho_0(\rho + \xi)d\varphi d\xi \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \xi.$$

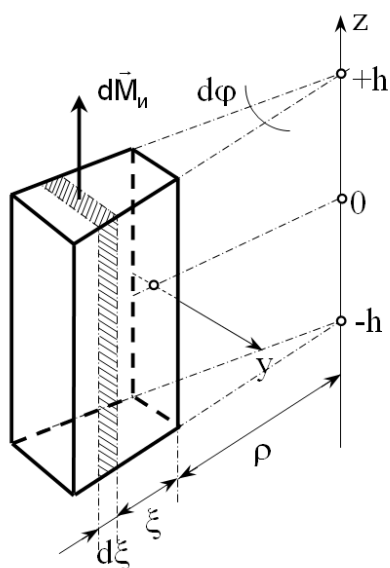


Рисунок 6 – К определению вектора момента силы инерции

Полный момент сил инерции мысленно выделенной из объема пластины призмы равен алгебраической сумме элементарных моментов δM_i и определяется формулой

$$\begin{aligned} dM_i &= \int_0^{d\phi} \delta M_i = -2h\rho_0 d\phi \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \int_0^{d\xi} (\rho\xi + \xi^2) d\xi = \\ &= -2h\rho_0 d\phi \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \left[\frac{1}{2} \rho(d\phi)^2 + \frac{1}{3} (d\phi)^3 \right]. \end{aligned}$$

Как видно из последней записи, момент сил инерции имеет порядок малости $(d\rho)^2$, и с точностью, равной точности предыдущих вычислений, можно полагать, что $\delta M_i \approx 0$. Отсюда следует, что $M_z = 0$, откуда и определяется линейная плотность поперечных сил

$$Q = \frac{1}{\rho} \left[M_\phi - \frac{\partial(M_\rho \rho)}{\partial \rho} \right]. \quad (15)$$

Определенный выражением (15) параметр Q является интегральной характеристикой касательных напряжений $\sigma_{\rho z}$.

Рассмотрим равновесие мысленно выделенного элемента круглой пластины (рис. 3). Потребуем, чтобы аксиальная проекция равнодействующей всех сил в любой момент времени уравнивалась силами инерции массы выделенного элемента пластины. На гранях, перпендикулярных радиальной оси, действуют поперечные силы, равнодействующая которых $R_Q = (Q + dQ)(\rho + d\rho)d\phi - Q\rho d\phi = d(Q\rho)d\phi + dQ\rho d\phi$. С точностью до бесконечно малых величин

второго порядка малости $R_Q \approx d(Q\rho)d\phi$. Равнодействующая внешних сил $R_\sigma = \sigma_z^* \rho d\rho d\phi$. Алгебраическая сумма внутренних и внешних сил в любой момент времени уравнивается силами инерции $F_i = -2h\rho_0 \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) d\rho d\phi$. Таким образом,

$$d(Q\rho) - \sigma_z^* \rho d\rho = -2h\rho_0 \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} d\rho,$$

откуда следует, что

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial(Q\rho)}{\partial \rho} - \sigma_z^* = -2h\rho_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (16)$$

Подставляя вместо произведения $Q\rho$ правую часть соотношения (16) и расписывая линейные плотности изгибающих моментов через прогибы w , после несложных алгебраических преобразований получаем следующий результат:

$$\nabla^4 w + \frac{2h\rho_0}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\sigma_z^*}{D}, \quad (17)$$

$$\text{где } \nabla^4 w = \frac{\partial^4 w}{\partial \rho^4} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial^3 w}{\partial \rho^3} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \frac{\partial w}{\partial \rho}.$$

В том случае, когда внешняя нагрузка σ_z^* не зависит от времени, в пластине реализуется статическое напряженно-деформированное состояние. Так как при этом $\partial w / \partial t = 0$, то уравнение движения элемента круглой пластины (17) приобретает смысл уравнения статического равновесия и записывается в виде

$$\nabla^4 w = \frac{\sigma_z^*}{D}$$

или

$$\frac{d}{d\rho} \left\{ \rho \frac{d}{d\rho} \left[\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dw}{d\rho} \right) \right] \right\} = \frac{\sigma_z^* \rho}{D}. \quad (18)$$

Уравнение (18) является обыкновенным дифференциальным уравнением четвертого порядка и решается последовательным интегрированием левой и правой части.

Уравнение движения (17) и уравнение равновесия (18) объединяет с уравнениями поперечного изгиба балки то, что в составе этих уравнений содержится производная четвертого порядка по координате. Это усложняет исследование напряженно-деформированного состояния, которое возникает при поперечном изгибе стержней и пластин и является своеобразной платой за упрощенное толкование (гипотеза плоских поперечных сечений)

процесса деформирования изгибаемых стержней и пластин.

Теперь рассмотрим конструкцию, которая показана на рис. 7, а.

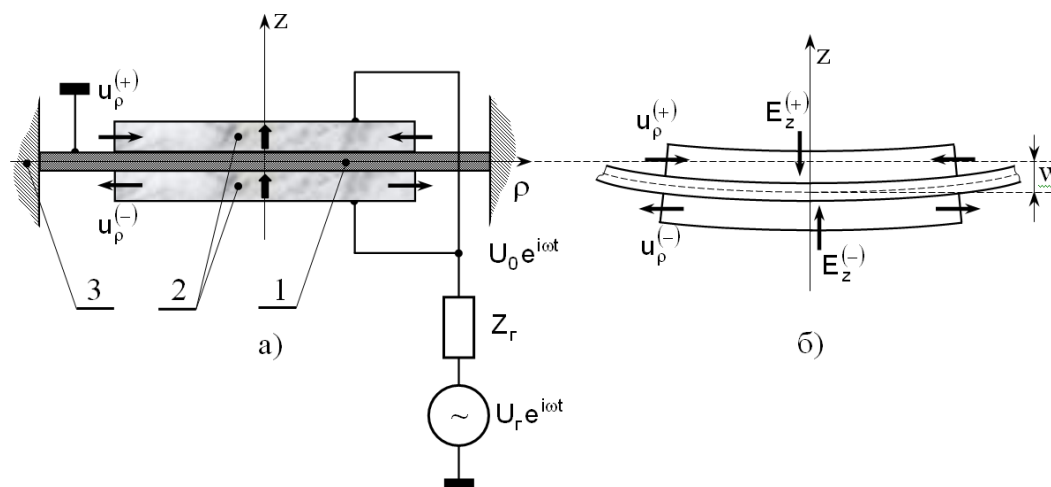


Рисунок 7 – Основные компоненты биморфного пьезоэлектрического элемента (а) и схема образования поперечного изгиба (б)

Позицией 1 на рис. 7, а обозначен металлический диск, толщина которого $2h$ существенно меньше его диаметра $2R$, т. е. выполняется сильное неравенство $h/R \ll 1$. По контуру $\rho = R$ металлический диск жестко закреплен на абсолютно неподвижной опоре (позиция 3). При этом элементы цилиндрической поверхности ($\rho = R$; $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; $-h \leq z \leq h$) (ρ , φ , z - координатные оси цилиндрической системы координат) не имеют возможности перемещаться вдоль координатных осей ρ , φ , z . К поверхностям $z = \pm h$ металлического диска прикреплены токопроводящим клеем два одинаковых электродированных пьезоэлектрических диска (позиция 2 на рис. 7, а). Электродированные поверхности пьезоэлектрических дисков, которые через тонкий слой токопроводящего клея находятся в электрическом контакте с металлической пластинкой, всегда имеют одинаковый, нулевой (рис. 7, а), электрический потенциал. Пьезоэлектрические диски приклеиваются к металлической пластине не произвольным образом, а так, чтобы направление электрической поляризации этих дисков, которое показано на рис. 7, а жирными стрелками, было одинаковым. Будем полагать, что эти направления совпадают с положительным направлением координатной оси z (рис. 7, а). В этом случае матрицы материальных констант верхнего и нижнего диска имеют одинаковую конструкцию и, что особенно важно, элементы матрицы пьезоэлектрических модулей верхнего и нижнего дисков имеют одинаковый знак.

Если на верхнюю и нижнюю электродированные поверхности пьезоэлектрических дисков подать разность электрических потенциалов так, как это показано на рис. 7, а, то физическое состояние каждого из дисков будет определяться соотношениями:

$$\sigma_{ij}^{(\pm)} = c_{ijkl}^E \varepsilon_{kl}^{(\pm)} - e_{kij} E_k^{(\pm)}, \quad (19)$$

$$D_m^{(\pm)} = e_{mij} \varepsilon_{ij}^{(\pm)} + \chi_{mn}^E E_n^{(\pm)}, \quad (20)$$

где знак плюс определяет физическое состояние верхнего пьезоэлектрического диска, а знак минус – нижнего; c_{ijkl}^E , e_{kij} , χ_{mn}^E – материальные константы – элементы матриц модулей упругости, пьезоэлектрических модулей и диэлектрических проницаемостей (см. соотношения; $\sigma_{ij}^{(\pm)}$, $\varepsilon_{kl}^{(\pm)}$, $E_k^{(\pm)}$ и $D_m^{(\pm)}$ – амплитудные значения изменяющихся во времени по закону $e^{i\omega t}$ компонентов тензоров упругих напряжений и деформаций и векторов напряженности электрического поля и электрической индукции соответственно).

Предположим, что в произвольно зафиксированный момент времени на электродированных поверхностях $z = \pm(\alpha + h)$, где α – толщина одинаковых по размерам пьезоэлектрических элементов, дисков имеется положительный электрический потенциал U_0 . Совершенно очевидно, что аксиальные компоненты $E_z^{(\pm)}$ вектора напряженности электрического поля в верхнем и нижнем дисках имеют противоположные направления, т. е.

$E_z^{(\pm)} = \mp E_z$ (рис. 7, б). Отсюда следует, что напряженно-деформированные состояния верхнего и нижнего диска в любой момент времени имеют противоположные знаки. Если диски приклеены к металлической пластине строго соосно, то напряженно-деформированное состояние пьезокерамических дисков и, как следствие, всей, показанной на рис. 7, а, конструкции обладает осевой симметрией. Это означает, что сдвиговые напряжения $\sigma_{\rho\phi}^{(\pm)}$ ($\beta = \rho, z$) и деформации $\varepsilon_{\phi\beta}^{(\pm)}$ равны нулю.

В области низких частот, когда масштаб пространственной неоднородности напряженно-деформированного состояния намного превышает толщину α пьезокерамических дисков, в этих дисках реализуется режим осесимметричных планарных колебаний. При этом радиальные смещения $u_\rho^{(\pm)}$ материальных частиц пьезокерамических дисков будут иметь противоположные направления (рис. 7). Это приводит к появлению изгибающих моментов M_ρ , которые заставляют всю конструкцию совершать осесимметричные колебаний поперечного изгиба. Источником этих колебаний является генератор разности электрических потенциалов. Естественно, что клеевое соединение привносит некоторые проскальзывания компонентов конструкции друг относительно друга. Вместе с тем можно утверждать, что при качественной склейке тонким слоем высокомолекулярного клея этими проскальзываниями можно пренебрегать в достаточно широком диапазоне частот, вплоть до частоты третьего электромеханического резонанса.

Показанную на рис. 7, а конструкцию принято называть биморфным пьезоэлектрическим элементом [8].

Биморфный пьезокерамический элемент совершенно естественно можно разделить на две части – активную зону ($0 \leq \rho \leq R_0$), где R_0 – радиус пьезокерамического диска, и пассивную зону – металлическое кольцо $R_0 \leq \rho \leq R$.

Движение материальных частиц пассивной зоны определяется дифференциальным уравнением (17). Фигурирующие в этом уравнении прогибы обозначим символом w_1 .

Для того чтобы построить уравнение гармонических колебаний материальных частиц активной зоны биморфного элемента,

рассмотрим интегральные характеристики напряженного состояния этой области.

Прежде всего, запишем выражения для расчета деформаций в активной зоне. Так как в ней реализуется осесимметричный поперечный изгиб, то осесимметричные деформации $\varepsilon_{\rho\rho}^{(\pm)}$ и $\varepsilon_{\phi\phi}^{(\pm)}$ должны определяться таким образом:

$$\varepsilon_{\rho\rho}^{(\pm)} = \varepsilon_{\rho\rho}(z) = -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2},$$

$$\varepsilon_{\phi\phi}^{(\pm)} = \varepsilon_{\phi\phi}(z) = -\frac{z}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho}, \quad (21)$$

где w_0 – зависящий от значений радиальной координаты ρ прогиб активной зоны биморфного пьезоэлектрического элемента.

В отсутствии сдвигающих напряжений $\sigma_{\phi\beta}^{(\pm)}$ обобщенный закон Гука (19) представляется следующими соотношениями:

$$\sigma_{\rho\rho}^{(\pm)} = -z \left(c_{11}^E \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{c_{12}^E}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + c_{12}^E \varepsilon_{zz}^{(\pm)} - e_{31} E_z^{(\pm)}, \quad (22)$$

$$\sigma_{\phi\phi}^{(\pm)} = -z \left(c_{12}^E \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{c_{11}^E}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + c_{12}^E \varepsilon_{zz}^{(\pm)} - e_{31} E_z^{(\pm)}, \quad (23)$$

$$\sigma_{zz}^{(\pm)} = -z c_{12}^E \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + c_{33}^E \varepsilon_{zz}^{(\pm)} - e_{33} E_z^{(\pm)}, \quad (24)$$

$$\sigma_{\rho z}^{(\pm)} = \sigma_{z\rho}^{(\pm)} = 2c_{55}^E \varepsilon_{\rho z}^{(\pm)} - e_{15} E_\rho^{(\pm)}, \quad (25)$$

где $E_\rho^{(\pm)}$ – радиальный компонент вектора напряженности электрического поля в верхнем (знак плюс) или нижнем (знак минус) пьезокерамическом диске.

Электрическое состояние пьезокерамических дисков определяется вектором электрической индукции $\vec{D}^{(\pm)}$, который задается двумя компонентами $D_\rho^{(\pm)}$ и $D_z^{(\pm)}$. Окружной компонент $D_\phi^{(\pm)} \equiv 0$ из-за осевой симметрии физического состояния пьезокерамических дисков. В соответствии с общей формулировкой (20) закона электрической поляризации диэлектрика с пьезоэлектрическими свойствами можем записать соотношения:

$$D_\rho^{(\pm)} = 2e_{15} \varepsilon_{\rho z}^{(\pm)} + \chi_{11}^E E_\rho^{(\pm)}, \quad (26)$$

$$D_z^{(\pm)} = -e_{31} z \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + e_{33} \varepsilon_{zz}^{(\pm)} + \chi_{33}^E E_z^{(\pm)}. \quad (27)$$

При записи соотношений (22) – (24) и (27) одинаковые по величине материальные

константы были обозначены, как это принято в механике деформируемого твердого тела, одинаковыми символами.

Как показано ранее, для тонких пьезо-керамических дисков в области низких частот справедливы приближенные оценки $(D_{\rho}^{(\pm)}, E_{\rho}^{(\pm)}) \cong 0 \forall (\rho, z) \in V$ и $(\sigma_{\rho z}^{(\pm)}, \varepsilon_{\rho z}^{(\pm)}) \cong 0 \forall (\rho, z) \in V$, где V – объем диска.

Если биморфный пьезоэлектрический элемент колеблется в вакууме или, что практически то же самое, в воздухе, то реакция окружающей среды $\sigma_{zz}^* = 0$, и соотношение (24) в области низких частот может быть записано в виде

$$-z c_{12}^E \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + c_{33}^E \varepsilon_{zz}^{(\pm)} - e_{33}^* E_z^{(\pm)} = 0,$$

откуда следует, что

$$\varepsilon_{zz}^{(\pm)} = \frac{e_{33}^*}{c_{33}^E} E_z^{(\pm)} + z \frac{c_{12}^E}{c_{33}^E} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right). \quad (28)$$

Исключая с помощью соотношения (28) аксиальную деформацию $\varepsilon_{zz}^{(\pm)}$ из выражений (22), (23) и (27), получаем следующие расчетные формулы:

$$\sigma_{\rho\rho}^{(\pm)} = -z \left(c_{11}^E \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{c_{12}^E}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) - e_{31}^* E_z^{(\pm)}, \quad (29)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{(\pm)} = -z \left(c_{12}^E \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{c_{11}^E}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) - e_{31}^* E_z^{(\pm)}, \quad (30)$$

$$D_z^{(\pm)} = -e_{31}^* z \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + \chi_{33}^{\sigma} E_z^{(\pm)}, \quad (31)$$

где $c_{11} = c_{11}^E - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$, $c_{12} = c_{12}^E - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$, $e_{31}^* = e_{31} - e_{33} c_{12}^E / c_{33}^E$, $\chi_{33}^{\sigma} = \chi_{33}^{\varepsilon} + e_{33}^2 / c_{33}^E$ – модули упругости, пьезоэлектрический модуль и диэлектрическая проницаемость для режима постоянства (равенства нулю) аксиального напряжения $\sigma_{zz}^{(\pm)}$, т. е. для режима планарных гармонических колебаний поляризованного по толщине тонкого пьезокерамического диска.

