

Головний редактор:
д-р техн. наук Олійник А. П.
Відповідальний секретар:
к. т. н. Незамай Б. С.

Редакційна колегія:
д-р ф.-мат. наук Бандура А. І.
к. техн. наук Воронич А. Р.
д-р техн. наук Горбійчук М. І.
д-р техн. наук Джала Р. М.
д-р техн. наук Древецький В. В.
д-р техн. наук Дьомін Д. О.
д-р техн. наук Заміховський Л. М.
д-р техн. наук Карнаш О. М.
д-р техн. наук Косач Н. І.
к. техн. наук Кучірка Ю. М.
д-р техн. наук Лежнюк П. Д.
д-р техн. наук Лопатін В. В.
д-р техн. наук Лужецький В. А.
д-р ф.-мат. наук Никифорчин О. Р.
д-р техн. наук Осадчий С. І.
д-р техн. наук Пасека М. С.
д-р техн. наук Рудакова Г. В.
д-р техн. наук Семенов Г. Н.
д-р техн. наук Середюк О. Є.
д-р техн. наук Ситник О. С.
д-р техн. наук Сучков Г. М.
д-р техн. наук Учанін В. М.
д-р техн. наук Шекета В. І.
д-р техн. наук Яцук В. О.
PhD, prof. Rzasa Mariusz
DrSc, prof. Wojcik Waldemar
Dr hab, prof. Gerhard Mook

Адреса редакції
76019, Україна, м. Івано-
Франківськ,
вул. Карпатська, 15, Івано-
Франківський національний
технічний університет нафти і
газу
Тел.: (0342) 72-71-68
Факс: (03422) 547-139
E-mail: mmi@nung.edu.ua
<http://www.nung.edu.ua>

Редактори
Н. Р. Стецюк, О. О. Роспопа
Електронна верстка
Б. С. Незамай

Свідоцтво про державну
реєстрацію КВ №15834-4306
ПР від 16.10.2009

Журнал включено до переліку
наукових фахових видань категорії
"Б" на підставі наказу МОН
України від 28 грудня 2019 р.
№ 1643

ЗМІСТ

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О. Г. Бондаренко ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВІДІВ НИЗЬКО-
ЧАСТОТНИМИ СПРЯМОВАНИМИ ХВИЛЯМИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ
РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ..... 5

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

І. З. Лютак, З. П. Лютак, М. М. Яцишин, М. Ю. Чернишов АЛГОРИТМ
ОБЧИСЛЕННЯ ГРУПОВОЇ ТА ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТЕЙ
ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СПРЯМОВАНОЇ МОДИ В
СТІНКАХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ..... 27

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Є. В. Походило, Ю. А. Стасишин ІДЕНТИФІКАЦІЯ ХАРЧОВОЇ
ПРОДУКЦІЇ ЗА ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ..... 36

А. В. Яворський, В. С. Цих, М. О. Карнаш, Л. Я. Жовтуля
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ДЛЯ БУДІВЛІ УНІВЕРСИТЕТУ 46

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В. С. Борин, І. Р. Головач, А. А. Ікалюк РОЗРОБКА
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕТИЛЕНУ 58

О. І. Белей, Л. О. Штаєр ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧОЇ-
ВІЛЬЯМСА У ДОСЛІДЖЕННІ СТАНУ ПІДШИПНИКІВ ГПА..... 66

М. І. Горбійчук, Н. Т. Лазорів, М. І. Козуляк, А. М. Лазорів
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПЕНСАТОРА
ПЕРЕХРЕСНИХ ЗВ'ЯЗКІВ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ 74

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

А. П. Олійник, Л. І. Фешанич, М. Ю. Чернишов МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ТРУБОПРОВІДІВ, ЩО ЕКСАЛУАТУЮТЬ В ПІДЗЕМНОМУ ТА НАДЗЕМНОМУ РЕЖИМАХ 88

Д. О. Паневник МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАНИХ ПОТОКІВ ПРИ ОБЕРТАННІ СВЕРДЛОВИННОЇ ЕЖЕКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ 95

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ 102

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

№ 2 (49) 2022
Published since 1997

Founder:

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Publisher:

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Editor-in-Chief:

A. P. Oliinyk, Dr. of Technical Sciences

Executive Secretary:

B. S. Nezamai, PhD

Editorial Board:

A. I. Bandura, Dr. of Phys. - math. Sc.
A. R. Voronych, PhD
M. I. Horbiichuk, Dr. of Technical Sc.
R. M. Dzhala, Dr. of Technical Sc.
V. V. Drevetskiy, Dr. of Technical Sc.
D. A. Domin, Dr. of Technical Sc.
L. M. Zamikhovskiy, Dr. of Technical Sc.
O. M. Karpash, Dr. of Technical Sc.
N. I. Kosach, Dr. of Technical Sc.
Y. M. Kuchirka, PhD.
P. D. Lezhniuk, Dr. of Technical Sc.
V. V. Lopatin, Dr. of Technical Sc.
V. A. Luzhetskiy, Dr. of Technical Sc.
O. R. Nykyforchyn, Dr. of Phys.-math Sc.
S. I. Osadchyi, Dr. of Technical Sc.
M. S. Pasioka, Dr. of Technical Sc.
A. V. Rudakhova, Dr. of Technical Sc.
G. N. Sementsov, Dr. of Technical Sc.
A. A. Sytnyk, Dr. of Technical Sc.
H. M. Suchkov, Dr. of Technikal Sc.
V. M. Uchanin, Dr. of Technical Sc.
V. I. Sheketa, Dr. of Technical Sc.
V. A. Yatsiuk, Dr. of Technical Sc.
Rzasa Mariusz, PhD.
Wojcik Waldemar, Dr. Sc.
Gerhard Mook, Dr.hab.

Address

Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas,
15 Carpathian str., 76019, Ivano-
Frankivsk, Ukraine
Tel.: (0342) 72-71-68,
Fax: (0342) 545826
E-mail: mmi@nung.edu.ua
<http://www.nung.edu.ua>

Editors

N.R. Stetsiuk, O.O. Rospopa
Electron galley
B.S. Nezamai

State Registration Certificate
KB № 15834 - 4306 Regions
Of 16.10.2009

The journal is included in the list of
scientific professional publications of
category "B" on the basis of the order
of the Ministry of Education and
Science of Ukraine dated
December 28, 2019.
No 1643

CONTENT

METHODS AND EQUIPMENT OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

O. G. Bondarenko FEATURES OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF TECHNOLOGICAL PIPELINES BY LOW-FREQUENCY DIRECTED WAVES ON THE BASIS OF THEORY PATTERN RECOGNITION..... 5

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

I. Z. Liutak, Z. P. Liutak, M. M. Yatsyshyn, M. Yu. Chernyshov ALGORITHM FOR CALCULATING GROUP AND PHASE PROPAGATION VELOCITIES OF ULTRASONIC DIRECTED MODES IN THE WALLS OF METAL STRUCTURES 27

METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

Ye. V. Pokhodylo, Yu. A. Stasyshyn IDENTIFICATION OF FOOD PRODUCTS BY ELECTRICAL PARAMETERS 36

A. V. Yavorskiy, V. S. Tsykh, M. O. Karpash, L. Ya. Zhovtulia INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR MONITORING THE CONSUMPTION OF ENERGY RESOURCES FOR THE UNIVERSITY BUILDING 46

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

V. S. Boryn, I. R. Holovach, A. A. Ikaliuk DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ETHYLENE PRODUCTION 58

O. I. Belei, L. O. Shtaiier CHOI-WILLIAMS TRANSFORM USAGE IN THE INVESTIGATE OF BEARINGS STATE OF GAS PUMPING UNIT..... 66

M. I. Horbiichuk, N. T. Lazoriv, M. I. Kohutiak, A. M. Lazoriv RESEARCH OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE COMPENSATOR OF CROSS-CONNECTIONS OF THE AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM 74

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE UNDESTROYED CONTROL PROBLEMS

A. P. Oliinyk, L. I. Feshanych, M. Yu. Chernyshov MATHEMATICAL MODELING OF THE DEFORMATION PROCESS OF PIPELINES OPERATING IN UNDERGROUND AND ABOVE-GROUND MODES89

D. O. Panevnyk MATHEMATICAL MODEL OF KINEMATIC PARAMETERS CONTROL OF MIXED FLOWS DURING THE WELL EJECTION SYSTEMS ROTATION95

REQUIREMENTS FOR THE ARTICLE.....102

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 621.691.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-5-26

ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ НИЗЬКОЧАСТОТНИМИ СПРЯМОВАНИМИ ХВИЛЯМИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

О. Г. Бондаренко

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
вул. К. Малевича, 11, м. Київ-150, 03650, Україна, e-mail: usunat@ukr.net*

На основі розробленої класифікації відбивачів низькочастотної ультразвукової спрямованої хвилі обґрунтована класифікація множини контрольних образів відбивачів технологічного трубопроводу, які розділені на відповідні підмножини контрольних образів, що відносяться до трьох кластерів (груп). Складовими кластерів є підмножини контрольних образів, що відображають відповідно технологічні, конструктивні та експлуатаційні відбивачі технологічного трубопроводу. Підмножини контрольних образів кожного кластеру розділені відповідно на симетричні та асиметричні. Для застосування теорії розпізнавання образів у процедурі діагностування технічного стану технологічного трубопроводу системами низькочастотного контролю спрямованими хвилями визначено основні поняття суті контрольних та діагностичних образів, ознаки наведених образів стосовно експлуатаційних відбивачів трубопроводу.

На основі аналізу експериментальних досліджень, наведених у зарубіжних наукових виданнях, визначено розв'язуючі межі ознак діагностичних образів, які прийняті в системах низькочастотного контролю спрямованими хвилями протяжних трубопроводів і які відповідають втратам металу в поперечному перерізі стінки труби, що дозволяють розділити ознаки контрольних образів експлуатаційних відбивачів на три класи. Такі розділюючі межі визначені на рівні 9 % та 12 % втрат металу в поперечному перерізі стінки труби.

Виконано аналіз процедури контрольньо-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічних трубопроводів з застосуванням систем низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями, яка ґрунтується на операції ідентифікації втрат металу стінки труби протягом часу експлуатації трубопроводу. Розроблена структурна схема процедури контрольньо-діагностичного процесу, в основу якої покладено правило порогової ідентифікації дефектів з використанням логічної двійкової системи кодування інформації, що реалізується за допомогою порогових елементів.

Описано спосіб попереднього представлення підмножин контрольних образів, отриманих від технологічних і конструктивних відбивачів трубопроводу, та підмножини експлуатаційних контрольних образів, розділених на три класи, що знайшли своє відображення при розробці формату шкали численних, накладених один на одного, А-сканів на дисплеї системи Teletest при контролі дільниці трубопроводу.

Проаналізовано особливості ідентифікації втрат металу у поперечному перерізі стінки труби через наявність дефекту. Показано, що за даними контролю технічного стану трубопроводу з використанням системи низькочастотного контролю спрямованими хвилями неможливо обґрунтувати інформацію про глибину ураження стінки труби, яку можуть дати тільки фізичні методи вимірювання товщини стінки за допомогою засобів товщинометрії. Розроблена схема алгоритму оцінки втрат металу стінки труби, яка ілюструє, що висновок про наявність дефекту та ступінь ураження стінки труби з використанням системи низькочастотного контролю спрямованими хвилями роблять за амплітудою відбитого сигналу. Але така оцінка є не прямою, тобто якісною. Величина потоншення стінки труби, виміряна товщинометром, є прямою, тобто кількісною. Між ними немає прямої кореляції, тому що використовуються різні фізичні способи та засоби оцінки.

Ключові слова: розпізнавання образів, розв'язуюча межа, контрольний образ, діагностичний образ, контрольньо-діагностичний процес, ідентифікація дефектів.

Based on the analysis of theoretical foundations and practical aspects of methods and basic principles of image recognition systems in various fields of science and technology, the essence of the basic concepts of image recognition methodology in relation to its use in assessing the technical condition of industrial facilities by non-destructive testing and technical diagnostics. The essence of the concept of "image" and its use in sonar to obtain images of acoustic images in the detection of submarines and registration of seismic signals in the search for oil fields. The mathematical problem of classification of images based on separate functions is given, which consists in division of all space of signs of images to corresponding classes with application of elements of threshold logic on dividing borders between classes.

Based on the developed classification of reflectors of low-frequency ultrasonic directional wave, the classification of the set of control images of reflectors of the process pipeline is substantiated, which are divided into corresponding subsets of control images belonging to three clusters (groups). Components of clusters are subsets of control images that reflect, respectively, technological, structural and operational reflectors of the technological pipeline. The subsets of control images of each cluster divided into symmetric and asymmetric, respectively. To apply the theory of pattern recognition in the procedure of diagnosing the technical condition of the technological pipeline by low-frequency control systems with directional waves, the basic concepts of control and diagnostic images, features of these images in relation to operational reflectors of the pipeline.

Based on the analysis of experimental studies presented in foreign scientific journals, the defining boundaries of diagnostic image features, which adopted in low-frequency control systems by directional waves of long pipelines and which correspond to metal losses in the cross section of the pipe wall in three classes. Such separating limits are set at 9% and 12% of metal losses in the cross section of the pipe wall.

The analysis of the procedure of control and diagnostic process in determining the technical condition of technological pipelines using low-frequency ultrasonic control systems by directional waves, which is based on the operation of identifying metal losses of the pipe wall during the operation of the pipeline. The structural scheme of the procedure of control-diagnostic process developed, which based on the rule of threshold identification of defects with the use of logical binary information coding system, which realized by means of threshold elements.

The method of preliminary presentation of subsets of control images obtained from technological and structural reflectors of the pipeline and subsets of operational control images divided into three classes described in the development of the scale format of numerous superimposed A-scans on the «Teletest» display, control of the pipeline section.

Features of identification of metal losses in the cross section of the pipe wall due to the defect analyzed. It is shown that according to the control of the technical condition of the pipeline using low-frequency control system by directional waves it is impossible to substantiate information about the depth of the pipe wall, which can only give physical methods of measuring wall thickness using thickness gauges. A scheme of the pipe wall metal loss estimation algorithm has been developed, which illustrates that the conclusion about the presence of a defect and the degree of damage to the pipe wall using a low-frequency directional wave control system is based on the amplitude of the reflected signal. However, such an assessment is not direct, ie qualitative. The amount of thinning of the pipe wall, measured by a thickness gauge, is direct, ie quantitative. There is no direct correlation between them, because different physical methods and means of evaluation are used.

Key words: pattern recognition, delimiter, control image, diagnostic image, control-diagnostic process, defect identification.

Вступ. На даний час у різних галузях промисловості України знаходиться в експлуатації велика кількість різноманітних відповідальних промислових об'єктів, які в значній мірі потребують проведення процедур оцінки їх технічного стану з метою продовження ресурсу подальшої експлуатації. Серед таких відповідальних об'єктів значну кількість складають технологічні трубопроводи, що постійно потребують забезпечення необхідної працездатності. Це можна досягнути шляхом застосування процедур неруйнівного контролю, діагностування технічного стану та їх періодичного моніторингу в процесі експлуатації.

В роботі [1] наведена спрощена класифікація найбільш поширених технологічних трубопроводів із труб середнього діаметра, виконано аналіз різноманітних пасивних і активних, локальних і регіональних методів неруйнівного контролю, що застосовуються для виявлення дефектів у технологічних трубопроводах. Серед активних регіональних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів виділено акустичний кореляційний метод та метод низькочастотного контролю направленими спрямованими хвилями. Наведена також класифікація основних типових відбивачів у структурі технологічних трубопроводів, які

поділені на технологічні, конструктивні та експлуатаційні. Останні як несучільності виникають в стінці труби технологічного трубопроводу в процесі експлуатації і є предметом виявлення при застосуванні систем низькочастотного УЗК спрямованими хвилями. Отримана при цьому інформація про несучільності стінки труби може бути використана для встановлення діагнозу, тобто для визначення технічного стану трубопроводу, в якому він знаходиться в момент часу проведення контролю. Саме дані процесу неруйнівного контролю, які дають можливість отримати інформацію про технічний стан технологічного трубопроводу для оцінки можливості продовження ресурсу його експлуатації, відносяться до процесу технічного діагностування його стану.

Таким чином, неруйнівний контроль та технічне діагностування – це процеси, за допомогою яких з використанням теорії, методів і засобів, що складають основу технічної діагностики, у кільцевому результаті можна отримати інформацію про технічний стан технологічного трубопроводу, який знаходиться в експлуатації, та у першому наближенні оцінити його залишковий ресурс.

Відомо, що впродовж всього строку експлуатації любого технічного об'єкта здійснюється необхідний об'єм дій, визначений технічною документацією на об'єкт, у результаті чого він виконує свої функції. В процесі здійснення таких дій методами і засобами неруйнівного контролю можуть визначатися характеристики об'єкта контролю, так звані контрольні ознаки – несучільності в матеріалі об'єкта, що виникають в процесі його виготовлення та експлуатації і підлягають виявленню під час контролю. Таким чином, неруйнівний контроль – це визначення за контрольними ознаками з використанням відповідних методів і засобів наявних несучільностей в об'єкті контролю та визначення окремих із них в якості дефектів.

Необхідність переходу від процесу неруйнівного контролю до процесу технічного діагностування стану об'єкта приводить до пошуку діагностичних ознак, які відображають геометричні параметри дефектів згідно з прийнятою класифікацією дефектів, що дозволяє оцінити рівень технічного стану об'єкта діагностування.

Саме тому всі методи і засоби технічної діагностики та дані процесу неруйнівного контролю об'єкта, які надають можливість отримати інформацію про технічний стан об'єкта для оцінки можливості продовження ресурсу його експлуатації, відносяться до технічного діагностування. Таким чином, технічне діагностування – це методологія визначення технічного стану об'єкта з метою оцінки його технічної безпеки і прогнозування ресурсу його експлуатації. Саме визначення відповідності об'єкта вимогам промислової безпеки шляхом оцінки його технічного стану є головною задачею технічного діагностування [2].

Основою процесу технічного діагностування прийнято вважати загальну теорію розпізнавання, яка складає важливий розділ технічної кібернетики і займається розпізнаванням образів любой природи і характеру. В цілому термін «розпізнавання образів» визначає різноманітне поле діяльності, пов'язане як з реальними життєвими потребами (розпізнавання людьми і тваринами «образів» в оточуючому їх середовищі), так і з вирішенням наукових і технічних задач.

Сутність основних положень теорії розпізнавання образів при діагностуванні технічного стану промислових об'єктів. Теорія розпізнавання образів вивчає методи одержання та оцінки діагностичної інформації, діагностичні моделі, алгоритми розпізнавання та прийняття рішень стосовно до задач діагностування технічного стану промислових об'єктів, часто в умовах обмеженої інформації, коли необхідно удаватися до використання певних прийомів і правил для прийняття рішень. Щодо процесу технічного діагностування при визначенні стану промислових об'єктів основні етапи його проведення включають необхідність виконання операції класифікації дефектів з точки зору їх небезпеки, визначення основних діагностичних ознак дефектів відносно класів, алгоритмів розпізнавання дефектів при прийнятті рішень, що дозволить отримати кількісну інформацію щодо належності дефектів до кожного класу, виконати оцінку технічного стану об'єкта та обґрунтувати прогноз щодо можливого ресурсу його експлуатації.

Алгоритм розпізнавання містить сукупність послідовних безумовних дій в процесі діагностування технічного стану об'єкта, в результаті чого технічний стан об'єкта може бути віднесений до одного із можливих класів (діагнозів). У більшості задач технічного діагностування класи (діагнози) встановлюються заздалегідь, і в цих умовах задачу розпізнавання називають задачею класифікації.

У цьому випадку алгоритми розпізнавання частіше всього групуються на діагностичних моделях, які встановлюють зв'язки між станами технічної системи та їх відображеннями у просторі діагностичних образів. Важливою частиною проблеми розпізнавання є прийняття рішень, для чого використовуються розв'язуючі правила. Суттєвою частиною процесу розпізнавання є вибір діагностичних образів, які описують стан об'єкта. Діагностичні образи повинні бути достатньо інформативними, щоби при вибраному числі діагнозів процес розпізнавання технічного стану об'єкта міг бути здійсненим.

Аналіз теоретичних основ та практичних аспектів методів й основних принципів побудови систем розпізнавання образів у різних галузях науки та техніки показує, що існують три основні типи методології: евристична, математична та лінгвістична (синтаксична) [3].

При вирішенні задач із застосуванням методів розпізнавання образів у техніці використовуються математичні методи, в основу яких покладені правила класифікації. Ці методи побудови систем розпізнавання образів можна розділити на два класи: ймовірнісні (статистичні) і детерміністичні.