Из условия $\text{div} \vec{D}^{(\pm)} = 0$ (условия отсутствия электрической проводимости) следует, что в рассматриваемой ситуации должны выполняться условия $\partial D_z^{(\pm)} / \partial z = 0$. Это означает, что определенные выражениями (31) аксиальные компоненты $D_z^{(+)}$ и $D_z^{(-)}$ вектора электрической индукции не зависят от значений координаты z . Этим фактом можно воспользоваться при определении напряженности

электрического поля $E_z^{(\pm)}$. Поскольку возможно представление $E_z^{(\pm)} = -\partial \Phi^{(\pm)} / \partial z$ [9], где $\Phi^{(\pm)}$ – скалярный электрический потенциал в объеме верхнего и нижнего пьезоэлектрического диска, постольку будут справедливы следующие записи:

$$D_z^{(-)} = -e_{31}^* z \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) - \chi_{33}^{\sigma} \frac{\partial \Phi^{(-)}}{\partial z}, \quad (32)$$

$$D_z^{(+)} = -e_{31}^* z \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) - \chi_{33}^{\sigma} \frac{\partial \Phi^{(+)}}{\partial z}. \quad (33)$$

Соотношение (32) проинтегрируем по координате z в пределах от $-(\alpha + h)$ до $-h$, а соотношение (33) – в пределах от h до $\alpha + h$. Принимая во внимание, что $\partial D_z^{(\pm)} / \partial z = 0$, результаты интегрирования можно записать в виде

$$\alpha D_z^{(-)} = \alpha(h + \alpha/2) e_{31}^* \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + \chi_{33}^{\sigma} U_0,$$

$$\alpha D_z^{(+)} = -\alpha(h + \alpha/2) e_{31}^* \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) - \chi_{33}^{\sigma} U_0,$$

где U_0 – амплитудное значение электрического потенциала на электродированных поверхностях пьезокерамических дисков. Из последних записей следует, что

$$D_z^{(\pm)} = \mp (h + \alpha/2) e_{31}^* \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \mp \chi_{33}^{\sigma} \frac{U_0}{\alpha}. \quad (34)$$

Выражения (31) и (34) являются физически эквивалентными определениями одной и той же величины – аксиального компонента $D_z^{(\pm)}$ вектора электрической индукции. Приравняв правые части определений (31) и (34), получаем формулу для расчета напряженности $E_z^{(\pm)}$:

$$E_z^{(\pm)} = z \frac{e_{31}^*}{\chi_{33}^{\sigma}} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \mp \mp (h + \alpha/2) \frac{e_{31}^*}{\chi_{33}^{\sigma}} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \mp \frac{U_0}{\alpha}. \quad (35)$$

Подставляя выражение (35) в определения (29) и (30) нормальных напряжений, получаем следующие расчетные формулы:

$$\sigma_{\rho\rho}^{(\pm)} = -z c_{11}^D \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{k_D}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \pm \pm (h + \alpha/2) \frac{(e_{31}^*)^2}{\chi_{33}^{\sigma}} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \pm e_{31}^* \frac{U_0}{\alpha}, \quad (36)$$

$$\sigma_{\phi\phi}^{(\pm)} = -z c_{11}^D \left(k_D \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \pm \pm (h + \alpha/2) \frac{(e_{31}^*)^2}{\chi_{33}^\sigma} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) \pm e_{31}^* \frac{U_0}{\alpha}, \quad (37)$$

где $c_{11}^D = c_{11} + (e_{31}^*)^2 / \chi_{33}^\sigma$, $c_{12}^D = c_{12} + (e_{31}^*)^2 / \chi_{33}^\sigma$ – модули упругости, которые учитывают связность (согласное действие) сил упругости и сил Кулона в объеме деформируемой пьезо-керамики; $k_D = c_{12}^D / c_{11}^D$.

В металлическом слое $-h \leq z \leq h$ (рис. 7, а) активной зоны биморфного пьезо-электрического элемента нормальные напряжения $\sigma_{\rho\rho}^{(M)}$ и $\sigma_{\phi\phi}^{(M)}$ рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma_{\rho\rho}^{(M)} = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right), \quad (38)$$

$$\sigma_{\phi\phi}^{(M)} = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right), \quad (39)$$

где E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала металлического диска.

Следуя изложенной выше технологии вычисления изгибающих моментов (см. выражения (10) и (11)), можем записать, что линейная плотность M_ρ изгибающих моментов, которые создаются нормальными напряжениями $\sigma_{\rho\rho}^{(\pm)}$ и $\sigma_{\rho\rho}^{(M)}$, определяется формулой

$$M_\rho = \int_{-(\alpha+h)}^{(\alpha+h)} z \sigma_{\rho\rho}^{(i)} dz = \int_{-(\alpha+h)}^{-h} z \sigma_{\rho\rho}^{(-)} dz + \int_{-h}^h z \sigma_{\rho\rho}^{(M)} dz + + \int_h^{(\alpha+h)} z \sigma_{\rho\rho}^{(+)} dz = -D_1 \left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + M_0, \quad (40)$$

где $D_1 = D_{пз} - D_0 + D_M$; $D_2 = k_D D_{пз} - D_0 + \nu D_M$; $\eta = D_2 / D_1$; $D_{пз} = 2c_{11}^D [(\alpha+h)^3 - h^3] / 3$ – изгибная жесткость пьезокерамического диска в составе активной зоны биморфного элемента; $D_0 = 2\alpha(h + \alpha/2)(e_{31}^*)^2 / \chi_{33}^\sigma$ – составляющая изгибной жесткости, обусловленная связностью упругих и электрических полей в объеме пьезо-керамического диска; $D_M = 2Eh^3 / [3(1-\nu^2)]$ – изгибная жесткость металлического диска; $M_0 = 2(h + \alpha/2)e_{31}^* U_0$ – изгибающий момент, который создается источником изгибных колебаний, т. е. генератором разности электрических потенциалов.

Линейная плотность изгибающих моментов M_ϕ определяется аналогичным образом:

$$M_\phi = \int_{-(\alpha+h)}^{(\alpha+h)} z \sigma_{\phi\phi}^{(i)} dz = \int_{-(\alpha+h)}^{-h} z \sigma_{\phi\phi}^{(-)} dz + \int_{-h}^h z \sigma_{\phi\phi}^{(M)} dz + + \int_h^{(\alpha+h)} z \sigma_{\phi\phi}^{(+)} dz = -D_1 \left(\eta \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right) + M_0. \quad (41)$$

Линейная плотность Q поперечных сил в активной зоне биморфного пьезоэлектрического элемента находится по формуле (15). Подставляя в неё выражения (40) и (41), получаем расчетную формулу

$$Q = D_1 \left(\frac{\partial^3 w_0}{\partial \rho^3} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 w_0}{\partial \rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial w_0}{\partial \rho} \right). \quad (42)$$

Из условий динамического равновесия элемента объема активной зоны биморфного пьезоэлектрического элемента (см. вывод формулы (17)) следует уравнение гармонических колебаний материальных частиц активной зоны

$$\nabla^4 w_0 - \lambda_0^4 w_0 = 0, \quad (43)$$

где $\lambda_0 = \sqrt[4]{(2h\rho_M + 2\alpha\rho_{пз})\omega^2 / D_1}$ – волновое число гармонических колебаний поперечного изгиба активной зоны биморфного пьезоэлектрического элемента; ρ_M и $\rho_{пз}$ – плотность металлической пластины и пьезокерамики. При выводе уравнения (43) было учтено, что $\sigma_z^* = 0$.

Прогибы или аксиальные перемещения w_1 материальных частиц пассивной зоны, т. е. металлического кольца $R_0 \leq \rho \leq R$, биморфного пьезоэлектрического элемента являются решениями уравнения

$$\nabla^4 w_1 - \lambda_1^4 w_1 = 0, \quad (44)$$

где $\lambda_1 = \sqrt[4]{2h\rho_M \omega^2 / D_M}$ – волновое число гармонических колебаний материальных частиц металлического кольца.

Рассмотрим особенности совместного решения дифференциальных уравнений (43) и (44).

Поскольку активная зона биморфного пьезоэлектрического элемента содержит точку $\rho = 0$, постольку общим решением уравнения (43) является функция $w_0(\rho)$, которая определяется следующим образом:

$$w_0(\rho) = A_1 J_0(\lambda_0 \rho) + A_2 I_0(\lambda_0 \rho), \quad (45)$$

где A_1 и A_2 – подлежащие определению константы; $J_0(\lambda_0 \rho)$ и $I_0(\lambda_0 \rho)$ – функция Бесселя и модифицированная функция Бесселя нулевого порядка [10].

Общее решение уравнения (44) имеет вид

$$w_1(\rho) = A_3 J_0(\lambda_1 \rho) + A_4 N_0(\lambda_1 \rho) + A_5 I_0(\lambda_1 \rho) + A_6 K_0(\lambda_1 \rho), \quad (46)$$

где $A_3, \dots, A_6$ – подлежащие определению константы; $N_0(\lambda_0 \rho)$ и $K_0(\lambda_0 \rho)$ – функция Неймана и функция Макдональда нулевого порядка [10].

На условной границе $\rho = R_0$ раздела активной и пассивной зоны биморфного пьезоэлектрического элемента общие решения $w_0(\rho)$ и $w_1(\rho)$ должны обеспечивать непрерывность напряженно-деформированного состояния биморфного элемента. Это достигается путем сшивания на этой границе кинематических и динамических характеристик напряженно-деформированного состояния активной и пассивной зоны. Условия сшивания записываются следующим образом:

$$w_0(\rho)|_{\rho=R_0} = w_1(\rho)|_{\rho=R_0}, \quad (47)$$

$$\left. \frac{\partial w_0(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = \left. \frac{\partial w_1(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0}, \quad (48)$$

$$M_\rho(\rho)|_{\rho=R_0} = M_\rho^{(m)}(\rho)|_{\rho=R_0}, \quad (49)$$

$$Q(\rho)|_{\rho=R_0} = Q^{(m)}(\rho)|_{\rho=R_0}, \quad (50)$$

где $M_\rho^{(m)}(\rho)$ и $Q^{(m)}(\rho)$ – линейные плотности изгибающих моментов и поперечных сил в металлическом кольце пассивной зоны биморфного пьезокерамического элемента. Числовые значения этих величин рассчитываются по формулам

$$M_\rho^{(m)}(\rho) = -D_m \left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial \rho^2} + \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial w_1}{\partial \rho} \right),$$

$$Q^{(m)}(\rho) = D_m \left(\frac{\partial^3 w_1}{\partial \rho^3} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 w_1}{\partial \rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial w_1}{\partial \rho} \right). \quad (51)$$

После подстановки выражений (45) и (46) в условия сшивания решений (47) – (50) получаем неоднородную систему из четырех алгебраических уравнений, в которой содержится шесть неизвестных констант $A_1, \dots, A_6$. Недостающие два уравнения доставляют условия закрепления контура $\rho = R$. На практике наиболее просто реализуются три способа закрепления, а именно – жесткое (этот способ описан в комментариях к рис. 7, а), шарнирное и свободное закрепление.

При жестком закреплении положение материальных частиц, которые в своей совокупности образуют цилиндрическую поверхность $\rho = R$, является строго зафиксированным, что формально можно описать соотношениями:

$$w_1(\rho)|_{\rho=R} = 0, \quad (52)$$

$$\left. \frac{\partial w_1(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R} = 0. \quad (53)$$

При шарнирном закреплении материальные частицы цилиндрической поверхности $\rho = R$ не могут перемещаться вверх или вниз, но само сечение в целом может беспрепятственно поворачиваться относительно оси, которая проходит через нейтральную плоскость $z = 0$ металлической пластины. Сказанное выше формализуется следующим образом:

$$w_1(\rho)|_{\rho=R} = 0, \quad (54)$$

$$M_\rho^{(m)}(\rho)|_{\rho=R} = 0. \quad (55)$$

При свободном закреплении контур $\rho = R$ прикрепляется к практически невесомым эластичным опорам или нитям, которые не оказывают сопротивления движению элементов цилиндрической поверхности $\rho = R$. Поверхность $\rho = R$ может свободно перемещаться вверх или вниз и поворачиваться. Так как со стороны эластичных опор отсутствует какая-либо силовая реакция, то, очевидно, должны выполняться следующие условия:

$$M_\rho^{(m)}(\rho)|_{\rho=R} = 0, \quad (56)$$

$$Q^{(m)}(\rho)|_{\rho=R} = 0. \quad (57)$$

Условия (47) – (50) и условия закрепления контура $\rho = R$ формируют неоднородную систему из шести алгебраических уравнений, в которой содержится ровно шесть констант $A_1, \dots, A_6$. Очевидно, что такая система уравнений разрешается относительно искомых констант единственным способом. Эта система уравнений имеет вид

$$m_{jk} A_k = \delta_{j3} \frac{M_0}{D_1 \lambda_0^2}, \quad j, k = 1, \dots, 6, \quad (58)$$

где $m_{11} = J_0(\Omega_0)$; $\Omega_0 = \Omega \xi_0 / z_{10}$; $\Omega = \lambda_1 R$ – безразмерная частота; $\xi_0 = R_0 / R$; $z_{10} = \lambda_1 / \lambda_0$; $m_{12} = I_0(\Omega_0)$; $m_{13} = -J_0(\Omega_1)$; $\Omega_1 = \Omega \xi_0$;

$$\begin{aligned}
m_{14} &= -N_0(\Omega_1); \quad m_{15} = -I_0(\Omega_1); \quad m_{16} = -K_0(\Omega_1); \\
m_{21} &= -J_1(\Omega_0); \quad m_{22} = I_1(\Omega_0); \quad m_{23} = z_{10}J_1(\Omega_1); \\
m_{24} &= z_{10}N_1(\Omega_1); \quad m_{25} = -z_{10}I_1(\Omega_1); \\
m_{26} &= z_{10}K_1(\Omega_1); \\
m_{31} &= -[J_0(\Omega_0) - (1-\eta)J_1(\Omega_0)/\Omega_0]; \\
m_{32} &= [I_0(\Omega_0) - (1-\eta)I_1(\Omega_0)/\Omega_0]; \\
m_{33} &= \zeta_1 z_{10}[J_0(\Omega_1) - (1-\nu)J_1(\Omega_1)/\Omega_1]; \\
\zeta_1 &= D_m/D_1; \\
m_{34} &= \zeta_1 z_{10}[N_0(\Omega_1) - (1-\nu)N_1(\Omega_1)/\Omega_1]; \\
m_{35} &= -\zeta_1 z_{10}[I_0(\Omega_1) - (1-\nu)I_1(\Omega_1)/\Omega_1]; \\
m_{36} &= -\zeta_1 z_{10}[K_0(\Omega_1) - (1-\nu)K_1(\Omega_1)/\Omega_1]; \\
m_{41} &= J_1(\Omega_0); \quad m_{42} = I_1(\Omega_0); \quad m_{43} = -\zeta_1 z_{10}^2 J_1(\Omega_1); \\
m_{44} &= -\zeta_1 z_{10}^2 N_1(\Omega_1); \quad m_{45} = -\zeta_1 z_{10}^2 I_1(\Omega_1); \\
m_{46} &= \zeta_1 z_{10}^2 K_1(\Omega_1); \quad m_{51} = m_{52} = 0;
\end{aligned}$$

– жесткое закрепление

$$\begin{aligned}
m_{53} &= J_0(\Omega); \quad m_{54} = N_0(\Omega); \quad m_{55} = I_0(\Omega); \\
m_{56} &= K_0(\Omega); \quad m_{61} = m_{62} = 0; \quad m_{63} = -J_1(\Omega); \\
m_{64} &= -N_1(\Omega); \quad m_{65} = I_1(\Omega); \quad m_{66} = -K_1(\Omega);
\end{aligned}$$

– шарнирное закрепление

$$\begin{aligned}
\text{элементы пятой строки } m_{5k} \text{ имеют те же значения, что и при жестком закреплении;} \\
m_{61} = m_{62} = 0; \quad m_{63} = -[J_0(\Omega) - (1-\nu)J_1(\Omega)/\Omega]; \\
m_{64} = -[N_0(\Omega) - (1-\nu)N_1(\Omega)/\Omega]; \\
m_{65} = I_0(\Omega) - (1-\nu)I_1(\Omega)/\Omega; \\
m_{66} = K_0(\Omega) + (1-\nu)K_1(\Omega)/\Omega;
\end{aligned}$$

– свободное закрепление

$$\begin{aligned}
m_{51} = m_{52} = 0; \quad m_{53} = J_1(\Omega); \quad m_{54} = N_1(\Omega); \\
m_{55} = I_1(\Omega); \quad m_{56} = -K_1(\Omega); \text{ элементы шестой} \\
\text{строки } m_{6k} \text{ имеют те же значения, что и при} \\
\text{шарнирном закреплении; } \delta_{j3} - \text{символ Кронекера, равный единице при } j=3 \text{ и равный нулю для всех } j \neq 3. \text{ Правую часть третьего уравнения в системе уравнений (58) можно представить в следующем виде: } \\
M_0/(D_1 \lambda_0^2) = W_0 U_0, \text{ где } W_0 = 2(h + \alpha/2)/(D_1 \lambda_0^2) - \text{абсолютная чувствительность активной зоны биморфного пьезоэлектрического элемента (размерность – метр, деленный на вольт).}
\end{aligned}$$

Решение системы уравнений (58) можно представить в виде

$$A_k = (-1)^{k+3} W_0 U_0 \frac{\Delta_{3k}}{\Delta_0}, \quad k = 1, \dots, 6, \quad (59)$$

где Δ_{3k} – алгебраическое дополнение при неизвестном коэффициенте A_k – определитель матрицы размером 5×5 , которая полу-

чается из матрицы коэффициентов m_{jk} системы уравнений (58) путем вычеркивания третьей строки и k -го столбца; Δ_0 – определитель матрицы 6×6 составленной из коэффициентов m_{jk} системы уравнений (58).