Постановка задачі розпізнавання образів при ймовірнісних методах така. Існує технічний об'єкт, який знаходиться в одному із n випадкових станів D_i . Відома сукупність діагностичних образів, кожний із котрих з визначеною ймовірністю характеризує стан об'єкта. Необхідно побудувати розв'язуюче правило, за допомогою якого пред'явлена (діагностуєма) сукупність контрольних образів була б віднесена до одного із можливих діагнозів (станів) об'єкта.

При детерміністичних методах розпізнавання зручно формулювати задачу на геометричній мові. Якщо технічний об'єкт характеризується n -мірним фактором X , то

любий стан об'єкта представляє собою точку в n -мірному просторі параметрів (діагностичних образів). Передбачається, що діагноз D_i відповідає деякій області простору образів, що розглядається. Необхідно визначити розв'язуючі правила, у відповідності з якими пред'явлений вектор X^* (діагностуємий об'єкт) буде віднесено до визначеної області діагнозу. Таким чином задача зводиться до поділу простору образів на області діагнозів (класів).

При детерміністичному підході області діагнозів зазвичай вважаються «неперетинними», тобто ймовірність одного діагнозу, в область якого попадає точка, дорівнює одиниці, а ймовірність інших дорівнює нулю. Подібним чином передбачається, що і кожний образ або зустрічається при цьому діагнозі, або відсутній.

У подальшому розглядається можливість застосування детерміністичного підходу в задачі розпізнавання образів у процедурі діагностування технічного стану технологічних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями.

Для цього визначимо, яка інформація за змістом була вкладена в поняття «образ» з самого початку його застосування в неруйнівному контролі. В найбільш загальному розумінні образ – це деяка множина одночасних спостережень, якій можна поставити у відповідність вектор

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

компонентами якого є крім спостереження, взяті в сукупності [4].

Першими системами, призначеними для отримання образів акустичних зображень, були гідролокатори для виявлення підводних човнів та реєстрації сейсмічних сигналів при пошуку родовищ нафти [5]. Обидві системи випромінювали акустичні імпульси й приймали відбиті сигнали, дозволяючи вирахувати відстань у часі приходу відбитого сигналу. Метод гідролокації підводних човнів приводить у цілому до отримання одновимірних результатів. Саме принцип гідролокації був застосований у неруйнівному контролі об'єктів та в медицині для дослідження стану людини.

Задача розпізнавання образів полягає в класифікації деякої групи об'єктів на основі визначених вимог. Об'єкти, що відносяться до одного класу образів, мають спільні властивості.

Вимоги, що визначають класифікацію, можуть бути різними, тому що у відмінних ситуаціях виникає необхідність у різноманітних типах класифікацій.

У цілому задачі, що виникають при побудові систем розпізнавання образів, можна розділити на такі [6, 7].

Першою можна вважати задачу визначення того, які вимірювання повинні бути виконані над вхідним образом, де кожна вимірювана величина – деяка характеристика процесу, або ознака образу. Критерій відбору ознак ґрунтується на важливості ознак для характеристики образу або на впливі даних ознак на якість розпізнавання, тобто на точність розпізнавання.

Другою важливою задачею розпізнавання образів слід вважати класифікацію, тобто прийняття рішення про належність вхідних образів тому чи іншому класу, яке ґрунтується на вимірюваннях відібраних ознак. Ознаки класу образів уявляють собою характерні властивості, загальні для всіх образів цього класу. Ознаки, що характеризують відмінності між окремими класами, інтерпретуються як міжкласові ознаки.

Наступна важлива задача теорії розпізнавання образів полягає у пошуку оптимальних алгоритмів розрахунку, необхідних для класифікації та інтерпретації результатів. Одним із ефективних підходів до розв'язання задачі розпізнавання образів є метод, пов'язаний з використанням системи лінійних відокремлюючих функцій [4, 6 – 8]. Саме за допомогою відокремлюючих функцій формулюється математична задача класифікації образів, яка полягає у віднесенні всього простору ознак образу до відповідних класів. Це можна трактувати як розбиття простору ознак на взаємно неперетинні області, кожна із яких відповідає деякому класу ознак образу.

Загалом вектор X за виразом (1), що носить назву вектору ознак, можна розглядати як вектор ознак у просторі множини ознак Ω_x . Математична задача класифікації ознак образу за допомогою відокремлюючих функцій формулюється таким чином [6].

Хай $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$ позначають m можливих класів ознак, що підлягають розпізнаванню за виразом (1), де x_i уявляє собою i -у ознаку.

Тоді відокремлююча функція $D_j(X)$, яка відноситься до класу ознак ω_j , $j = 1, 2, \dots, m$, така, що якщо вхідна множина ознак, що являє собою вектор X , належить класу ω_i , то величина $D_i(X)$ повинна бути найбільшою. Хай $X \in \omega_i$ значить, що вектор ознак X належить класу ω_i . Тоді можна записати, що для всіх $X \in \omega_i$ критерій сортування ознак буде визначатися набором відокремлюючої функції $D_i X > D_j(X)$, для всіх $i, j = 1, \dots, m, i \neq j$. (2)

Таким чином, у просторі ознак Ω_x межа розбиття, що носить назву розв'язуючої межі, між областями, які відносяться відповідно до класу ω_i та класу ω_j , буде виражатися рівнянням:

$$D_i(X) - D_j(X) = 0. \quad (3)$$

Узагальнена схема класифікатора, в основу якого покладено критерій (3), наведена на рис. 1.

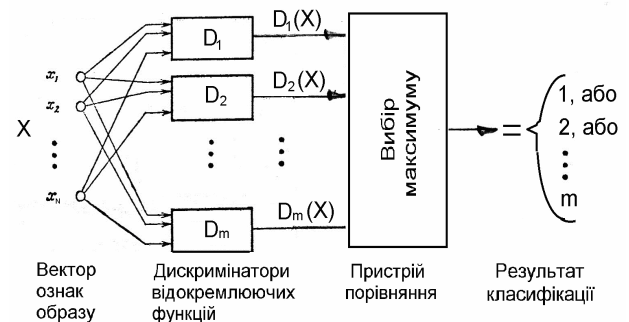


Рисунок 1 – Узагальнена схема класифікатора

Наведений класифікатор у загальному випадку являє собою пристрій, що відносить кожен поступаючу на його вхід допустиму множину ознак образу до одного із кінцевого числа класів, вирахувавши при цьому множину відокремлюючих функцій. Класифікація виконується шляхом знаходження максимальних відокремлюючих функцій. Таким чином, класифікатор виносить рішення, що стосується класу, до якого відноситься ознака, й тим самим реалізує відображення m класів.

Можна вибрати багато різноманітних форм відокремлюючих функцій $D_i(X)$, які задовольняють умови (2). Ми ж надалі будемо розглядати тільки лінійні системи. На рис. 2

наведено типовий приклад застосування розділення двомірного простору ознак на класи відокремленої функції $D_i(X)$ при визначенні [6].
 простої розв'язуючої межі для випадку

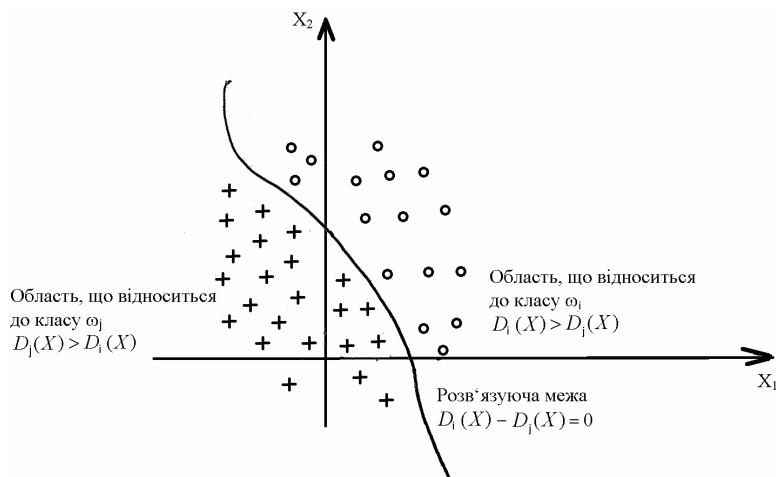


Рисунок 2 – Приклад простої розв'язуючої межі для випадку розділення двомірного простору ознак на класи ω_i та ω_j

Простий варіант двомірної лінійної відокремлюючої функції можна узагальнити на N-вимірний випадок розпізнавання образів. У цьому випадку в якості функції $D_i(X)$ береться лінійна комбінація ознак x_1, x_2, \dots, x_N . Тоді вид лінійної відокремлюючої функції запишеться формулою [3]:

$$D_i(X) = w_{1i} \cdot x_1 + w_{2i} \cdot x_2 + \dots + w_{ki} \cdot x_N + w_{i,N+1}, \quad (4)$$

де w_1, w_2, \dots, w_k - вагові коефіцієнти;

x_1, x_2, \dots, x_N - змінні вимірні характеристики ознак.

Формулу (4) можна записати у вигляді [6]:

$$D_i(X) = \sum_{k=1}^N w_{ki} \cdot x_k + w_{i,N+1}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Розв'язуюча межа між областями ω_i та ω_j для множини ознак Ω_x буде мати вигляд:

$$D_i(X) - D_j(X) = \sum_{k=1}^N w_k \cdot x_k + w_{N+1} = 0, \quad (6)$$

де $w_k = w_{ik} - w_{jk}$; $w_{N+1} = w_{i,N+1} - w_{j,N+1}$

Рівняння (6) являє собою рівняння гіперплощини у просторі ознак Ω_x .

Найпростішим є лінійний класифікатор, що складається із двох класів, тобто $m = 2$. Тоді, згідно (5), $i, j = 1, 2 (i \neq j)$. В цьому випадку в якості класифікатора, що використовує лінійну відокремлюючу функцію, застосовується елемент порогової логіки. На рис. 3 наведено схему лінійного класифікатора двох класів [6].

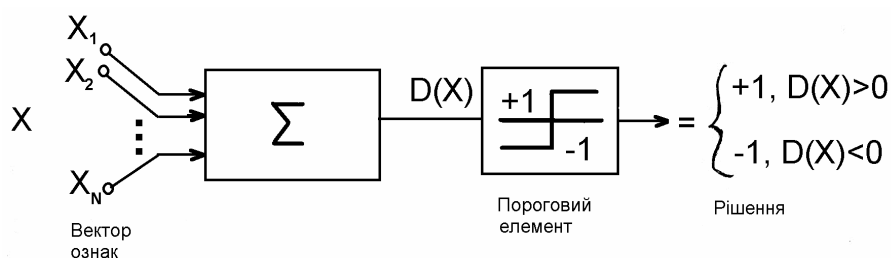


Рисунок 3 – Схема лінійного класифікатора двох класів

Прийнявши, що відокремлююча функція $D(X) = D_1(X) - D_2(X)$, отримуємо, що: якщо вихідний сигнал = +1, тобто при $D(X) > 0$, то $X \in \omega_1$; якщо вихідний сигнал = -1, тобто при $D(X) < 0$, то $X \in \omega_2$.

Таким чином, класифікатор для двох класів можна розглядати як пристрій, що вираховує єдину відокремлюючу функцію $D(X)$ і класифікує X у відповідності з алгебраїчним знаком результату згідно рис. 3.

У такому лінійному класифікаторі ознаки, що характеризують об'єкт, відносяться до логічних (детермінованих), які можна розглядати як елементарні висловлювання, що можуть приймати два значення істинності виду «так» та «ні» з повною невизначеністю.

В технічній діагностиці по схемі цього класифікатора приймається рішення про розмежування виявлених при ультразвуковому неруйнівному контролі дефектів на «допустимі» та «недопустимі», використовуючи порогове значення дефекту. Для порівняння сигналів від дефектів використовується індикація від еталонного дефекту.

Саме цей найпростіший підхід до розпізнавання образів, що полягає в порівнянні з еталонами, використовується в теорії розпізнавання, коли деяка множина еталонів образів для кожного класу зберігається в системі розпізнавання [3, 6]. Вхідний образ, що розпізнається, порівнюється з еталоном кожного класу. Це означає, що класифікація образів ґрунтується на заздалегідь вибраних еталонах образів. Іншими словами, якщо вхідний образ краще відповідає еталону i -го класу образів, ніж іншому будь-якому еталону, то вхідний образ класифікується таким, що належить до i -го класу образів. У свою чергу підхід порівняння вхідних образів з еталонами вимагає вибору підходящих еталонів у залежності від практичного застосування теорії розпізнавання образів у різних сферах.

Класифікація контрольних образів відбивачів та визначення основних понять ознак образів при технічному діагностуванні стану технологічних трубопроводів. Відомо, що дослідження будь-якого явища, як правило, починається з класифікації. Будь-які факти та явища повинні бути упорядковані, перш ніж ми

зможемо їх зрозуміти та розробити загальні принципи, які пояснюють їх появу та очевидний порядок. З цієї точки зору стверджується, що саме класифікація є одним із фундаментальних процесів у наукових дослідженнях і тому вважається інтелектуальною діяльністю високого рівня, необхідного нам для розуміння природи любого факту та явища. Але оскільки класифікація – це упорядкування об'єктів за їх подібністю, а об'єктом можна назвати все що завгодно, включаючи процеси, дії та характеристики, то можна прийти до висновку, що класифікація не обмежується рамками людського інтелекту і в дійсності є фундаментальними властивостями всіх живих організмів.

Вирішення задачі застосування теорії розпізнавання образів при діагностуванні технічного стану технологічних трубопроводів з використанням систем низькочастотного УЗК спрямованими хвилями вимагає розробки класифікації образів відбивачів технологічного трубопроводу, класифікація яких наведена в роботі [1].