Если на время предположить, что потери энергии в материалах элементов биморфного пьезоэлектрического элемента отсутствуют, то частотно зависимое изменение определителей Δ_0 , которые соответствуют жесткому ($\Delta_0^{(h)}$), шарнирному ($\Delta_0^{(sh)}$) и свободному ($\Delta_0^{(f)}$) закреплению контура $\rho = R$ металлического диска, определяется знакопеременными функциями, графики которых показаны на рис. 3, 5, 8. В процессе вычисления числовых значений определителей были использованы следующие материальные константы: металлическая (стальная) пластина: модуль Юнга $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$, плотность $\rho_m = 7800 \text{ кг/м}^3$, полутолщина пластинки $h = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, радиус $R = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; пьезокерамические (пьезокерамика типа ЦТС) диски: модули упругости $c_{11}^E = 110 \text{ ГПа}$, $c_{12}^E = 62 \text{ ГПа}$, $c_{33}^E = 100 \text{ ГПа}$, пьезоэлектрические модули $e_{31} = -9 \text{ Кл/м}^2$, $e_{33} = 18 \text{ Кл/м}^2$, диэлектрическая проницаемость $\chi_{33}^E = 1300 \chi_0$, диэлектрическая постоянная $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, плотность $\rho_{пз} = 7400 \text{ кг/м}^3$, толщина диска $\alpha = 10^{-3} \text{ м}$, радиус диска $R_0 = 15 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Очевидно, что манипулируя размерами пьезокерамических дисков (толщиной и радиусом), можно управлять числовыми значениями резонансных частот биморфного пьезоэлектрического элемента. Были определены числовые значения безразмерных частот $\Omega = \lambda_1 R$ первых трех резонансов для различных типов закрепления контура $\rho = R$ металлического диска. Символами r_0 и α_0 были обозначены безразмерные радиус и толщина пьезокерамических дисков, причем $r_0 = R_0/R$ и $\alpha_0 = \alpha/h$. В процессе вычислений были использованы материальные константы составляющих биморфного пьезоэлектрического элемента, которые указаны выше в комментарии к рис. 8. При этом безразмерной частоте $\Omega = 10$ соответствует циклическая частота $f = 9694 \text{ Гц}$.

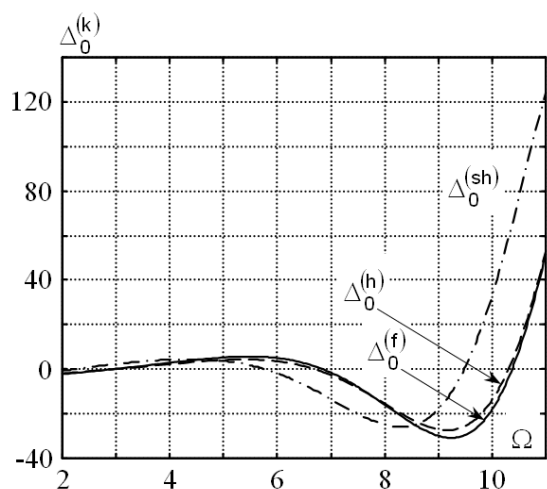


Рисунок 8 – Частотно зависимое изменение определителя системы уравнений (58)

Расчеты показали, что первые три безразмерные частоты резонансов биморфного элемента с жестким защемлением контура $\rho = R$ имеют наибольшие значения по сравнению с частотами резонансов, которые наблюдаются при свободном и шарнирном закреплении края металлической пластинки. Это можно объяснить тем, что интегральная жесткость конструкции биморфного элемента с жестким защемлением контура $\rho = R$ металлической пластинки является наибольшей по сравнению с общей (интегральной) жесткостью всей конструкции при других способах закрепления. Частота первого резонанса при жестком и шарнирном закреплении по мере увеличения параметра r_0 вначале уменьшается, а затем начинает возрастать. Это происходит потому, что при малых значениях r_0 жесткость биморфного элемента увеличивается меньшими темпами по сравнению с увеличением массы колеблющегося элемента. По достижению определенного значения параметра r_0 дальнейшее его увеличение сопровождается опережающим ростом жесткости биморфного пьезоэлектрического элемента. По мере увеличения толщины пьезокерамического диска (параметр α_0) эти зависимости проявляются все более отчетливо. Для второго и третьего резонансов наблюдаются по два (второй резонанс) и три (третий резонанс) интервала числовых значений параметра r_0 , на которых происходит уменьшение и увеличение числовых значений безразмерных частот резонансов. Это, скорее всего, можно объяснить инерционными эффектами на участках поверхности биморфного

элемента с противофазными движениями материальных частиц.

Для завершения математического описания биморфного пьезоэлектрического элемента необходимо определить потенциал U_0 на электродированных поверхностях пьезокерамических дисков (рис. 7), т. е. связать прогибы w в нейтральной плоскости с разностью электрических потенциалов U_r на выходе генератора электрических сигналов. Для этого необходимо определить электрический импеданс электромеханической колебательной системы, расчетная схема которой показана на рис. 7.

Из определения (34) аксиального компонента $D_z^{(\pm)}$ вектора электрической индукции следует, что электрические заряды $Q^{(\pm)}$ на электродированных поверхностях верхнего и нижнего пьезокерамического диска равны по абсолютной величине, но имеют противоположные знаки. Величины этих зарядов рассчитываются по формуле

$$Q^{(\pm)} = 2\pi \int_0^{R_0} \rho D_z^{(\pm)} d\rho = \mp \left[2\pi(h + \alpha/2)e_{31}^* R_0 \frac{\partial w_0(\rho)}{\partial \rho} \right]_{\rho=R_0} \mp C_0^\sigma U_0, \quad (60)$$

где $C_0^\sigma = \pi R_0^2 \chi_{33}^\sigma / \alpha$ – динамическая электрическая емкость пьезокерамического диска в составе биморфного пьезоэлектрического элемента.

Принимая во внимание определение (45) прогиба $w_0(\rho)$ нейтрального слоя в активной зоне биморфного элемента и общее решение (59) системы алгебраических уравнений (58), можно записать выражение

$$\left. \frac{\partial w_0(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = -\lambda_0 W_0 U_0 \left[\frac{\Delta_{31}}{\Delta_0} J_1(\lambda_0 R_0) + \frac{\Delta_{32}}{\Delta_0} I_1(\lambda_0 R_0) \right],$$

где λ_0 – волновое число изгибных колебаний в активной зоне биморфного элемента; $W_0 = 2(h + \alpha/2)e_{31}^* / (\lambda_0^2 D_1)$ – абсолютная чувствительность активной зоны.

Подставляя последнее выражение в формулу (60), получаем следующий результат:

$$Q^{(\pm)} = \pm C_0^\sigma U_0 [\Psi_0(\omega, \Pi) - 1], \quad (61)$$

где $\Psi_0(\omega, \Pi)$ – функция, которая зависит от частоты и набора параметров (символ Π) компонентов активной зоны биморфного пьезоэлектрического элемента. Числовые значе-

ния функции $\Psi_0(\omega, \Pi)$ рассчитываются по формуле

$$\Psi_0(\omega, \Pi) = 2K_{31}^2 \frac{c_{11}^E (h + \alpha/2)^2 \alpha}{\Delta_0 D_1} \times \\ \times \left[\Delta_{31} \frac{2J_1(\lambda_0 R_0)}{\lambda_0 R_0} + \Delta_{32} \frac{2I_1(\lambda_0 R_0)}{\lambda_0 R_0} \right],$$

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

Перепишем выражение (61) в виде

$$Q^{(\pm)} = C_0^\sigma U^{(\pm)} [\Psi_0(\omega, \Pi) - 1],$$

где $U^{(\pm)} = \pm U_0$.

Из последнего выражения следует, что амплитуды электрических токов, которые подтекают по проводникам к верхнему и нижнему пьезокерамическому диску, имеют следующие значения:

$$I^{(\pm)} = -i\omega C_0^\sigma U^{(\pm)} [\Psi_0(\omega, \Pi) - 1].$$

Электрический импеданс $Z_{пз}^{(\pm)}$ верхнего и нижнего дисков в составе биморфного пьезоэлектрического элемента определяется из закона Ома для участка электрической цепи следующим образом:

$$Z_{пз}^{(\pm)} = \frac{U^{(\pm)}}{I^{(\pm)}} = -\frac{1}{i\omega C_0^\sigma [\Psi_0(\omega, \Pi) - 1]} = Z_{пз}. \quad (62)$$

Совершенно очевидно, что равные по величине электрические импедансы $Z_{пз}^{(\pm)}$ включены параллельно. По этой причине электрический импеданс биморфного элемента $Z_{БЭ} = Z_{пз}^{(\pm)} / 2 = Z_{пз} / 2$.

Электрический потенциал U_0 при наличии конечного выходного сопротивления Z_r в источнике разности электрических потенциалов определяется, как обычно,

$$U_0 = \frac{U_r Z_{БЭ}}{Z_{БЭ} + Z_r} = \frac{U_r Z_{пз}}{Z_{пз} + 2Z_r}.$$

Подставляя в последнее выражение соотношение (62), получаем расчетную формулу

$$U_0 = \frac{U_r}{1 - 2i\omega C_0^\sigma Z_r [\Psi_0(\omega, \Pi) - 1]}. \quad (63)$$

Подставляя выражение (63) в общее решение (59), получаем окончательный вид выражения для расчета числовых значений коэффициентов A_k :

$$A_k = \frac{(-1)^{k+3} W_0 U_r \Delta_{3k}}{\{1 - 2i\omega C_0^\sigma Z_r [\Psi_0(\omega, \Pi) - 1]\} \Delta_0}. \quad (64)$$

Выражение (64) завершает решение задачи о возбуждении колебаний поперечного изгиба в биморфном пьезоэлектрическом элементе разностью электрических потенциалов, которую вырабатывает реальный генератор с выходным электрическим импедансом Z_r .

Выводы. Основной результат данной статьи можно зафиксировать следующим образом: рассмотрены конструкция и особенности математического описания биморфного пьезоэлектрического элемента, принцип действия которого основан на использовании осесимметричных колебаний поперечного изгиба; получено решение задачи о возбуждении колебаний поперечного изгиба в биморфном пьезоэлектрическом элементе разностью электрических потенциалов, которую вырабатывает реальный генератор с выходным электрическим импедансом.

Список литературы

1. Доннел Л. Г. Балки, пластины и оболочки. Москва: Наука, 1982. 568 с.
2. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические трансформаторы. Москва: Энергия, 1975. 112 с.
3. Богдан А. В., Петрищев О. Н., Якименко Ю. И., Яновская Ю. Ю. Исследование характеристик пьезоэлектрического трансформатора на основе радиальных колебаний в тонких пьезокерамических дисках. *Электроника и связь. Темат. вып. «Электроника и нанотехнологии»*. 2009. Ч. 1. С. 269–274.
4. Богдан А. В., Петрищев О. Н., Якименко Ю. И., Яновская Ю. Ю. Математическое моделирование колебаний тонких пьезокерамических дисков для создания функциональных элементов пьезоэлектроники. *Электроника и связь. Темат. вып. «Электроника и нанотехнологии»*. 2009. Ч. 2. С. 35–42.
5. Peerasaksophol M., Srilomsak S., Laoratanakul P., Kulworawanichpong T. Design and implementation of ring-dot piezo-electric ballasts for 36-W fluorescent lamps. *European Journal of Scientific Research*. 2011. Vol. 64, No. 2, pp. 189–205.
6. Livingston D., Kumar K. P., Venugopal N. Modelling and simulation of multiple piezo-

- electric transformer converters. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013. Vol. 3, No. 8. P. 237–245.
7. Петрищев О. Н., Базило К. В. Принципы математического моделирования трансформаторов, работающих на планарных осесимметричных колебаниях пьезокерамических дисков. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 3. С. 10–20.
 8. Sharapov V. Piezoceramic sensors. 2011. Springer. 500 p.
 9. Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость. Киев: Наукова думка, 1989. 280 с.
 10. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. Москва: Наука, 1979. 832 с.
 4. Bogdan, A. V., Petrishchev, O. N., Yakimenko, Yu. I., Yanovskaya, Yu. Yu. (2009). Mathematical modeling of vibrations of thin piezoceramic disks to create functional piezoelectronics elements. *Elektronika i svyaz. Themat. iss. "Elektronika i nanotekhnologiyi"*, P. 2, pp. 35–42 [in Russian].
 5. Peerasaksophol, M., Srilomsak, S., Laoratanakul, P., Kulworawanichpong, T. (2011). Design and implementation of ring-dot piezoelectric ballasts for 36-W fluorescent lamps. *European Journal of Scientific Research*, vol. 64, No. 2, pp. 189–205.
 6. Livingston, D., Kumar, K. P., Venugopal, N. (2013). Modelling and simulation of multiple piezo-electric transformer converters. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, No. 8, pp. 237–245.
 7. Petrishchev, O. N., Bazilo, C. V. (2015). Principles of mathematical modeling of transformers that operate on planar axisymmetric vibrations of piezoceramic disks. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnolohichnogo universytetu. Seria: Tehnichni nauky*, vol. 3, pp. 10–20 [in Russian].
 8. Sharapov, V. (2011). Piezoceramic sensors. Springer, 500 p.
 9. Grinchenko, V. T., Ulitko, A. F., Shulga, N. A. (1989). Mechanics of related fields in structural elements, vol. 5. Electroelasticity. Kiev: Naukova dumka, 280 p. [in Russian].
 10. Handbook on mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables (1979). In: M. Abramowitz and I. Stegun (eds). Moscow: Nauka, 832 p. [in Russian].

References

O. N. Petrishchev¹, Dr.Sc. (Eng.), professor,
C. V. Bazilo², Ph.D. (Eng.), associate professor
¹Kyiv Scientific Research Institute of Hydrodevices
²Cherkasy State Technological University
 Shevchenko blvd, 460, Cherkassy, 18006, Ukraine

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF BIMORPH PIEZOELECTRIC ELEMENT

The relevance of the use of various functional elements of piezoelectronics in power and informational systems is explained, first of all, by their high reliability, as well as small dimensions and weight, which greatly facilitates the solution of the problem of miniaturization of such systems. The technologies and devices that use the direct and / or reverse piezoelectric effect in the principles of their work are promising.

The purpose of this article is to solve the problem of the excitation of transverse bending oscillations in bimorph piezoelectric element.

With the help of a personal computer, it is possible to work out several combinations of geometrical, physical and mechanical parameters of a specific design of piezoelectric transformer within a few hours, and to find a combination of them that ensures the implementation of the specified parameters of the device. Manipulating geometrical parameters of electrodes and their location relative to each other, one can have a significant effect on the energy of oscillatory motion particular type of material particles of piezoelectric disk volume. This allows to reduce the number of experiments that are inevitably performed in the process of developing new devices. In addition, using a mathematical model, the sensitivity of piezoelectric transformer characteristics to variations in the parameters of its design elements is easily determined. Having these dependencies, it is possible to make a rational choice of the technology for manufacturing a product, that is, to choose from a number of technologies the least expensive one. Thus, a qualitative mathematical model can significantly reduce the time and cost of developing new models of piezoelectric transformers.

The main result of this article can be fixed as follows: the construction and features of mathematical description of bimorph piezoelectric element, the operating principle of which is based on the use of axisymmetric transverse bending oscillations, are considered. The solution of the problem of transverse bending oscillations excitation in bimorph piezoelectric element by the difference of electric potentials is obtained.

Keywords: piezoelectric disk, bimorph element, physical processes, mathematical description.

О. М. Петришев¹, *д.т.н., професор,*

К. В. Базіло², *к.т.н., доцент*

¹Державне підприємство «Київський державний
науково-дослідний інститут гідропрладів»

²Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС БІМОРФНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

Актуальність застосування різних функціональних елементів п'єзоелектроніки в силових та інформаційних системах пояснюється, перш за все, їх високою надійністю, а також малими габаритами і вагою, що значною мірою полегшує вирішення проблеми мініатюризації таких систем.