В процесі акустичної локації середовища стінки труби технологічного трубопроводу низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями з однієї точки встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени результатом локації буде множина відбитих від усіх відбивачів технологічного трубопроводу сигналів, які можна назвати контрольними образами. Всю множину $\{A\}$ одночасно отриманих контрольних образів від усіх відбивачів, узятих у сукупності, можна розділити на три кластери (групи), складовими яких будуть підмножини контрольних образів, отриманих відповідно від технологічних, конструктивних та експлуатаційних відбивачів технологічного трубопроводу.

До першого кластера буде віднесена підмножина $\{A_t\}$ контрольних образів, отриманих від технологічних відбивачів, яка в свою чергу може бути розділена на контрольні образи від симетричних та асиметричних відбивачів. Другий кластер буде включати підмножину $\{A_k\}$ контрольних образів від конструктивних відбивачів трубопроводу, яка також буде складатися із контрольних образів від симетричних та асиметричних відбивачів. Місця розміщення технологічних і

конструктивних відбивачів відомі згідно з технічною документацією на трубопровід й тому контрольні образи таких відбивачів можуть бути легко виділені із усієї множини $\{A\}$ контрольних ознак відбивачів, отриманих на контрольованій ділянці трубопроводу низькочастотними спрямованими хвилями.

Нарешті, третій, найбільш важливий кластер з точки зору процедури діагностування технічного технологічного трубопроводу, складає підмножина $\{A_e\}$ контрольних образів від експлуатаційних відбивачів, яка також включає контрольні образи від асиметричних

(дефектів стінки труби) та симетричних (дефекти зварних з'єднань труб) відбивачів. До дефектів стінки труби відносяться корозійні пошкодження та ерозійні стоншення металу у поперечному перерізі стінки труби. Контрольні образи цих дефектів на контрольованій ділянці трубопроводу розмішуються випадково, але контрольні ознаки будуть опосередковано давати інформацію про розміри дефектів стінки труби.

На рис. 4 наведена класифікація контрольних образів технологічного трубопроводу.



Рисунок 4 – Класифікація контрольних образів відбивачів технологічного трубопроводу

Наведені на рис. 4 розподілення множини $\{A\}$ контрольних образів відбивачів технологічного трубопроводу на мові образів називається алфавітом кластерів, до яких віднесені відповідні підмножини контрольних ознак відбивачів. Характерною ознакою наведеного розділення контрольних ознак є те, що для розпізнавання типу відбивачів використовується однотипна інформація, тобто контрольні образи, які мають одну фізичну природу – відбиті від відбивачів електричні сигнали.

При проведенні процедури діагностування технічного стану технологічних трубопроводів з

використанням системи низькочастотного ультразвукового контролю нас найбільше буде цікавити кластер підмножини контрольних образів від експлуатаційних відбивачів, за параметрами яких будуть прийматися рішення про технічний стан трубопроводу. Визначення контрольних образів експлуатаційних відбивачів необхідно також для того, щоби мати хоча б якийсь уявлення про закономірність зміни у часі втрат металу у поперечному перерізі стінки труби із-за корозійного пошкодження та ерозійного зношення для кожного конкретного технологічного трубопроводу, щоби можна було зробити висновок про його технічний стан.

Для застосування теорії розпізнавання у процедурі діагностування технічного стану технологічних трубопроводів визначимо основні поняття контрольних та діагностичних образів, які будуть використовуватися у процедурі діагностування.

Контрольний образ – підмножина $\{Ae\}$ відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей труби, що відображають у відсотках втрати металу стінки труби внаслідок корозійного пошкодження або ерозійного її зношення.

Ознака контрольного образу – підмножина амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей стінки труби. Саме підмножина амплітуд відбитих сигналів у відсотках втрати металу буде характеризувати технічний стан трубопроводу й дозволяє розділити контрольні образи на класи. У закордонних системах низькочастотного УЗК підмножину відбитих сигналів стосовно відсотків втрати металу стінкою труби розділено на три класи: незначні, помірні, серйозні.

Діагностичний образ – підмножина відбитих сигналів від штучних несучільностей стінки труби, що відображають у відсотках втрати металу стінки та визначають відповідні розв'язуючі межі між обґрунтованими класами дефектів стінки труби.

Ознака діагностичного образу – підмножина амплітуд відбитих сигналів від штучних несучільностей стінки труби, які визначають пороги ідентифікації дефектів між класами на відповідній розв'язуючій межі.

Інформативний параметр процесу діагностування технічного стану трубопроводу – значення залишкової частини амплітуди відбитого сигналу контрольного образу від експлуатаційної несучільності, яке виникає після автоматичного порівняння (розпізнавання) амплітуди контрольного образу з амплітудою (порогом) діагностичного образу на визначеній розв'язуючій межі та буде віднесене до відповідного класу дефектів стінки труби.

Визначення підмножини діагностичних образів на розв'язуючих межах між класами контрольних образів. Для виконання процедури діагностування технічного стану технологічних трубопроводів на базі підмножини амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей шляхом

розбиття контрольних образів на класи в залежності від ступеня втрати металу стінки труби в закордонних системах низькочастотного УЗК було застосовано спосіб виготовлення штучних дефектів стінки труби та проведення експериментальних досліджень з визначення ознак діагностичних образів на розв'язуючих межах між класами ознак контрольних образів.

Найбільш вагові дослідження у цьому напрямку були приведені в Англії фірмою Plant Integrity Limited, яка одна з перших розробила систему та технологію далекодійного низькочастотного діагностування технічного стану протяжних трубопроводів типу Teletest [9]. Роботи з визначення класів ознак контрольних образів експлуатаційних відбивачів проводилися на основі експериментів шляхом визначення залежності амплітуди відбитого сигналу від величини втрати металу в поперечному перерізі стінки труби, які задавалися механічним шляхом.

Дослідження базувалися на способі оцінки чутливості технології низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями при визначенні зовнішньої корозії труби під ізоляцією та внутрішньої корозії труби. Експерименти проводилися на системних трубопроводах з ізоляцією на технологічних трубопроводах діаметром 50 – 300 мм [9, 10]. Мінімальною необхідною чутливістю було визначення корозії на глибину 50 % товщини стінки, а також області $D/2 \times D/2$ (D – діаметр труби), що становило приблизно 9 % площі поперечного перерізу труби на відстані не менш 15 м від місця установки перетворювачів акустичної антени. Оскільки корозію можна розглядати як глибокі виїмки невеликої площі, то в процесі досліджень ставилося також завдання перевірити чутливість методу при визначенні корозії глибиною 50 % товщини стінки й області $3t \times 3t$ (t – товщина стінки труби), що становило приблизно 3 % площі поперечного перерізу стінки труби.

Експериментальні дослідження ґрунтувалися на використанні різних моделей несучільностей стінки труби, виготовлених механічним шляхом, в результаті чого було встановлено, що спрямовані хвилі, які розповсюджуються в трубопроводі, можуть

бути застосовані для визначення корозійного ураження стінки труби.

У роботі [9] наведені результати теоретичних і практичних досліджень для визначення відбиттів від втрат поперечного перерізу труби діаметром 76 мм. Частота збуджуваного сигналу становила 70 кГц. При дослідженні використовувалися штучні дефекти у вигляді паза 50 % товщини стінки як функція довжини окружності й паза шириною більше 11 % довжини окружності як функція глибини дефекту. Потім ці дослідження були розширені й на більший розмірний діапазон дефектів, забезпечуючи, таким чином, пакет даних про знайдені відбиття. На рис. 5 наведена середня залежність між амплітудою відбитого сигналу й площею дефекту як пропорцією поперечного перерізу стінки труби.

Можна помітити, що не всі кружечки, що відповідають амплітуді відбитого сигналу при одній і тій же площі дефекту, лежать на середній лінії. Було висловлене припущення, що глибокі дефекти з малою довжиною по окружності труби дають більше відбиття, чим довгі по окружності, але неглибокі тієї ж площі. Це теоретичне припущення було експериментально перевірене на трубах діаметром 76 і 200 мм, що містять штучні дефекти у вигляді пазів відомих площ поперечного перерізу. У більшості випадків практичні результати були близькі до прогнозованого. Тому наведена на рис. 5 залежність була використана як база для опису чутливості методу УЗК спрямованими хвилями в системі Teletest [9]. Із залежності рис. 5 видно, що в діапазоні від 15 до 50 % площі пошкодженого дефектом поперечного перерізу труби крива чутливості змінюється більш плавно. У діапазоні від 3 до 9 % чутливість методу проявляється сильніше.

Підтвердження про можливість за допомогою довгохвильового УЗК виявляти невеликі втрати металу на рівні 3 % поперечного перерізу труби наведені в більш ранній роботі [10]. У роботі [11] також підтверджується можливість прийому відбитого сигналу від реального еталонного відбивача на рівні 4 % дефектності поперечного перерізу труби.

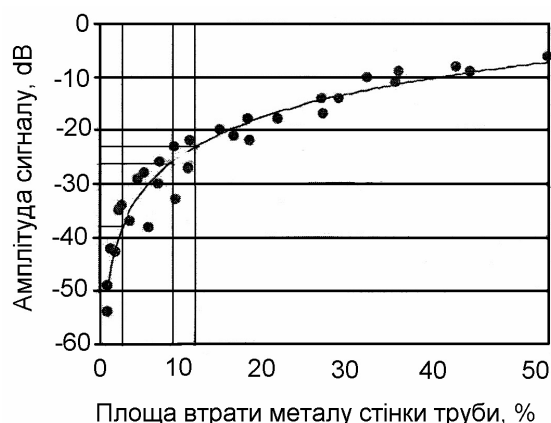


Рисунок 5 – Залежність амплітуди відбитого сигналу від площі втрати металу:
кружечки – відбиття від дефектів;
крива – найкраща збіжність залежності

Підтвердження обраних порогів системи Teletest здійснювалося шляхом проведення дослідницьких робіт з європейського проекту RACH, очолюваному Лондонським університетом [12]. Основна частина роботи полягає в зборі даних про неруйнівний контроль зразків труб, пошкоджених корозією, з використанням восьми методів НК для порівняння їхньої здатності виявлення дефектів. Випробування проводилися «у сліпу» без знання існуючих дефектів. Оцінка результатів досліджень здійснювалася незалежною групою з Бюро Vezitas, Париж. На рис. 6 наведені результати оцінки 36 різних дефектів для труб діаметром 150 мм. Графік побудований у вигляді залежності глибини пошкодження дефектами стінки труби від довжини по окружності й показує виявлені й невиявлені дефекти. Криві відбивають дефекти на рівні 3 % і 9 % площі поперечного перерізу труби.

Графіки на рис. 6 показують, що при «сліпих» умовах контролю система Teletest працює як очікувалося. Очевидно обмежене виявлення дефектів при 3 % рівня й нижче його. Дані показують класичну ймовірність характеристик виявлення, що збільшується в області вище рівня, що відповідає 3 % поперечного перерізу труби. Всі контрольовані дефекти навколо й вище 9 % рівня були виявлені. Ці результати дуже важливі, тому що вони демонструють можливості роботи системи Teletest на відомих зразках з відомими дефектами й можуть бути відтворені при

проведенні діагностики трубопроводів з корозією в невідомих місцях.

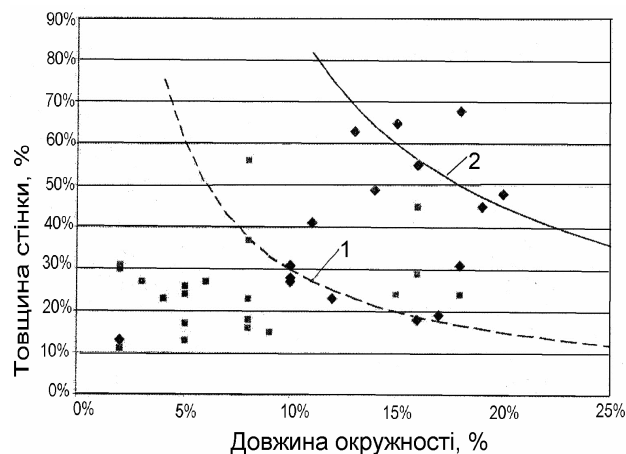


Рисунок 6 – Результати виявлення дефектів системою Teletest як залежності глибини пошкодження стінки труби від довжини по окружності:

◇ - виявлені дефекти; □ - не виявлені дефекти;
 1 – межа 3 % зони; 2 – межа 9 % зони

Такі ж дослідження були проведені на трубах діаметром 600 мм (товщина стінки 8,74 мм) на 86 видах моделей дефектів, виконаних механічним шляхом [13]. У цьому випадку були виявлені дефекти значно нижче кривої 9 % площі поперечного перерізу труби, а також дефекти нижче, ніж 3 % площі. Результати цих досліджень показали, що у випадку труби з більшим діаметром мінімальна чутливість до виявлення втрат металу стінок, еквівалентна 9 % площі поперечного перерізу, вище, а практична мета обстеження 3 %-ої площі стінки труби була досягнута для більшості випадків. Як впливає з роботи [9], чутливість до дефектів вище на лініях більших діаметрів труб, коли відношення діаметра до товщини стінки труби набагато більше, ніж при малих діаметрах труб. Однак на трубах великого діаметра досить складно виявити невеликі окремі ділянки корозії, тому що розмір кожного корозійного пошкодження не пропорційний внутрішньому діаметру труби [13].