Основною метою статті є рішення задачі про порушення коливань поперечного вигину в біморфному п'єзоелектричному елементі.

Нині існує потреба у створенні цілісної методики побудови математичного опису пристроїв п'єзоелектроніки, який міг би використовуватися як теоретична основа розрахунку їх характеристик і параметрів.

Основний результат статті можна зафіксувати в такий спосіб: розглянуто конструкцію і особливості математичного опису біморфного п'єзоелектричного елемента, принцип дії якого базується на використанні вісесиметричних коливань поперечного вигину. Отримано рішення задачі про порушення коливань поперечного вигину в біморфному п'єзоелектричному елементі різницею електричних потенціалів, яку виробляє реальний генератор з вихідним електричним опором. Розглянуто три способи закріплення п'єзоелектричного біморфного елемента, що найбільш легко можуть бути реалізовані на практиці, а саме – жорстке, шарнірне і вільне закріплення.

Ключові слова: п'єзоелектричний диск, біморфний елемент, фізичні процеси, математичний опис.

А. К. Сандлер, доцент, доцент кафедри теорії автоматичного управління
та обчислювальної техніки,
e-mail: albertsand4@gmail.com

О. Ю. Карпілов, старший викладач кафедри теорії автоматичного управління
та обчислювальної техніки
e-mail: kau.onma@gmail.com

Національний університет «Одеська морська академія»
вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ВАГИ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПОРОМІВ

Підвищення вимог до безпеки судноплавства та морських поромних перевезень потребує постійного моніторингу процесів завантаження потягів на борт спеціалізованих суден. International Maritime Organization вважає найбільш доцільним запобігти аварійним ситуаціям з морськими суднами, які є наслідком втрати суднами остійності. За результатами досліджень ІМО, чисельні аварії з поромами були спричинені саме тим, що неправильно була зазначена вага. Зважування всіх потягів, які транспортуються морськими поромами, стане в найближчому майбутньому реальністю для компаній-операторів вантажних перевезень.

Для пошуку шляхів поліпшення ситуації з вагоконтрольними операціями на морських поромах було проаналізовано конструкції найпоширеніших типів вагометричних пристроїв.

Передбачається, що конструктивне виконання на основі волоконно-оптичних і механічних елементів має забезпечити вимірювальному пристрою: відсутність додаткових заходів щодо захисту поверхні ваговимірювального датчика в умовах динамічних деформацій корпусу судна при завантаженні; можливість компенсації коливань температури зовнішнього середовища; збереженість надійності, чутливості та простоти схемотехнічних рішень пристроїв відомих типів.

Було розроблено схемотехнічне рішення ваговимірювального пристрою, спрямоване на подальше вдосконалення процесу автоматизації вагоконтрольних операцій. Запропонований судовий ваговимірювальний пристрій відрізняється тим, що ваговимірювальний датчик, який являє собою циліндричний герметичний корпус з інвару з заглушками, в якому містяться компенсаційна та вимірювальна волоконно-оптичні катушки, розташований у штатному свердленні залізничної рейки.

Застосування запропонованої системи зважування, крім того, дасть змогу підвищити рівень автоматизації процесу вимірювання та контролю ваги, дисципліну вантажних перевезень, ефективність технологічних вагоконтрольних процесів і безпеку морського судноплавства в цілому.

Ключові слова: контроль ваги, пором, потяг.

Вступ. Зважування всіх потягів, які транспортуються морськими поромами, стане в найближчому майбутньому реальністю для компаній-операторів вантажних перевезень. Яке ж підґрунтя для впровадження правил щодо зважування потягів вимагає International Maritime Organization (ІМО)? ІМО, по-перше, вважає найбільш доцільним запобігти аварійним ситуаціям з морськими суднами, які є наслідком втрати суднами остійності. За результатами досліджень ІМО, численні аварії з поромами були спричинені саме тим, що була неправильно вказана вага. Таким чином, в ІМО були всі підстави обговорити нові пра-

вила зважування та запровадити їх як обов'язкові.

Як приклад доцільно розглянути результати двох багатофакторних досліджень. Головне дослідження було проведено університетом Jadehochschule в 2012 та 2013 рр. Зважувались (випадкова вибірка) понад 6500 контейнерів на Одеському контейнерному терміналі. Отримано такі результати:

1) середнє відхилення за вагою становило 3,8 %;

2) 15 % контейнерів відрізнялися за вагою в той чи інший бік на 1 т;

3) 0,5 % контейнерів відрізнялися за вагою більш ніж на 10 т.

Інше дослідження було проведено у 2010 р. World Shipping Council та International Chamber of Shipping. Результати цього дослідження продемонстрували, що загальна вага вантажу на борту судна практично регулярно перевищує заявлену на 3–7 %, а в деяких особливо небезпечних випадках навіть на 10 % [1, 2, 3]. Таким чином, є підстави вважати, що аналогічна ситуація існує при транспортуванні залізничних потягів на морських поромках [1, 2, 3, 4].

Для пошуку шляхів поліпшення ситуації з вагоконтрольними операціями на морських поромках було проаналізовано конструкції найпоширеніших типів вагометричних пристроїв.

Відомим є пристрій, що включає ваговий термінал та встановлений у міжрейковому просторі замість однієї шпали ваговимірювальний вузол, який складається з опори зі стояком, тензометричного датчика з циліндричним роликом та подвійної балки з консольними стрижнями (рис. 1) [5].

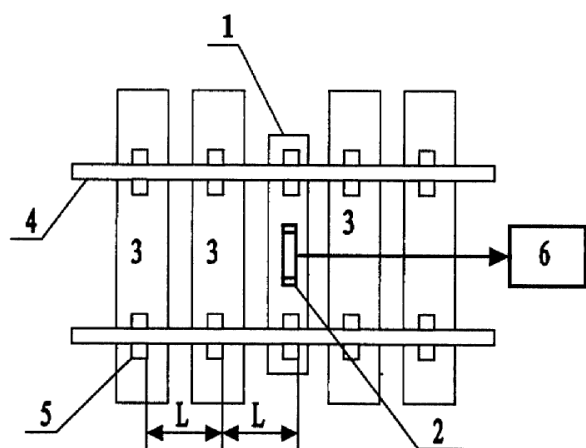


Рисунок 1 – Вагометричний пристрій:

1 – балка; 2 – тензодатчики типу «подвійна балка», змонтовані з інтервалом L ; 3 – шпала; 4 – рейка; 5 – підкладка; 6 – ваговий термінал

Недоліки пристрою, які обумовлені застосуванням тензометричного датчика з циліндричним роликом та подвійної балки з консольними стрижнями:

- надвелика похибка вимірювання ваги на кожен вісь при нерівномірному розподіленні вантажу відносно поперечної осі вагона;
- необхідність постійного захисту і підтримання геометрії ваговимірювального вузла

в умовах впливу кліматичних та експлуатаційних факторів;

- складність заміни пошкоджених ваговимірювальних вузлів у суднових умовах.

Меншою мірою експлуатаційні та конструктивні фактори впливають на характеристики пристрою, що містить опору, ваговимірювальний тензометричний датчик, вагоприймальну платформу і ваговий термінал (рис. 2) [6].

Недоліки пристрою, що обумовлені розташуванням тензометричного ваговимірювального датчика між рейкою та опорою:

- необхідність вживання додаткових заходів щодо захисту поверхні ваговимірювального датчика в умовах динамічних деформацій корпусу судна при завантаженні;
- неможливість урахування впливу кліматичних та експлуатаційних факторів на результати вимірювання.

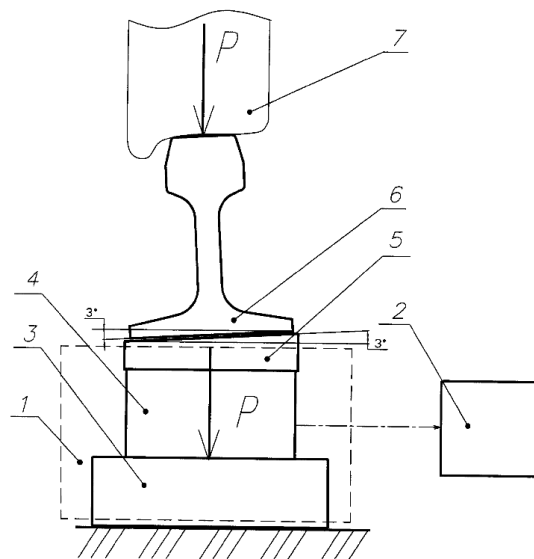


Рисунок 2 – Ваговимірювальний пристрій:

1 – ваговимірювальний вузол; 2 – ваговий термінал; 3 – опора; 4 – ваговимірювальний тензометричний датчик; 6 – рейка; 7 – колесо

Метою статті є подальше вдосконалення процесу автоматизації вагоконтрольних операцій шляхом розробки нового схематичного рішення вагометричного пристрою. Розробка та впровадження таких пристроїв у вагоконтрольні комплекси морських поромів дасть можливість запобігати перевантаженню суден, що, безумовно, буде сприяти підвищенню безпеки морських перевезень.

Основна частина. Передбачалося, що конструктивне виконання на основі волокон-

но-оптичних і механічних елементів має забезпечити вимірювальному пристрою:

- відсутність додаткових заходів щодо захисту поверхні ваговимірювального датчика в умовах динамічних деформацій корпусу судна при завантаженні;
- можливість компенсації коливань температури зовнішнього середовища;
- збереженість надійності, чутливості та простоти схемотехнічних рішень пристроїв відомих типів.

Суть запропонованого схемотехнічного рішення пояснюється кресленням (рис. 3).

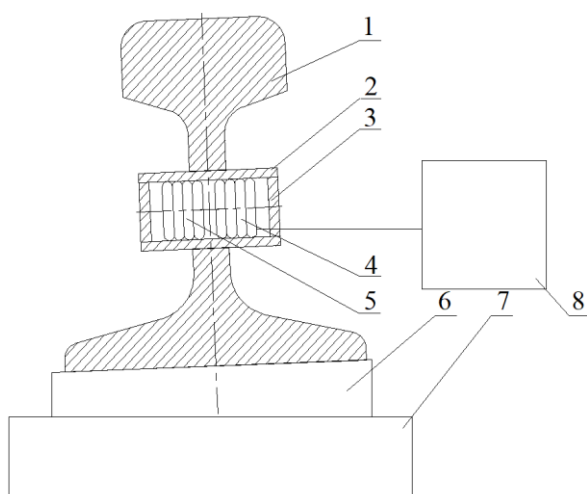


Рисунок 3 – Ваговимірювальний пристрій для залізничних поромів:

- 1 – рейка; 2 – корпус ваговимірювального датчика; 3 – герметичні кришки корпусу з гермовводами; 4 – компенсаційна світловодна котушка; 5 – вимірювальна світловодна котушка; 6 – вагоприймальна платформа; 7 – опора; 8 – ваговий термінал

Рейка, що встановлена з нахилом 3° відносно горизонтальної проекції, та вагоприймальна платформа з кутом нахилу, що дорівнює нахилу рейки, утворюють статично врівноважену систему, в якій платформа, ваговимірювальний датчик і опора перебувають на вертикальній осі.

Випромінювання почергово надходить до світловодних котушок, що знаходяться в межах датчика. Під впливом або неконтрольованих експлуатаційних і кліматологічних факторів, або навантаження від ваги вантажу у вагоні у межах кожної осі у світловодах, що утворюють котушки, відбувається динамічна деформація вигину.

Внаслідок деформації світловода відбувається зміна показників переломлення світла

як у серцевині, так і в оболонці світловода. Зміни, що відбуваються, спричиняють порушення умов повного відбивання світла у світловоді й ініціюють тунелювання частки випромінювання з серцевини до оболонки світловода.

Таким чином, частка світла випромінюється за межі світловода [6, 7, 8, 9, 10].

У статичному режимі (калібрування при відсутності навантаження на рейку) сигнал опрацьовується тільки від компенсаційної котушки, яка відрізняється від вимірювальної більшою кількістю витків і налаштована на вимірювання малих деформацій. На основі цього інформаційного сигналу у ваговому терміналі фіксуються відповідні дані та поправки, що враховують температуру навколишнього середовища, деформації елементів залізничної колії, корпусу судна та втрати в усіх елементах вимірювальної системи.

У динамічному режимі (вимірювання після надходження потягу на рейки) сигнал від компенсаційної котушки вимикається і до вагового терміналу надходить тільки інформаційний сигнал від вимірювальної котушки. Під впливом деформації рейки під вагою вагона з вантажем у вимірювальній котушці відбувається динамічна деформація вигину світловода, унаслідок чого частка світла випромінюється за межу світловода. Частка випромінювання, що буде зафіксована у такий спосіб, від вимірювальної котушки, з урахуванням поправки, буде пропорційною величині ваги вантажу у вагоні, що припадає на кожне колесо кожної осі. Таким чином, відбувається повний цикл вимірювання.

Запропонований судновий ваговимірювальний пристрій відрізняється тим, що ваговимірювальний датчик, який являє собою циліндричний герметичний корпус з інвару з заглушками, в якому містяться компенсаційна та вимірювальна волоконно-оптичні котушки, розташований у штатному свердленні залізничної рейки.

Висновки. Таким чином, в розробленому пристрої комбінація оптико-механічних елементів забезпечує:

- компенсацію впливу неконтрольованих експлуатаційних та кліматологічних факторів на вимірювальний канал;
- захищеність чутливих елементів пристрою;
- постійне вимірювання у реальному масштабі часу;

– зменшену похибку вимірювання ваги вагону при нерівномірному розподіленні в ньому вантажу;

– підвищену чутливість та точність приладу.

Застосування запропонованої системи зважування, крім того, дасть змогу підвищити рівень автоматизації процесу вимірювання та контролю ваги, дисципліну вантажних перевезень, ефективність технологічних вагоконтрольних процесів та безпеку морського судноплавства в цілому.

Список літератури

1. Власьевский С. В. Автоматизированные весоизмерительные комплексы как инструмент обеспечения комплексной безопасности. *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2007*: сб. науч. тр. по материалам науч.-практ. конф. Т. 1. Транспорт. Физика и математика. 2007. С. 47–54.
2. Шмекер К. Взвешивание контейнеров по требованиям ИМО и его возможные последствия. *Порты Украины*. 2014. № 07 (139). URL: <http://portsukraine.com/node/3776>
3. Автоматизированная система взвешивания и идентификации железнодорожных вагонов и составов. URL: http://security-info.com.ua/articles/?ELEMENT_ID=2273
4. Нужна дополнительная диагностика состояния рельсовых плетей. URL: <http://scbist.com/251963-post1.html>
5. Пат. 2239800 Российская Федерация, МПК G 01 G 19/04. Вагонные весы / П. Э. Драчук; заявитель и патентообладатель Драчук П. Э. № 2002135563/28; заявл. 26.12.2002; опубл. 10.11.2004.
6. Пат. 62699 Российская Федерация, МПК G 01 G 19/04. Весоизмерительное устройство / С. В. Власьевский, А. А. Панченко, Дё Ден Бок; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения» (ДВГУПС); опубл. 20.10.2006.
7. Сандлер А. К., Дрозд О. В. Суднова система зважування контейнерів. *Судовождение*. Одесса: НУ «ОМА», 2018. Вып. 28. С. 176–183.
8. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов, Москва: Мир, 1984. 510 с.
9. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Москва: Техносфера, 2008. 520 с.
10. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. Москва: Радио и связь, 1987. 656 с.

References

1. Vlasievsky, S. V. (2007). Automated weighing systems as a tool for ensuring integrated security. *Promising innovations in science, education, production and transport 2007*: coll. of sci. papers on the materials of sci.-pract. conf. Vol. 1. Transport. Physics and Mathematics, pp. 47–54 [in Russian].
2. Schmecker, K. (2014). Weighing containers according to IMO requirements and its possible consequences. *Porty Ukrainy*, No. 07 (139). URL: <http://portsukraine.com / node / 3776>
3. Automated system for weighing and identification of railway cars and trains. URL: http://security-info.com.ua/articles/?ELEMENT_ID=2273
4. Additional diagnostics of rail lashes condition is needed. URL: <http://scbist.com/251963-post1.html>
5. Pat. 2239800 Russian Federation, IPC G 01 G 19/04 (2004). Wagon scales / P. E. Drachuk; applicant and patent holder Drachuk P. E. № 2002135563/28; declared 12.26.2002 [in Russian].
6. Pat. 62699 Russian Federation, IPC G 01 G 19/04 (2006). Weight measuring device / S. V. Vlasievsky, A. A. Panchenko, De Den Bock; applicant and patent holder GOU VPO "Far Eastern State University of Communications" (FESUC) [in Russian].
7. Sandler, A. K., Drozd, O. V. (2018). Ship's container weighing system. *Sudovozhdenie*. Odesa: NU "OMA", Iss. 28, pp. 176–183 [in Ukrainian].
8. Adams, M. (1984). The introduction into optical waveguides theory. Moscow: Mir, 510 p. [in Russian].
9. Udd, E. (2008). Fiber optic sensors. Moscow: Technosfera, 520 p. [in Russian].
10. Snyder, A., Love, J. (1987). Optical waveguide theory. Moscow: Radio i svyaz, 656 p. [in Russian].

A. K. Sandler, assistant professor, assistant professor of the department
of automatic control theory and computer engineering,
e-mail: albertsand4@gmail.com

O. Yu. Karpilov, senior lecturer of the department
of automatic control theory and computer engineering
e-mail: kau.onma@gmail.com

National University «Odessa Maritime Academy»
Didrikhson str., 8, Odessa, 65029, Ukraine

FIBER-OPTIC DEVICE OF WEIGHT CONTROL FOR RAILWAY FERRIES

Increasing the safety requirements for shipping and shipping ferries requires continuous monitoring of the loading of trains on board specialized vessels. The International Maritime Organization considers it most appropriate to prevent marine casualties resulting from the loss of stability of the vessels. According to IMO studies, numerous ferry accidents were caused precisely by the fact that the weight was incorrectly indicated. Weighing of all trains, which are transported by sea ferries, in the near future will be a reality for companies-operators of freight transport.

In order to find ways to improve the situation with heavy control operations on the ferries, the designs of the most common types of weight measuring devices have been analyzed.

It has been assumed that a constructive implementation on the basis of fiber-optic and mechanical elements should provide to a measuring device: the absence of additional measures to protect the surface of weighing sensor in conditions of dynamic deformations of ship's hull during loading; the possibility of compensation of fluctuations of the environment temperature; the reliability, sensitivity and simplicity of circuit design solutions of devices of the known types.

The circuit design of the weighing instrument, aimed at further improvement of the process of automation of weight control operations is developed. The proposed weight measuring device is characterized in that a weight measuring probe, which is a cylindrical sealed enclosure made of invar with plugs, which contains compensating and measuring fiber optic coils, is located in the regular drilling of the rail.

The application of the proposed weighing system, in addition, will increase the level of automation of the measurement and control of weight, increase the discipline of freight traffic, improve the efficiency of technological control and safety of maritime navigation in general.

Keywords: weight control, ferry, train.

Л. В. Кузьмич, к.т.н., докторант,
Д. П. Орнатський, д.т.н., професор,
В. П. Квасніков, д.т.н., професор
Національний авіаційний університет
просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, 03058, Україна

РОЗРОБКА СПОСОБУ ТА ЗАСОБУ ВИМІРЮВАНЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕНЗОДАТЧИКА

У статті проаналізовано вплив основних дестабілізуючих факторів, що обмежують точність вимірювання напружено-деформованого стану складних технічних конструкцій за допомогою тензодатчиків. Досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами. За допомогою пакета NUMERY визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома. Встановлено, що в широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв'язок із порядком полінома.

Ключові слова: тензодатчик, температурна складова похибки, середньоквадратичне значення похибки апроксимації, поліноміальний коефіцієнт, константан.

Постановка проблеми. У зв'язку із сучасною хвилею інтелектуалізації засобів вимірювання набувають поширення цифрові методи корекції не тільки первинних вимірювальних перетворювачів, але й вторинних, тобто датчиків. Оскільки функція перетворення вторинних вимірювальних перетворювачів є лінійною, то для автоматичної корекції систематичних складових похибок таких перетворювачів використовується метод зразкових мір по двох точках.

Для корекції похибок датчиків, функція перетворення яких, як правило, є нелінійною та зазнає впливу різноманітних дестабілізуючих факторів, основним із яких є температура, на сьогоднішній день використовуються методи автоматичної корекції на основі методів допоміжних вимірювань, які регламентуються міжнародним стандартом IEEE 1451.02, що передбачає використання множини функцій перетворень, декількох еталонних значень вхідної величини під впливом різних значень дестабілізуючого фактора (TEDS).

Ці дані використовуються для отримання скорегованого результату шляхом вирішення систем нелінійних рівнянь [1–2, 7–11].

Аналіз останніх досліджень. У [4], наприклад, описано метод цифрової компенсації, що забезпечує більш значне (на порядок) зниження похибок вимірювальних перетворювачів порівняно з методом аналогової компенсації. Особливості і технічні показники цього методу розглядаються на прикладі вимірювального перетворювача тиску з фольго-

вими тензорезисторами. Такий вимірювальний перетворювач складається із круглої металевої мембрани, в якій на одну з поверхонь наносяться чотири однакові фольгові тензорезистори, що з'єднані за мостовою схемою і розміщуються таким чином, що при деформації мембрани під дією тиску два тензорезистори працюють на розтяг, а два інші – на стиск. Як матеріал фольгового тензорезистора взято сплав з мінімальним температурним коефіцієнтом опору.

На поверхні мембрани також улаштовуються додаткові компенсаційні резистори. З підвищенням температури жорсткість мембрани зменшується внаслідок температурних змін модуля пружності матеріалу мембрани, що приводить до збільшення чутливості вимірювального перетворювача.

Цей метод є універсальним, дає можливість скорегувати не лише похибки нелінійності вимірювального каналу і додаткові похибки, але й похибки, пов'язані з впливом завад загального виду через опір заземлення, який спонукає зв'язок між вимірювальними каналами основного та дестабілізуючого фактора.

До недоліків цього методу можна віднести значний обсяг обчислень, який різко зростає при збільшенні порядку апроксимуючих поліномів [3, 12].

Формулювання мети. Метою є розробка способу та засобу вимірювань напружено-деформованого стану за допомогою тензодатчика, вільного від зазначених вище недоліків.

Виклад основного матеріалу. Основними дестабілізуючими факторами, які обмежують точність вимірювання з використанням тензодатчика, є:

- випадкові процеси (шуми, перепони тощо);
- часові зміни параметрів вимірювальних перетворювачів внаслідок старіння та фізичної деградації;
- впливи зовнішніх кліматичних та механічних факторів (температура, вологість тощо).

Що стосується систематичних складових, то найбільш вагомими при статистичних вимірюваннях є похибки нелінійності та температурна складова похибки.

При статичних вимірюваннях основна вимога зводиться до отримання лінійної залежності між вхідною і вихідною величинами перетворювача.

Залежність «вхід-вихід» вимірювальних приладів без урахування таких факторів, як гістерезис, сповзання нуля тощо, описується у вигляді рівняння

$$Y_{out} = (a_o + a_1 x_{in} a_2 x_{in}^2 + \dots + a_n x_{in}^n) x_{in}, \quad (1)$$

де x_{in} – вхідна величина; Y_{out} – вихідна величина; $a_o, a_1, a_2, \dots, a_n$ – градувальні коефіцієнти.

Вплив коливань температури на конструкцію тензодатчика в багатьох практичних задачах є не менш важливим за вплив навантаження і є важливим фактором, що здатний змінити опір тензорезистора. При зміні температури навколишнього середовища виникають чотири ефекти, що здатні змінити функціональні характеристики датчика [5]:

1) зміна тензочутливості металевого сплаву S_A ;

2) подовження або скорочення решітки датчика ($\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T$);

3) подовження або скорочення зразка ($\frac{\Delta L}{L} = \beta \Delta T$);

4) зміна опору датчика ($\frac{\Delta R}{R} = \gamma \Delta T$).

Тензочутливість S_A одного з найбільш широко вживаних сплавів – константану – є лінійною функцією температури [5], де для константану $\Delta S_A / \Delta T$ становить 0,00735 % на 1 °C. У зв'язку з тим, що зміни S_A досить малі (менше 1 % для $\Delta T = 100^\circ\text{C}$), то при звичайному аналізі напружень вони не враховуються. Однак при дослідженні температурних напружень, коли систематично спостерігають-

ся перепади температури $\sim 10^2^\circ\text{C}$, необхідно враховувати зміни S_A . При цьому найбільш суттєвими є другий, третій та четвертий ефекти, що викликають зміну опору датчика з температурою ($\frac{\Delta R}{R}$) $_{\Delta T}$ відповідно до залежності

$$(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T} = (\beta - \alpha) S_g \Delta T + \gamma \Delta T, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт теплового розширення матеріалу датчика; β – коефіцієнт теплового розширення матеріалу зразка; $S_g \Delta$ – тензочутливість датчика; γ – температурний коефіцієнт опору матеріалу датчика.

Відмінність у тепловому розширенні матеріалів датчика і зразка призводить до механічних деформацій решітки датчика $\varepsilon_T = (\beta - \alpha) \Delta T$, що викликані впливом на зразок не силових факторів, а температурних. Датчик реагує на деформацію ε_T так само, як і на деформацію зразка ε , зумовлену навантаженням, що породжує компоненту вихідного сигналу, що відповідає температурі [5].

При рівності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів датчика і зразка наявна деформація визначається другим членом рівняння (2), оскільки перший член дорівнюватиме нулю. Температурна компенсація датчика досягається лише за умови, коли обидва члени рівняння (2) або дорівнюють нулю, або взаємно знищуються.

Величини α і γ є досить чутливими до вмісту сплаву і режиму його холодної обробки в процесі прокатування фольги. Загальноприйнятим етапом виробничого циклу виготовлення тензодатчиків є вибіркове вимірювання температурних характеристик декількох датчиків із кожного рулону фольги, що використовується при виготовленні решіток. Існування варіацій у величинах α і γ від плавлення до плавлення та від рулону до рулону дає змогу підбирати датчики, що виготовлені на базі константану, які застосовуються до різноманітних конструкційних матеріалів.

Матеріали для тензорешіток повинні відповідати таким вимогам [5, 6]:

- мати високий питомий опір, що дає можливість виготовляти малобазні тензорезистори з досить великим опором;
- володіти високою і стабільною чутливістю до деформацій;
- зміни опору, викликані деформацією, повинні підпорядковуватися лінійному закону в достатньо широкому діапазоні;

– бути нечутливими до впливу температури, тобто температурний коефіцієнт опору повинен бути близьким до нуля;

– термоЕРС в парі з міддю повинна бути якомога меншою, що дуже важливо при живленні тензорезисторів постійним струмом;

– температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалу проволочки і матеріалу досліджуваної деталі, на яку наклеюється тензорезистор, повинні бути рівними або незначно відрізнятися, в іншому випадку зміни температури будуть викликати уявну деформацію і, отже, створювати похибки при вимірах;

– не мати гістерезису;

– володіти технологічністю, що дозволяє виготовляти фольгу мікронних розмірів;

– мати високе відношення межі пропорційності до модуля пружності;

– сплави, що застосовуються для виготовлення високотемпературних тензорезисторів, повинні добре протистояти окиснювальному впливу зовнішнього середовища.

Що стосується константану, то нині більшість тензорезисторів виготовляється з цього сплаву через наступні його переваги [5, 6, 10]:

– сталість коефіцієнта тензочутливості в досить широкому діапазоні деформацій (до 8 %);

– у відпаленому стані константан може бути використаний при вимірюванні деформацій до 20 %; проте в цьому випадку у константану проявляється зміна початкового опору, що свідчить про систематичну зміну опору при кожному циклі навантаження;

– відсутність істотних змін при переході від пружного деформування до пластичного;

– константан володіє високим питомим опором ($\rho = 0,49$ мкОм/м);

– константан володіє високою температурною стабільністю;

– можливість створення температурно-компенсованих тензодатчиків шляхом узгодження коефіцієнта температурного розширення датчика з аналогічним параметром технічного матеріалу (в діапазоні від 0 до $100 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$).

Зазвичай тензорезистори виготовляються з м'якого відпаленого константану. Основними його недоліками є [5, 6, 10]:

– низький коефіцієнт тензочутливості (близько 2,1);

– значна термоЕРС у парі з міддю (близько 47 мкВ/°C). Правда, останній недолік позначається лише при живленні тензо-

моста постійним струмом при наявності різниці температур між выводами.

Слід зазначити, що датчики із вибірко-вих плавлень не є повністю компенсованими в широкому діапазоні температур через наявність нелінійних членів рівняння (2). Типові датчики із вибірко-вих плавлень виявляють наявність похибки, яка змінюється зі зміною температури [5].

Дослідженнями [5] встановлено, що похибка, викликана зміною температури в декілька градусів у межах 24 °C, є досить малою (менша 0,5 мкм/м °C). Однак при суттєвих змінах температури вона збільшується, що вимагає відповідної корекції. З цією метою необхідно виміряти температуру поблизу датчика і використати залежність вимірювальної похибки від температури [5].

Нами було досліджено вплив діапазону зміни температур, розкиду значень температурної похибки ($\pm 10\%$) на середньоквадратичне значення похибки апроксимації степеневими поліномами.

У табл. 1 наведено значення похибки в температурному режимі від -75 °C до +250 °C для константану.

Таблиця 1 – Табульоване значення похибки для константану на основі [5]

Температура T , °C	Відносна похибка вимірювання для константану, оvd
-75	-500
-50	-266
-25	-89
0	-13,5
+25	0
+50	-6
+75	-50
+100	-100
+125	-135
+150	-95
+175	-20
+200	+90
+225	+210
+250	+450

За допомогою пакета NUMERY було визначено залежність похибки апроксимації від порядку апроксимуючого полінома. Отримано наступні дані (див. табл. 2).

Середньоквадратичне значення похибки апроксимації (у відсотках) $\sigma_{[\%]}$ визначатиметься за формулою

$$\sigma_{[\%]} = \sqrt{\frac{\sum \theta^2}{n-1}} / \delta_{nom} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де θ^2 – сума квадратів нев'язок; n – кількість результатів вимірювань; δ_{nom} – номінальна деформація пружини, овд.

Таблиця 2 – Таблиця поліноміальних коефіцієнтів

Порядок полінома	Поліноміальні коефіцієнти										$\sum \theta^2$	$\sigma_{[\%]}$
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9		
IV	-16,4277781	1,5921428	-0,046261	0,0002543	-2,6037*10 ⁻⁷						2827,9491538	0,75
V	-15,0129174	1,8995044	-0,048572	0,0002015	2,6784*10 ⁻⁷	-1,20735*10 ⁻⁹					2227,5429176	0,65
VI	-6,3200432	2,0483683	-0,0579458	0,000209	1,5*10 ⁻⁶	-1,00141*10 ⁻⁸	1,67747*10 ⁻¹¹				1498,0882269	0,5
VII	-14,2274504	2,3282625	-0,0484233	0,0000271	8,25445*10 ⁻⁷	1,39213*10 ⁻⁸	-1,10787*10 ⁻¹⁰	2,08264*10 ⁻¹³			849,1320204	0,4
VIII	-13,276337	1,7345866	-0,0467915	0,0003704	-2,07862*10 ⁻⁶	-1,59733*10 ⁻⁸	3,56472*10 ⁻¹⁰	-1,80145*10 ⁻¹²	2,87103*10 ⁻¹⁵		210,7311456	0,2
IX	-16,29822	1,5277609	-0,0378965	0,0004673	-6,14724*10 ⁻⁶	-3,43268*10 ⁻⁹	7,43916*10 ⁻¹⁰	-5,748*10 ⁻¹²	1,70738*10 ⁻¹⁴	-1,80353*10 ⁻¹⁷	97,2128335	0,14

Висновки. Як видно з таблиць, у широкому температурному діапазоні похибка для константану має слабкий зв'язок з порядком полінома. У майбут-

ньому є потреба в детальному дослідженні поведінки поліноміальних коефіцієнтів для найбільш вживаного діапазону температур.

Список літератури

1. Кузьмич Л. В. Сучасні тенденції створення приладових систем вимірювання механічних величин. *Вісник Інженерної Академії України*. Київ, 2016. № 2. С. 180–184.
2. Kuzmych L.; Kobylanskyi O.; Duk M. Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108085J (1 October 2018); doi: 10.1117/12.2501661.
3. Орнатський Д. П., Кузьмич Л. В., Квасніков В. П. Моделювання аналогового інтерфейсу для багатоканальних дистанційних вимірювань з резистивними тензодатчиками. *Метрологія та прилади*. Харків, 2019. № 1. С. 31–36.
4. Erb K., Fisher P. Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuehlern. *Bulletin SEV/VSE*. 1989. 80. № 7, 8. P. 365–368.
5. Экспериментальная механика: монография в 2 кн. / пер. с англ.; под ред. А. Кобаяси. Москва: Мир, 1990. Кн. 1. 552 с.
6. Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 56 с.
7. Серьезнов А. Н., Шашурин А. К. Методы и средства измерений в прочностном эксперименте. Москва: Изд-во МАИ, 1990. 200 с.
8. Уикзер Дж. Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы. *Датчики и системы*. 2002. № 10. С. 50–55.
9. Rus G., Lee S. Y., Chang S. Y., Wooh S. C. Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. Vol. 68. Issue 7. P. 707–727; doi: 10.1002/nme.1720.
10. Harada T., Ishikawa N., Kanda T., Suzumori K., Yamada Y., Sotowa K. Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009. Vol. 155. Issue 1. P. 168–174.
11. Schroder A., Rautenberg J., Henning B. Evaluation of cost functions for FEA based transducer optimization. *Physics Procedia*. 2010.

Vol. 3. Issue 1. P. 1003–1009; doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

References

1. Kuzmych, L. V. (2016). Modern trends in the creation of instrumentation systems for measuring mechanical quantities. *Visnyk Inzhenernoi Akademii Ukrainy*. Kyiv, No. 2, pp. 180–184 [in Ukrainian].
2. Kuzmych, L.; Kobylanskyi, O.; Duk, M. (2018). Current state of tools and methods of control of deformations and mechanical stresses of complex technical systems. *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108085J (October 1, 2018); doi: 10.1117/12.2501661.
3. Ornatskyi, D. P., Kuzmych, L. V., Kvasnikov, V. P. (2019). Simulation of the analog interface for remote measurements using multiplexer and resistive strain gauges. *Metrolohiia ta prylady*. Kharkiv, No. 1, pp. 31–36 [in Ukrainian].
4. Erb, K., Fisher, P. (1989). Digital's Kompensation sverfahren zur Verbesserung von Messfuehlern. *Bulletin SEV/VSE*, 80, No. 7, 8, pp. 365–368.
5. Experimental mechanics (1990): monograph in 2 books. In A. Kobaiasi (Ed.). Moscow: Mir, book 1, 552 p. [in Russian].
6. Mekheda, V. A. (2011). Strain gauge method for strain measurement: manual. Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 56 p. [in Russian].
7. Seryeznov, A. N., Shashurin, A. K. (1990). Methods and measurement tools in the strength experiment. Moscow: Izd-vo MAI, 200 p. [in Russian].
8. Uikzer, J. (2002). Connectivity: intelligent sensors or intelligent interfaces. *Datchiki i sistemy*, No. 10, pp. 50–55 [in Russian].
9. Rus, G., Lee, S. Y., Chang, S. Y., Wooh, S. C. (2006). Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 68, Issue 7, pp. 707–727; doi: 10.1002/nme.1720.
10. Harada, T., Ishikawa, N., Kanda, T., Suzumori, K., Yamada, Y., Sotowa, K. (2009). Droplet generation using a torsional Langevin-type transducer and a micropore plate. *Sensors and*

Actuators A: Physical, Vol. 155, Issue 1, pp. 168–174; doi: 10.1016/j.sna.2009.08.007.
11. Schroder, A., Rautenberg, J., Henning, B. (2010). Evaluation of cost functions for FEA

based transducer optimization. *Physics Procedia*, Vol. 3, Issue 1, pp. 1003–1009; doi: 10.1016/j.phpro.2010.01.129.

L. V. Kuzmych, *Ph.D., doctoral candidate,*
D. P. Ornatskyi, *Doctor of Science, professor,*
V. P. Kvasnikov, *Doctor of Science, professor*
National Aviation University,
Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE METHOD AND MEANS OF THE MEASUREMENT OF STRESS-STRAIN STATE BY A STRAIN GAUGE

Nowadays due to the modern wave of intellectualization of measuring instruments the digital methods of correction not only for primary measuring transducers, but also for secondary sensors are practiced on a large scale. Since the conversion function of secondary measuring transducers is linear, the method of model measures by two points is used for automatic correction of systematic components of the errors of such converters.

The method of digital compensation, which provides a more significant reduction in the errors of measuring transducers compared with the method of analog compensation has been described. Features and technical indicators of this method are considered on the example of measuring pressure transducer with foil strain gauges.

This method is universal, allows to adjust not only the errors of measurement channel nonlinearity and additional errors, but also the errors associated with the effect of interferences of general type due to ground resistance, which induces the connection between measuring channels of the main and destabilizing factor.

The disadvantages of this method include a significant amount of computations, which sharply increases with the increase of the order of approximating polynomials.

The aim of the paper is to develop a method and means of measuring stress-strain state using strain gauge, free from the above mentioned shortcomings.

The main destabilizing factors that limit the measurement accuracy using strain gauge are the following:

- random processes (noises, obstacles, etc.);
- changes in parameters of measuring transducers due to aging and physical degradation;
- effects of external climatic and mechanical factors (temperature, humidity, etc.).

Regarding systematic components, the errors of nonlinearity and temperature component of the error are the most important in statistical measurements.

We have studied the influence of temperature range variations, the spread of values of temperature error ($\pm 10\%$) on the mean square error of approximation by power polynomials.

Using the NUMERY Program, the dependence of approximation error on the order of approximating polynomial has been determined.

It is established that in a wide temperature range, the error for constantan has a weak relation with the order of a polynomial.

Keywords: strain gauge, temperature component of error, mean square value of approximation error, polynomial coefficient, constantan.

А. К. Сандлер, доцент,
доцент кафедры теории автоматического управления и вычислительной техники
Национальный университет «Одесская морская академия»
ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, 65029, Украина
e-mail: albertsand4@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Автором была исследована работа акселерометра маятниковой схемы для контроля высокочастотной вибрации в специальных условиях эксплуатации.

В разработанной схеме акселерометра представление оптического волокна в виде слоистой ступенчатой структуры позволяет составить и использовать дискретную расчетную схему. На основании модифицированной теории связанных мод в туннельно-связанных оптических волокнах был определен коэффициент связи мод излучения в коаксиальной структуре, создаваемой под влиянием колебательных процессов. Получила дальнейшее развитие модель волоконно-оптического акселерометра, что позволило разработать модель измерительного преобразователя для лабораторных измерений и реализовать моделирование устройств для их эффективного проектирования.

Ключевые слова: волоконно-оптический акселерометр, оптическое волокно, коэффициент связи мод излучения.

Введение. Анализ научно-технической литературы показал, что существует проблема недостаточного внимания к процессам в волоконно-оптических акселерометрах (ВОА), эксплуатируемых в условиях концентрированного воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ), генерируемых компактно расположенным оборудованием энергетической установки [1, 2]. Не рассматриваются конструктивно-технологические особенности ВОА, и не дается оценка их метрологических и эксплуатационных характеристик в данных условиях. Соответственно, отсутствует систематизированное описание процессов в волоконных акселерометрах и, в целом подход в решении этого важного вопроса.

В [3–7] была исследована работа ВОА маятниковой схемы для контроля высокочастотной вибрации в специальных условиях эксплуатации (рис. 1).

Под воздействием механических деформаций, создаваемых вибрацией, и неконтролируемых ДФ в измерительном оптическом волокне (ОВ) происходит изменение диэлектрической проницаемости волокна и, соответственно, изменение его профиля показателя преломления (ППП).

В компенсирующем ОВ аналогичные изменения происходят только под влиянием неконтролируемых ДФ.

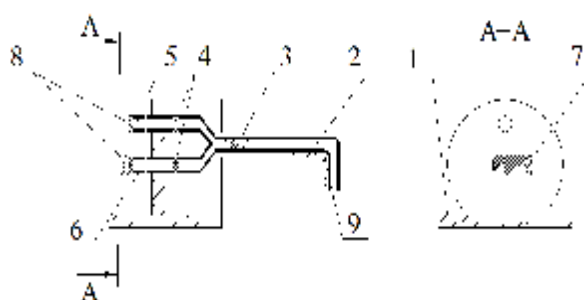


Рисунок 1 – Волоконно-оптический акселерометр для специальных условий эксплуатации:

- 1 – корпус; 2 – опорное оптическое волокно;
- 3 – C/G-линзы; 4 – оптический фильтр;
- 5 – измерительное оптическое волокно;
- 6 – компенсирующее волокно; 7 – эксцентриковая масса; 8 – отражающий слой;
- 9 – биметаллическая пластина

Изменение PPP измерительного и компенсирующего ОВ находит свое отражение в снижении величины интенсивности светового излучения, проходящего акселерометр в прямом и обратном направлении.

Изучение вопроса преобразования светового излучения в деформированных световодных элементах акселерометра и анализ результатов аналогичных исследований позволил сформировать следующие подходы к описанию изменения оптических параметров ОВ при приложении внешних нагрузок [7]:

все деформационные процессы находятся в пределах малых деформаций, т. е. не приводящих к разрушению материала волокон;

рассматриваются только упругие деформации;

изменения параметров ОВ рассматриваются с позиций закона Гука;

в качестве базовых моделей для расчётов берутся модели классической механики сплошной среды;

световодный элемент ВОА рассматривается как слоистая ступенчатая структура.

В описанном схематическом решении ОВ измерительного канала испытывает деформации кручения.

В области малых деформаций, ограниченных пределом прочности оптического волокна, в соответствии с законом Гука линейная зависимость компонент напряжений и показателя преломления при кручении имеет вид [8]

$$n_{xz} = n_{yz} = C_4 \frac{\gamma E_i r_i}{2L(1 + \nu_i)},$$

где C_4 – светопругая постоянная;

E_i – модуль упругости;

ν_i – коэффициент Пуассона;

r_i – текущий радиус волокна.

На рис. 2 представлены модели изменения ППП волокна при кручении ОВ: *a* – волокна со ступенчатым ППП; *б* – волокна с градиентным ППП.

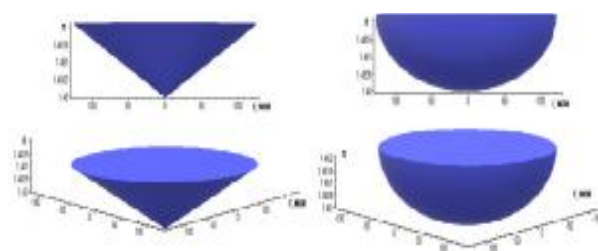


Рисунок 2 – Изменение ППП волокна при кручении оптического волокна

Если рассматривать полученные модели ОВ с изменённым при кручении ППП как слоистую структуру, то возможно следующее допущение. Взаимная связь процессов, происходящих в слоистых структурах сердцевин и оболочки, позволяет любую произвольную деформацию границы раздела сред аппроксимировать последовательностью малых скачков. В пределе при бесконечно большом числе скачков и нулевой высоте каждого скачка последовательность скачков можно заменить любую произвольную функцию. Преобразова-

ние моды многими скачками является суперпозицией полей, порождаемых каждым индивидуальным скачком. Такая модель достаточно проста, удобна и применима к любому типу поля, в том числе и к более сложным полям круглого оптического волокна. Представление оптического волокна в виде слоистой ступенчатой структуры позволяет составить и использовать дискретную расчетную схему [9]. Согласно такой схеме:

волокно заменяется цилиндром, состоящим из ряда концентрических цилиндрических слоев, в пределах каждого из которых напряжение считается постоянным. В каждом слое показатель преломления постоянный, а поле описывается функцией ψ ;

для оценки величины показателя преломления в каждом слое может быть использован метод профилей равного объема;

задача согласования двух волноводных структур рассматривается как возбуждение приемной антенны некоторым заданным полем излучающей антенны.

Известно [10], что метод профилей равного объема предполагает нормировку профилей показателя преломления с одинаковым показателем преломления оболочки n_{cl} и параметрами высоты профиля.

Эффективный объем профиля ζ определяется как интеграл по поперечному сечению от функции $(1 - f)$ или как объем тела, полученного вращением кривой профиля вокруг оси ОВ, т. е.

$$\zeta = \int_{A_0} (1 - f) dA = 2\pi\rho^2 \int_0^\infty (1 - f) R dR.$$

где ρ – радиус сердцевин или характерный размер профиля;

$(1 - f)$ – функция, определяющая форму профиля и пропорциональная превышению $n^2(R)$ над показателем n_{cl} .

Оценка с позиций метода равных объемов слоистой структуры с изменённым ППП позволяет аппроксимировать деформированное при кручении ОВ коаксиальной структурой, которую можно рассматривать в рамках теории связанных мод как туннельно-связанные ОВ.

Анализ источников исследований и публикаций, в которых положено начало решения проблемы. Большое разнообразие противоречивых подходов, формулировок и аппроксимаций при рассмотрении обычной теории связанных мод (ОТСМ) и модифицированной теории связанных мод (МТСМ)

в туннельно-связанных ОВ делает практически невозможной задачу согласования результатов, полученных разными авторами, с целью выработки единого физического взгляда на многообразные межмодовые взаимодействия в современной волноводной оптике.

Противоречия и спорные результаты, полученные разными авторами в рамках ОТСМ можно объяснить различными теоретическими подходами, методами исследования и использованными приближениями.

Некоторые авторы (Снайдер и Лав, Харди и Стрейфер, Когельник и др.) применяют уравнения Максвелла как исходные дифференциальные уравнения первого порядка для вывода уравнений связанных мод. Другие авторы (Маркузе, Ярив и Юх) используют для этой же цели уравнения второго порядка типа уравнения Гельмгольца, полученные из уравнений Максвелла. Второй подход требует так называемой параболической аппроксимации с тем, чтобы убрать вторые производные искомых амплитуд по z , которые просто не появляются при первом подходе [11].

Согласно [10], если волноводы расположены вблизи друг от друга, то полное поле можно приближенно представить в виде суперпозиции невозмущенных полей каждого волновода. Оптическая перекрестная связь будет заключаться в интерференции между полями мод, соответствующими скалярным решениям ψ_+ и ψ_- . ОВ в этом процессе рассматривается как сложный волновод.

Фундаментальные решения ψ_+ и ψ_- скалярного волнового уравнения определяются симметрией поперечного сечения волновода и могут быть приближенно записаны в виде

$$\psi_+ = \bar{\psi}_1 + \bar{\psi}_2; \quad \psi_- = \bar{\psi}_1 - \bar{\psi}_2, \quad (1.1)$$

где $\bar{\psi}_1$ и $\bar{\psi}_2$ – фундаментальные решения отдельного волновода.

Постоянные распространения, соответствующие решениям ψ_+ и ψ_- , обозначаются β_+ и β_- , а под β будем понимать общую постоянную распространения для решений $\bar{\psi}_1$ и $\bar{\psi}_2$. В случае изолированных волноводов $\beta_+ = \beta_- = \beta$. При достаточно большом расстоянии между каналами можно считать $\beta = \beta_{\pm}$, $\psi = \psi_{\pm}$, $n = n_{co}$, $\psi = \bar{\psi}_1$. Тогда, с учетом слабонаправляющего волновода, получим

$$\beta_+ = \beta + \kappa[(n - n_{co}) \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_+ dA / \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_+ dA],$$

где n – показатель преломления сложного волновода;

n_{co} – показатель преломления сердцевинного волновода;

A_{∞} – бесконечное поперечное сечение;

$\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число;

λ – длина волны в вакууме.

Полученное выражение при подстановке в (1.1) значительно упрощается. Это связано с экспоненциально малой величиной $\bar{\psi}_2$ в сердцевине невозмущенного волновода, в знаменателе интегралом от $\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2$ можно пренебречь по сравнению с интегралом от $\bar{\psi}_1^2$. Во-вторых, основной вклад в интеграл в числителе вносит член $\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2$, так как разность $n - n_{co}$ отлична от нуля лишь вне сердцевинного волновода.

На основе классического подхода волновой оптики выполняется дальнейшее преобразование

$$\beta_{\pm} = \bar{\beta} \pm C,$$

где C – коэффициент связи, определяющий степень связи мод излучения или расстояние, на котором происходит заданный обмен мощностью между ними. Рассчитывается как интеграл перекрытия составляющих электрических полей связанных мод:

$$C = \kappa \left[\int_{A_{\infty}} (n - n_{co}) \bar{\psi} \psi dA \right] / \int_{A_{\infty}} \bar{\psi}_1^2 dA. \quad (1.2)$$

При постоянной длине измерительного волокна в ВОА (рис. 1) коэффициент связи является основным вариативным параметром, влияющим на преобразование оптической мощности.

Цель статьи. Создание модели преобразования оптической мощности в коаксиальной структуре ВОА маятниковой схемы при воздействии механических колебательных процессов.

Основная часть. В (1.2) интеграл в знаменателе пропорционален параметру нормировки N , а само выражение совпадает с аналогичными формулами, полученными [9, 12] на основе ОТСМ при условии равенства величин диэлектрической проницаемости всех слоев коаксиальной структуры $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx \epsilon_3 \approx \epsilon_4$.

Подстановка выражений для $\bar{\psi}_1$, $\bar{\psi}_2$, N в (1.2) и переход к цилиндрическим координатам преобразовывает (1.2) к виду

$$C = (0,5\Delta)^{0,5} U^2 K_0(W) ((\pi \rho^3 V K_1^2(W) J_0(U))^{-1} \times \\ \times \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} r_2 K_0(W r_1 \rho^{-1}) J_0(V r_2 / \rho) dr_2 d\varphi_2, \quad (1.3)$$

где Δ – параметр высоты профиля;

ρ – радиус сердцевинного (стержень);

$W = \rho(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{0.5}$ – параметр моды в сердцевине (коаксиальная трубка);

$U = \rho(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{0.5}$ – параметр моды в сердцевине;

K_0, K_1, J_0 – функции Бесселя.

Пусть $m = 0$; $a = W\rho^{-1}$, произведем подстановку в выражение для модифицированных функций Бесселя [10], тогда

$$K_0(Wr_1/\rho) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} (-1)^p K_p(Wd/\rho) \times \\ \times I_p(Wr_2/\rho) \cos(\rho\varphi_2). \quad (1.4)$$

Из (1.4) с учетом, что в (37.81) [10] $m = 0$; $a = W\rho^{-1}$, получаем

$$K_0(Wr_1/\rho) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} r_2 K_0(Wr_1/\rho) \times \\ \times J_0(Ur_2/\rho) dr_2 d\varphi_2 = \quad (1.5) \\ = \int_0^{\rho} r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) \cdot \left[\int_0^{2\pi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} (-1)^p \times \right. \\ \times K_p(Wd/\rho) I_p(Wr_2/\rho) \cos(\rho\varphi_2) d\varphi_2 dr_2 = \\ = \int_0^{\rho} r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) \cdot \left[\int_0^{2\pi} (-1)^0 \times \right. \\ \times K_0(Wd/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) d\varphi_2 dr_2 = \\ = 2\pi K_0(Wd\rho^{-1}) \cdot \int_0^{\rho} r_2 J_0(Ur_2/\rho) \times \\ \times I_0(Wr_2\rho^{-1}) dr_2 \quad (1.6)$$

Вычислим отдельно интеграл в последнем уравнении. Если в (37.99) [10] примем $a = U\rho^{-1}$, $b = W\rho^{-1}$, $z = r_2$, тогда

$$\int_0^{\rho} r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) I_0(Wr_2\rho^{-1}) = \\ = r_2 ((U\rho^{-1})^2 + (W\rho^{-1})^2)^{-1} \cdot \{ (W\rho^{-1}) J_0(U\rho r_{2-1}) \times \\ \times I_1(W\rho r_{2-1}) + \\ + (U\rho^{-1}) J_1(U\rho/r_2) I_0(W\rho/r_2) \} |_0^{\rho}. \quad (1.7)$$

Подставляя в (1.7) вместо r_2 числа ρ и 0, получаем

$$\int_0^{\rho} r_2 J_0(Ur_2/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) dr_2 = \\ = \rho^3 (U^2 + W^2)^{-1} \cdot \{ W\rho^{-1} J_0(U) I_1(W) + \\ + \rho^{-1} U J_1(U) I_0(W) \} = \rho^3 (U^2 + W^2)^{-1} \cdot \{ W J_0(U) I_1(W) + \\ + U J_1(U) I_0(W) \}. \quad (1.8)$$

Из таблицы 14.3 [10] и (1.8) с помощью характеристического уравнения

$$\frac{U J_1(U)}{J_0(U)} = \frac{W K_1(W)}{K_0(W)}, \\ U^2 + W^2 = V^2,$$

имеем

$$U J_1(U) = \frac{W J_0(U)}{K_0(W)} K_1(W),$$

тогда

$$K_0\left(\frac{Wr_1}{\rho}\right) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} (-1)^p K_p\left(\frac{Wd}{\rho}\right) I_p\left(\frac{Wr_2}{\rho}\right) \cos(\rho\varphi_2).$$

а

$$\rho^2 V^2 \{ W J_0(U) I_1(W) + \\ + W J_0(U) K_1(W) I_0(W) (K_0(W)^{-1}) \} = \\ = \rho^2 W J_0(U) (V^2 K_0(W))^{-1} \cdot \{ I_1(W) K_0(W) + \\ + K_1(W) I_0(W) \}. \quad (1.9)$$

с учетом рекуррентного соотношения

$K_0(z) I_1(z) + K_1(z) I_0(z) = 1z^{-1}$ получаем преобразование (1.9) к виду

$$\left(\frac{\rho^2 W I_0(U)}{V^2 K_0(W) W} \right) = \frac{\rho^2 I_0(U)}{V^2 K_0(W)}. \quad (1.10)$$

Теперь

$$\int_0^{\rho} \int_0^{2\pi} r_2 K_0(Wr_1\rho^{-1}) J_0(Ur_2\rho^{-1}) d\varphi_2 r_2 = \\ = 2\pi K_0(Wd\rho^{-1}) \rho^2 J_0(U) \cdot (V^2 K_0(W)^{-1}). \quad (1.11)$$

Вернемся к выражению (1.3)

$$C = (\pi\rho^{-3} (\Delta\lambda^{-1})^{0.5} (U^2 K_0(W) 2\pi\rho^2 \times \\ \times K_0(Wd\rho^{-1}) J_0(U) \times \\ \times ((VK_1(W) J_0(U) V^2 K_0(W))^{-1} = \\ = 2\Delta^{0.5} \rho^{-1} U^2 K_0(Wd\rho^{-1}) \cdot ((V^2 K_0(W)^{-1}). \quad (1.12)$$

Из $K_\nu(z) \approx (\pi/2z)^{0.5} e^z \{1 + (4\nu^2 - 8z^{-1})\}$ с учетом подстановки

$\nu = 0$, $z = (Wd\rho^{-1})$ получаем

$$K_0(Wd\rho^{-1}) \approx (\pi\rho(2Wd^{-1}))^{0.5} \times \\ \times \exp\{Wd\rho^{-1}\} [1 - (\rho(8Wd^{-1}))] \approx \\ \approx (\pi\rho(2Wd^{-1}))^{0.5} \exp\{Wd\rho^{-1}\}, \quad (1.13)$$

тогда

$$C = (2\Delta)^{0.5} U^2 K_0(Wd/\rho) / (\rho V^3 K_1^2(W)) = \\ = (\Delta\pi(\rho Wd)^{-1})^{0.5} U^2 \exp\{-Wd\rho^{-1}\} \cdot (V^3 K_1^2(W)^{-1}). \quad (1.14)$$

Выражение (1.14) описывает зависимость величины коэффициента связи от геометрических параметров коаксиальной структуры стержень–трубка в статическом режиме.

С учетом уравнения движения подвижной системы маятникового акселерометра и полученных результатов для задачи о крутильных колебаниях ОБ, зависимость показателя преломления от крутильных колебаний для стержня и трубки ОБ со ступенчатым ППП определяется как [8, 13]

$$n_{xz}^c = C_4 \frac{Z(A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t) E_c r_c}{2L(1 + \nu_c)};$$

$$n_{xz}^{ob} = C_4 \frac{Z(A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t) E_{ob} r_{ob}}{2L(1 + \nu_{ob})}, \quad (1.15)$$

где A_k, B_k – произвольные постоянные;

E_c, E_{ob} – модули упругости сердцевин и оболочки;

ν_c, ν_{ob} – коэффициенты Пуассона стержня и трубки;

r_c, r_{ob} – текущие радиусы стержня и трубки;

ω_k – частота собственных форм колебаний ОВ;

L – длина ОВ.

Подстановка (1.15) в (1.14) дает выражение, описывающее зависимость величины коэффициента связи от геометрических параметров коаксиальной структуры стержень–трубка в режиме динамической деформации.

$$C = \int \frac{\pi \Delta}{\sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzco}^2) d \rho^2}} \frac{(\rho \sqrt{(k^2 n_{xzco}^2 - \beta^2)})^2}{(k \rho (n_{xzco}^2 - n_{xzcl}^2))^2} \times$$

$$\times \frac{\exp(-\sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2) d})}{K_1^2(\rho \sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2) d})} d.$$

Тогда, мощность в стержневой структуре будет определяться как

$$P_R(z) = \left[1 - \frac{\sin^2 CL \sqrt{1 + [(\beta_R + \beta_\beta + \beta_H) - (\beta_T + \beta_\beta + \beta_H)] / 2C^2}}{1 + [(\beta_R + \beta_\beta + \beta_H) - (\beta_T + \beta_\beta + \beta_H)] / 2C^2} \right] P_0,$$

где P_0 – суммарная мощность, введенная в коаксиальную структуру;

β_β – приращение постоянной распространения из-за возникающей эллиптичности коаксиальной структуры;

β_H – приращение постоянной распространения из-за возмущений, нарушающих циркулярную симметрию коаксиальной структуры.

Выводы. Получила дальнейшее развитие модель ВОА, что позволило разработать модель измерительного преобразователя для лабораторных измерений и реализовать моделирование устройств для их эффективного проектирования. Развитие модели волоконно-измерительного преобразователя маятниковой схемы на коаксиальных структурах позволяет создать устройства с заданными конструктивными размерами и чувствительностью, которые учитывают особенности

технологического процесса контроля высокочастотной вибрации. Достоверность полученных результатов подтверждена при натурных испытаниях в условиях центральной заводской лаборатории ПАО «Одесский кабельный завод «Одескабель».

Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности проектирования чувствительных элементов волоконных акселерометров на коаксиальных структурах.

Список литературы

1. Комиссаров С. С. Разработка и исследование волоконно-оптической интерферометрической системы с микромеханическим преобразователем: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / С.Пб гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ». Санкт-Петербург, 2016. 18 с.
2. Бадеева Е. А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2016. № 4 (40). С. 102–113.
3. Сандлер А. К., Логишев И. В., Сандлер А. А. Инвариантный волоконный акселерометр. *Энергетика судна: эксплуатация та ремонт*: матеріали наук.-техн. конф. Одеса: ОНМА. 2011. С. 277–279.
4. Сандлер А. К., Сандлер О. А. Инвариантный волоконный акселерометр: Декларацийний патент України № 62437, МПК G01M 11/00; заявл. 02.02.2011; опубл. 26.10.2011, Бюл. № 18.
5. Сандлер А. К. Волоконно-оптический акселерометр для диагностирования судовых газовых турбин. *Автоматика-2012*: матеріали XIX Міжнар. конф. з автомат. упр. (26–28 верес. 2012 р.). Київ: НУХТ, 2012. С. 336.
6. Сандлер А. К., Логишев И. В. Контроль положения валов судовых механизмов волоконно-оптическими устройствами. *Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт*: матеріали наук.-техн. конф. Одеса: ОНМА, 2013. С. 110–113.
7. Сандлер А. К., Логишев И. В. Разработка волоконного акселерометра для контроля высокочастотной вибрации судовых механизмов. *Річковий та морський флот: експлуатація та ремонт*: матеріали наук.-техн. конф. Одеса: НУ «ОМА», 2017. Т. 2. С. 14–17.

8. Черненко В. Д. Оптомеханика волоконных световодов. Санкт-Петербург: Политехника, 2010. 291 с.
9. Маркузе Д. Оптические волноводы. Москва: Мир, 1974. 576 с.
10. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. Москва: Радио и связь, 1987. 656 с.
11. Барыбин А. А. Электродинамика волнующих структур. Теория возбуждения и связи волн. Москва: Физматлит, 2007. 512 с.
12. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
13. Новицкий П. В., Левшина Е. С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Ленинград: Энергия, 1975. 576 с.
5. Sandler, A. K. (2012). A fiber-optical accelerometer for diagnosing of ship gas turbines. *Avtomatyka-2012: materials of the XIX Internat. conf. on automatic control* (Sept., 26–28). Kyiv: NUHT, pp. 336 [in Russian].
6. Sandler, A. K., Logishev, I. V. (2013). Monitoring of provision of ship mechanisms shafts by fiber-optical devices. *Sudnovi enerhetychni ustanovky: ekspluatatsiya ta remont: materials of sci.-tech. conf.* Odesa: ONMA, pp. 110–113 [in Russian].
7. Sandler, A. K., Logishev, I. V. (2017). Development of a fiber accelerometer for monitoring of high-frequency vibration of ship mechanisms. *Richkovyy ta morskyy flot: ekspluatatsiya ta remont: materials of sci.-tech. conf.* Odesa: NU “OMA”, vol. 2, pp. 14–17 [in Russian].
8. Chernenko, V. D. (2010). Optomechanics of fiber light guides. St. Petersburg: Politehnika, 291 p. [in Russian].
9. Markuze, D. (1974). Optical wave guides. Moscow: Mir, 576 p. [in Russian].
10. Snider, A., Lav, D. (1987). Theory of optical wave guides. Moscow: Radio i svyaz, 656 p. [in Russian].
11. Barybin, A. A. (2007). Electrodynamics of waveguide structures. Theory of excitation and wave coupling. Moscow: Fizmatlit, 512 p. [in Russian].
12. Busurin, V. I., Nosov, Yu. R. (1990). Fiber optic sensors: principal bases, questions of calculation and application. Moscow: Energoatomizdat, 256 p. [in Russian].
13. Novitsky, P. V., Levshina, E. S., etc. (1975). Electric measurements of nonelectrical quantities. Leningrad: Energiya, 576 p. [in Russian].

References

1. Commissarov, C. C. (2016). Development and research of a fiber-optical interferometric system with micromechanical converter: author's abstract for Ph.D. in Engineering: 05.11.07. S.Pb State Electrotechnical University “LETI”. St. Petersburg, 18 p. [in Russian].
2. Badeeva, E. A. (2016). Scientific concept of projection of fiber optic sensors of pressure with an open optical channel for space-rocket and aircraft equipment. *Izvestiya vysshyyh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskkiye nauki*, No. 4 (40), pp. 102–113 [in Russian].
3. Sandler, A. K., Logishev, I. V., Sandler, A. A. (2011). Invariant fiber accelerometer. *Enerhetyka sudna: ekspluatatsiya ta remont: materials of sci.-tech. conf.* Odesa: ONMA, pp. 277–279 [in Russian].
4. Sandler, A. K., Sandler, O. A. (2011). Invariant fiber accelerometer: Declarative Patent of Ukraine No. 62437, MPK, G01M 11/00. 02.02.2011. publ. 26.10.2011, Bulletin No. 18 [in Ukrainian].

A. K. Sandler, associate professor,

associate professor of the Department of Automatic Control Theory and Computer Engineering,
National University “Odessa Maritime Academy”,
8, Didriskyhson str., Odessa, 65029, Ukraine

MODELING OF FIBER-OPTIC ACCELEROMETER OF PENDULUM TYPE

Analysis of scientific literature has shown that there is a lack of attention to the processes used in fiber-optic accelerometers, which operate under concentrated impact of destabilizing factors generated by compactly arranged equipment of power unit. Constructive and technological features of accelerometers are not considered, and there is no assessment of their metrological and operational characteristics in these conditions. Accordingly, there is no systematic description of the processes in fiber accelerome-

ters and, in general, the approach to the solution of this important issue. The author studies the work of pendulum scheme accelerometer to control high frequency vibration in special conditions.

In the developed scheme of the accelerometer the performance of optical fiber in the form of laminated layered structure allows to create and use discrete design diagram. According to this diagram:

a fiber is replaced by a cylinder, consisting of a series of concentric cylindrical layers, within each of which the voltage is considered to be constant. In each layer the refractive index is constant and the field is described by the ψ function;

to estimate the magnitude of the refractive index in each layer the method of equal volume sections can be used;

the task of coordination of two waveguide structures is considered as an excitation of the receiving antenna by some given field of the radiating antenna.

Based on the modified theory of related modes in tunnel-coupled optical fibers, the coefficient of radiation modes coupling in a coaxial structure, created under the influence of oscillatory processes, has been determined.

The model of fiber-optic accelerometer, which has allowed to develop a measuring converter model for laboratory measurements and realize the devices modeling for their effective design, is further developed.

Keywords: fiber-optic accelerometer, optical fiber, coefficient of radiation modes coupling.

А. К. Сандлер, доцент,
доцент кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки
Національний університет «Одеська морська академія»
вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна
e-mail: albertsand4@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА МАЯТНИКОВОГО ТИПУ

Аналіз науково-технічної літератури показав, що недостатньо уваги приділяється процесам у волоконно-оптичних акселерометрах, які працюють в умовах концентрованого впливу дестабілізуючих факторів, що генеруються компактно розташованим обладнанням енергетичного пристрою. Не розглядаються конструктивно-технологічні особливості акселерометрів, і не проводиться оцінювання їх метрологічних та експлуатаційних характеристик у цих умовах. Відповідно, не існує систематизованого опису процесів у волоконних акселерометрах і, загалом, підходу до вирішення цього важливого питання. Автор досліджує роботу акселерометра маятникового типу для контролю високочастотної вібрації в особливих умовах.

У розробленій схемі акселерометра продуктивність оптичного волокна у вигляді шаруватой ступінчастої структури дає можливість створювати і використовувати дискретну розрахункову схему. Відповідно до цієї схеми:

волокно замінюється на циліндр, що складається з ряду концентричних циліндричних шарів, усередині кожного з яких напруга вважається постійною. У кожному шарі показник заломлення є постійним, а поле описується функцією ψ ;

для оцінювання величини показника заломлення в кожному шарі може бути використано метод профілів рівного об'єму;

завдання координації двох хвильових структур розглядається як збудження приймаючої антени деяким заданим полем випромінюючої антени.

На основі модифікованої теорії пов'язаних мод у тунельно-пов'язаних оптичних волокнах було визначено коефіцієнт зв'язку мод випромінювання в коаксіальній структурі, що створюється під впливом коливальних процесів.

Отримала подальший розвиток модель волоконно-оптичного акселерометра, що дало можливість розробити модель вимірювального перетворювача для лабораторних вимірювань і реалізувати моделювання пристроїв для їх ефективного проектування.

Ключові слова: волоконно-оптичний акселерометр, оптичне волокно, коефіцієнт зв'язку мод випромінювання.

А. Л. Передерко, к.т.н.

e-mail: pal88@ukr.net

Одеська державна академія технічного регулювання та якості,
вул. Кузнечна, 15, м. Одеса, 65020, Україна

КОРЕКЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ НА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

У статті розглянуто можливість компенсації неінформативної складової у вимірюваному сигналі, отриманому за допомогою п'єзоелектричного акселерометра при вимірюванні вібраційного прискорення. Ця неінформативна складова у вимірюваному сигналі являє собою постійний рівень, який викликаний генерацією п'єзоелектричним елементом акселерометра додаткового заряду за відсутності дії на нього з блоку об'єкта вимірювань. Зазначений додатковий заряд генерується під впливом флуктуацій температури середовища. Ці температурні флуктуації вносять свою негативну складову в точність акселерометра, збільшуючи похибку результату вимірювань. Чим більшими є їх діапазон коливань по температурі та швидкість зміни температури в часі, тим отримаємо більший вплив на результати вимірювань. Оскільки зміни температури в часі порівняно з частотою вимірюваних вібрацій є процесами значно повільнішими і їх вплив на результат вимірювання є сталим в усьому динамічному діапазоні акселерометра, то вони являють собою адитивну складову похибки цих вимірювань. Для зменшення температурного впливу середовища запропоновано рішення щодо удосконалення п'єзоелектричного акселерометра шляхом введення в його конструкцію елемента компенсації. З метою зменшення впливу температурних флуктуацій середовища на результати вимірювання як елемент компенсації застосовано керований п'єзоелектричний елемент, який працює на зворотному п'єзоефекті уздовж осі поляризації. Керування елементом компенсації здійснюється системою автоматичного регулювання, яка працює за принципом регулювання за відхиленням.

Ключові слова: акселерометр, прискорення, п'єзоелемент, фазовий фільтр, система автоматичного регулювання.

Вступ. В технічних системах при вимірюванні механічних величин особливе місце займають вимірювання таких параметрів, як прискорення, швидкість, переміщення, вібрації. При проведенні вимірювання основною ланкою вимірювальної системи є первинний перетворювач – аналоговий прилад або пристрій, побудований на основі реалізації певних фізичних властивостей і здатний перетворювати вплив з боку вимірюваного параметра у прийнятний для обробки та реєстрації вид. Первинним перетворювачам притаманні вади, які не дають забезпечити необхідну лінійність, точність, стабільність у часі при вимірюванні. Це температурні впливи, вібраційні та електромагнітні завади, кліматичні впливи середовища [3].

П'єзоелектричні акселерометри є найпоширенішими нині приладами, які використовуються для вимірювання прискорень і вібрацій, що пояснюється, перш за все, простотою конструкції, широким частотним і динамічним діапазонами, міцністю, надійністю і стабільністю параметрів цих приладів. Роботи по їх вдосконаленню для підвищення точності та достовірності вимірювань є нагальними та актуальними.

Метою роботи є удосконалення конструкції п'єзоелектричного акселерометра для зменшення похибки, викликані температурним впливом середовища, при проведенні вимірювань вібраційного прискорення.

Основна частина. П'єзоелектричні акселерометри, які працюють за принципом прямого п'єзоефекту: при впливі зовнішньої сили на п'єзоелемент змінюються його геометричні розміри, внаслідок чого на спеціально нанесених електродах генерується заряд, пропорційний діючій силі. Таким чином датчики на базі п'єзоелементів не потребують додаткових джерел живлення, а відсутність рухомих частин забезпечує довговічність і стабільність їх роботи.

Однак п'єзоелектричним акселерометрам притаманні й негативні прояви, не пов'язані з діючим на п'єзоелемент вимірюваним параметром, такі як складові електричної індукції, які виникають під дією зміни темпера-

тури та генерують на вході підсилювача паразитні сигнали. Вони створюють адитивну похибку або похибку нуля п'єзоелектричних датчиків. Особливо ця похибка проявляє себе в умовах температури середовища, що швидко змінюється, при вимірюванні параметрів низькочастотних прискорень і вібрацій.

П'єзоелемент, змінюючи свої геометричні розміри під дією температурних коливань, за відсутності впливів з боку вимірюваного параметра, генерує на своїх електродах заряд [2]. Чим більше коефіцієнт лінійного розширення п'єзоелемента відрізняється від коефіцієнтів лінійного розширення інших елементів конструкції акселерометра (рис. 1), тим більше його доменна структура буде піддаватися механічній напрузі і генерувати додатковий заряд [1]. Цей заряд є нічим іншим, як адитивною складовою похибкою вимірювання п'єзоакселерометра, яка викликана флуктуацією температури середовища.

П'єзоелемент у конструкції п'єзоелектричного акселерометра (рис. 1) встановлений з попереднім напруженням (натягом) F_n , що забезпечується затягуванням болта 5 визначеним моментом. Тоді при дії на акселерометр прискорення a зі змінним напрямом на п'єзоелемент буде діяти сила

$$F = F_n \pm F_m, \quad (1)$$

де $F_m = ma$ – сила, з якою діє на п'єзоелемент інерційна маса m під впливом прискорення a ;

m – інерційна маса;

a – прискорення.

Для знакозмінного прискорення (вібраційне прискорення тощо) вираз (1) можна записати у такому вигляді:

$$F = F_n + F_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де ω – кутова швидкість;

t – час;

φ – початкова фаза вимірювання.

Сила F , яка змінюється за описаним законом (2), викликає генерацію п'єзоелемента заряду Q , величина якого може бути визначена з рівняння для прямого п'єзоефекта:

$$Q = d_{ij}F, \quad (3)$$

де d_{ij} – п'єзомодуль п'єзоелемента.

В нашому випадку розглядається акселерометр, який діє по одній осі – Z , а п'єзоелемент поляризований в напрямі дії сили F , тому робочим є п'єзомодуль d_{33} .

Тоді, підставивши (2) в (3), отримаємо

$$Q = d_{33}(F_n + F_m \sin(\omega t + \varphi)). \quad (4)$$

При цьому в електричному ланцюгу п'єзоелемента – вхідний каскад підсилювача – з'явиться струм I , величина якого буде визначатися виразом

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi))}{dt}. \quad (5)$$

Приведемо рівняння (4) до вигляду

$$Q = d_{33}F_n + d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Очевидно, що при зміні температури середовища буде здійснюватися температурний вплив на доменну структуру п'єзоелемента, що приведе до зміни його геометричних розмірів. Тобто при збільшенні температури сила попереднього напруження збільшиться пропорційно збільшенню лінійних розмірів, а саме висоти п'єзоелемента h_0 , на величину $\Delta F_n(h_0)$:

$$F_n = (F_n + \Delta F_n(h_0)). \quad (7)$$

Враховуючи (7), запишемо (6) у такому вигляді:

$$Q = d_{33}F_n + d_{33} \Delta F_n(h_0) + d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

Введемо такі позначення:

$$Q_0 = d_{33}F_n; \quad Q_t = d_{33} \Delta F_n(h_0); \\ Q_a = d_{33}F_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Тоді (8) буде мати вигляд

$$Q = Q_0 + Q_t + Q_a, \quad (9)$$

де Q_0 – заряд від попереднього напруження пакета;

Q_t – заряд, який залежить від температурного впливу;

Q_a – заряд від дій сил, викликаних дією прискорення.

Деякою мірою нівелювати вплив температури на виникнення механічної напруги в п'єзоелементі можливо шляхом застосування в конструкції акселерометра елемента компенсації, зображеного на рис. 1, а. Елемент компенсації, конструктивно у вигляді шайби, розташований між п'єзоелементом та інерційною масою, які стягнуті в загальний пакет болтом 5. З метою зниження залежності зміни лінійних розмірів пакета від зміни температури цей елемент виконується з матеріалу, коефіціє-

єнт лінійного температурного розширення якого має протилежний знак, ніж у матеріалі п'єзоелемента.

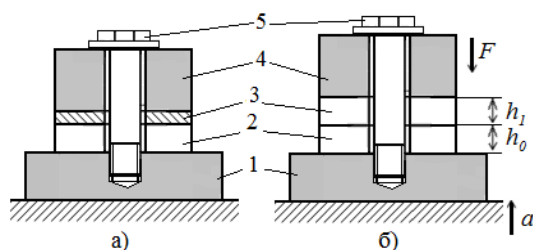


Рисунок 1 – Конструкція п'єзоелектричного акселерометра: 1 – підкладка, 2 – п'єзоелемент, 3 – елемент компенсації, 4 – інерційна маса m , 5 – болт, h_0 – висота п'єзоелемента, h_1 – висота елемента компенсації

Таким чином, при температурних змінах механічне напруження в пакеті залишається сталим. Це рішення має уявну простоту в реалізації, але на практиці дуже важко підібрати або створити композитний матеріал з необхідним значенням коефіцієнта лінійного температурного розширення для виготовлення такого елемента компенсації під необхідну марку п'єзокераміки.

Зважаючи на викладене вище, пропонується рішення по компенсації впливу температури на п'єзоелемент шляхом застосування в конструкції акселерометра елемента компенсації 3 (рис. 1, б). Елемент компенсації – це п'єзоелемент, що працює за принципом зворотного п'єзоефекту уздовж осі поляризації (мода d_{33}). Елементом компенсації керує система автоматичного регулювання, зображена на рис. 2, яка працює за принципом управління за відхиленням. У початковому стані при нормальних значеннях температури ($T = 18 \dots 22^\circ\text{C}$) геометричні розміри, а саме висота п'єзоелемента і висота елемента компенсації, сумарно дорівнюють h :

$$h = h_0 + h_1. \quad (10)$$

Зміна температури середовища, яка діє на п'єзоелемент акселерометра, викликає зміну його геометричних розмірів на величину $\Delta h_0(T)$ за рахунок виникнення сили $F(T)$ як реакції конструкції акселерометра, що веде до появи додаткового заряду та постійної складової на виході вимірювального тракту. Спостерігається так зване відхилення від нуля датчика при відсутності впливу з боку вимірюваного параметра [7, 8].

Для усунення цього ефекту система автоматичного регулювання, аналізуючи рівень постійної складової в комплексному сигналі, який надходить з п'єзоелемента, діє на елемент компенсації управління U (див. рис. 2), що призводить до зміни геометричного розміру елемента компенсації на величину $\Delta h_1(U)$. Таким чином, система управління виконує спостереження за виконанням умови

$$\Delta h_0(T) - \Delta h_1(U) = 0, \quad (11)$$

тоді

$$h = (h_0 + \Delta h_0(T)) + (h_1 - \Delta h_1(U)) \quad (12)$$

і виконується умова: $h = \text{const}$.

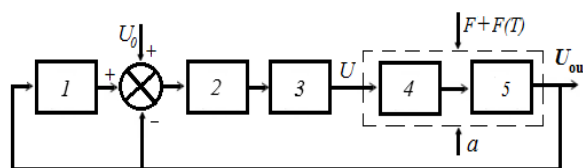


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання

Схема системи автоматичного регулювання, зображена на рис. 2, включає такі елементи:

1. Фазовий фільтр.
2. Інтегратор.
3. Підсилювач потужності.
4. П'єзоелемент-привід.
5. П'єзоелемент-датчик.

Розглянута схема здійснює регулювання за відхиленням, принцип якого полягає в наступному:

- на регулятор подається сигнал відхилення регульованої величини від заданого значення.

- регулятор за сигналом відхилення змінює регулюючу напругу U таким чином, щоб зменшити відхилення $\Delta h_0(T)$.

Необхідно відзначити, що зазначений регулятор змінює регулюючу дію незалежно від причини, що викликала помилку регулювання, і оцінює помилку за рівнем постійної складової в комплексному сигналі. Тому додатково введено корекцію по постійній складовій у вигляді U_0 . Це постійна складова сигналу акселерометра при нормальних значеннях температури притаманна реакції п'єзоелемента на дію сили F_n .

Повністю помилка регулювання в цій системі принципово не усувається, тому що

регулюючий вплив формується тільки помилкою. Помилка буде тим ближче наблизитися до нульового значення, чим точніше буде реалізована схема порівняння.

Схема працює в такий спосіб: при підвищенні температури середовища змінюються геометричні розміри п'єзoeлемента-датчика 5 (рис. 2), що веде до зростання значення постійної складової у вихідному сигналі. Вихідний сигнал надходить на один вхід суматора напряму, а на другий вхід суматора – через фазовий фільтр, який затримує його на 180° . Після суматора постійна складова потрапляє на інтегратор з часом інтегрування, порівняним зі швидкістю зміни температури. Підсилювач потужності 3 керує п'єзoeлементом-приводом 4, прикладаючи до його електродів напругу U , полярність якої спрямована протилежно полярності поляризації. П'єзoeлемент-привід, відпрацьовуючи керуючий вплив, зменшує свій розмір по висоті і наближається до виконання вимог рівняння (1).

Висновок. Запропонований метод корекції генерації паразитного заряду, який виникає при змінах температури і є адитивною складовою похибки при вимірюванні прискорення, є актуальним. Він дає можливість підвищити точність вимірювань, виконуваних за допомогою п'єзoeлектричних акселерометрів, і розширити їх сферу застосування стосовно вимог до температури середовища при проведенні вимірювань прискорень та вібрацій.

Список літератури

1. Антоненко А. М., Кудзин А. Ю., Гавшин М. Г. Влияние доменной структуры на электромеханические свойства сегнетокерамики ЦТС и МНВТ. *Физика твердого тела*. Москва: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1997. Т. 39. № 5.
2. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 1. Физика сегнетоэлектрической керамики / А. В. Гориш, В. П. Дудкевич, М. Ф. Куприянов и др. Москва: Изд. предпр. ред. журн. «Радиотехника», 1999. 368 с.
3. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. Москва: Техносфера, 2006. 632 с.
4. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецов Н. Н. Датчики контроля и регулирования. Москва: Машиностроение, 1965. 914 с., ил.
5. Осадчий Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. Москва: Машиностроение, 1979. 480 с., ил.
6. Острём К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ; пер. с англ. Москва: Мир, 1987. 480 с., ил.
7. Dorf R., Bishop R. Современные системы управления; пер. с англ. Москва: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с., ил.
8. Ким Д. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 220 с., ил.

References

1. Antonenko, A. M., Kudzin A. Yu., Gavshin M. G. (1997). Influence of domain structure on electromechanical properties of PZT and MNWT ferroelectric ceramics. *Fizika tverdogo tela*. Moscow: FTI im. A. F. Ioffe, vol. 39, No. 5 [in Russian].
2. Gorish, A. V., Dudkevich, V. P., Kupriyakov, M. F. et al. (1999). Piezoelectric instrument engineering, vol. 1. Physics of ferroelectric ceramics. Moscow: Izd. predpr. red. zhurn. "Radiotekhnika", 368 p. [in Russian].
3. Sharapov, V. M., Musienko, M. P., Sharapova E. V. (2006). Piezoelectric sensors. Moscow: Technosphere, 632 p. [in Russian].
4. Aheikin, D. I., Kostina, E. N., Kuznetsov, N. N. (1965). Sensors for control and regulation. Moscow: Mashinostroyeniye, 914 p., ill. [in Russian].
5. Osadchiy, E. P. (1979). Design of sensors for measuring mechanical quantities. In E. P. Osadchiy (Ed.). Moscow: Mashinostroyeniye, 480 p., ill. [in Russian].
6. Ostrom, K., Vittenmark, B. (1987). Control systems with computers. Moscow: Mir, 480 p., ill. [in Russian].
7. Dorf, R., Bishop, R. (2002). Modern management systems. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znanij, 832 p., ill. [in Russian].
8. Kim, D. (2003). The theory of automatic control, vol. 1. Linear systems. Moscow: FIZMATLIT, 220 p., ill. [in Russian].

A. L. Perederko, Ph.D.

e-mail: pal88@ukr.net

Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality,
Kovalska str., 15, Odesa, 65020, Ukraine**CORRECTION OF TEMPERATURE INFLUENCE
ON A PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER**

In the article the possibility of compensation of non-informative component in measured signal obtained with the help of a piezoelectric accelerometer in the measurement of vibration acceleration is considered. This non-informative component in measured signal represents a constant level, which is caused by the generation of additional charge by piezoelectric element of the accelerometer in the absence of action on it from the side of the measurement object. The indicated additional charge is generated under the influence of environment temperature fluctuations. These temperature fluctuations add their negative component to the precision of the accelerometer, increasing the error of the measurement result. The greater their range of fluctuations in temperature and the rate of change in temperature over time are, the greater impact on the measurement results is obtained. Since the changes in temperature over time, in comparison with the frequency of measured vibrations, are much slower processes and their impact on the measurement results is constant throughout the dynamic range of the accelerometer, they represent an additive component of the error of the measurements. To reduce the influence of environment temperature, a solution for the improvement of piezoelectric accelerometer by introducing an element of compensation into its construction is proposed. In order to reduce the influence of environment temperature fluctuations on the measurement results, a controlled piezoelectric element which operates on reverse piezoeffect along the polarization axis is used as a compensation element. The control by the compensation element is carried out by automatic regulation system, which operates on the basis of the deviation regulation principle.

Keywords: accelerometer, acceleration, piezoelement, phase filter, automatic control system.