Найбільш важливим є те, що метод і технологія низькочастотного УЗК є методом якісної дистанційної візуалізації місця

розташування дефектів і чутливий до зменшення поперечного перерізу труби, тобто до будь-яких втрат металу в комбінації глибини й довжини по окружності труби через корозійне пошкодження або ерозійне зношення стінки труби. Це досягається завдяки передачі кругової хвилі уздовж стінки труби, що взаємодіє з поперечним перерізом у кожній точці середовища труби. При цьому технологія низькочастотного діагностування рівною мірою чутлива до дефектів на внутрішній і зовнішній поверхнях труби. Однак пошкоджена частина стінки труби погано виявляється цим методом у напрямку осьової лінії труби. Це пояснюється тим, що спрямована хвиля при розповсюдженні вдаряється в границю зміни перетину труби й відразу ж відбивається, хоча від довгого дефекту в напрямку осьової лінії труби може відбитися більш сильний сигнал, чим від короткого за умови достатнього великого розміру окружності труби [9]. У той же час довгі дефекти в осьовому напрямку труби можуть привести до зниження міцності труби.

Поряд з визначенням амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних відбивачів фіксувалися амплітуди сигналів від конструктивних та технологічних відбивачів протяжного трубопроводу. На рис. 7 наведені залежності амплітуд відбитих сигналів від конструктивних, технологічних та експлуатаційних відбивачів протяжного трубопроводу при розповсюдженні не дисперсних спрямованих хвиль.

При відсутності дисперсії низькочастотної спрямованої хвилі амплітуда відбитого сигналу від конструктивних відбивачів типу фланець та кінець труби близька до амплітуди збуджуваного сигналу й прийнята за 100 %, тобто відповідає 0 дБ. Амплітуда відбитих сигналів від технологічних відбивачів типу якісного зварного з'єднання буде складати 20 % від амплітуди збуджуваного сигналу, що відповідає мінус 14 дБ. Ці два сигнали використовуються у системі Teletest для формування кривих «корегування «відстань – амплітуда» (кВА) при ідентифікації інформації від експлуатаційних відбивачів.

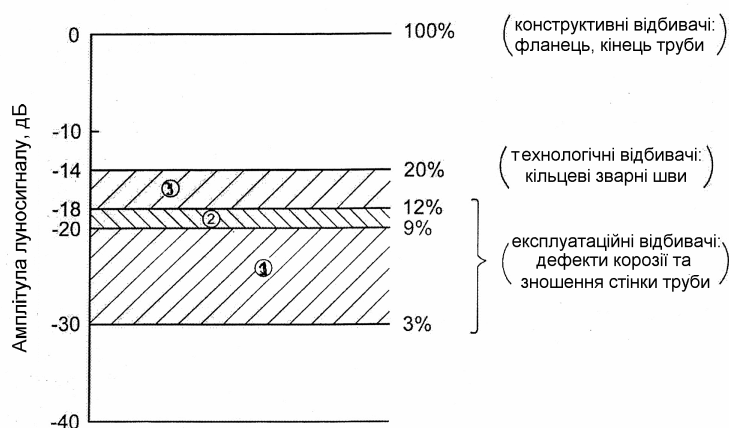


Рисунок 7 – Залежність амплітуд відбитих сигналів від відбивачів протяжного трубопроводу при розповсюдженні недисперсійних спрямованих хвиль

Найважливішим результатом проведених експериментальних досліджень було встановлення трьох класів ознак контрольних образів експлуатаційних відбивачів (дефектів) протяжного трубопроводу. Виходячи із запропонованого діапазону визначення амплітуд сигналів від дефектів на рівні 3, 9 та 12 % втрати металу стінки труби, на рис. 7 виділено три класи ознак контрольних образів експлуатаційних відбивачів протяжного трубопроводу: ω_1 , до якого будуть відноситися всі змінні амплітуди сигналів x_{li} від дефектів від 3 % до 9 %; ω_2 – зі змінними амплітудами сигналів від 9 % до 12 %; ω_3 – зі змінними амплітудами сигналів більше рівня 12 %. При цьому амплітуда відбитих сигналів на рівні 12 % втрати металу стінки труби буде відповідати мінус 18 дБ, 9 % – мінус 20 дБ, а 3 % – мінус 30 дБ.

У залежності від амплітуди відбитих сигналів від експлуатаційних відбивачів між класами діє послідовний лінійний зв'язок, який можна представити загальною відокремлюючою функцією у вигляді лінійної суми:

$$D(X) = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3, \quad (7)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, кожний із яких відноситься до відповідного класу; x_1, x_2, x_3 – змінні амплітуди сигналів від несучильностей у кожному класі.

Згідно з рис. 7 в якості розв'язуючої межі між класами ω_1 та ω_2 вибрана межа 9 % втрати

металу у поперечному перерізі труби, а між класами ω_2 та ω_3 – 12 %. На основі проведених досліджень нижня межа виявлення штучних дефектів на рівні 3 % втрати металу прийнята як межа розсіяного шуму. Враховуючи, що розв'язуюча межа між класами ω_1 та ω_2 прийнята на рівні 9 % втрати металу, то до класу ω_1 будуть відноситися всі значення x_{li} амплітуд відбитих сигналів, які задовольняють виразу $3\% < x_{li} < 9\%$. Застосовуючи до цієї межі принцип відокремлюючої функції, можна всю сукупність амплітуд відбитих сигналів на рівні 9 % розділити прямою лінією, рівняння якої буде мати вид:

$$D(X) = w_1x_1 + w_2x_2. \quad (8)$$

Очевидно, що підставлення у формулу (8) любых значень амплітуд відбитих сигналів $x_{li} < 9\%$ дасть негативні значення функції $D(X)$ і буде віднесено до класу ω_1 . Відповідно позитивне значення функції $D(X)$ прийме при підставленні значень амплітуд відбитих сигналів $x_{2i} > 9\%$ і буде віднесено до класу ω_2 . Якщо значення амплітуди ознак контрольних образів буде знаходитися на розв'язуючій межі, то маємо випадок, що відповідає умові невизначеності $D(X) = 0$.

Розв'язуюча межа між класами ω_2 та ω_3 прийнята на рівні 12 % втрати металу. Тому до

класу ω_2 будуть відноситися всі значення x_{2i} амплітуд відбитих сигналів, які задовольняють виразу $9\% < x_{2i} < 12\%$. Застосовуючи до цієї межі також принцип відокремлюючої функції можна всю сукупність амплітуд ознак контрольних образів дефектів на рівні 12 % розділити прямою лінією, рівняння якої буде мати вид:

$$D(X) = w_2 x_2 + w_3 x_3. \quad (9)$$

При підставленні у формулу (9) любых значень амплітуд ознак контрольних образів $x_{2i} < 12\%$ дасть також негативне значення функції $D(X)$ і буде віднесене до класу ω_2 .

Відповідно позитивне рішення функції $D(X)$ прийме при підставленні значень амплітуд ознак контрольних образів $x_{3i} > 12\%$ і буде віднесене до класу ω_3 . Якщо значення амплітуди діагностичної ознаки буде знаходитися на розв'язуючій межі, то $D(X) = 0$.

На рис. 8 наведені схеми розділення ознак контрольних образів відокремлюючою функцією на рівні 9 % втрати металу (а), класи ω_1 та ω_2 , і на рівні 12 % (б), класи ω_2 та ω_3 .

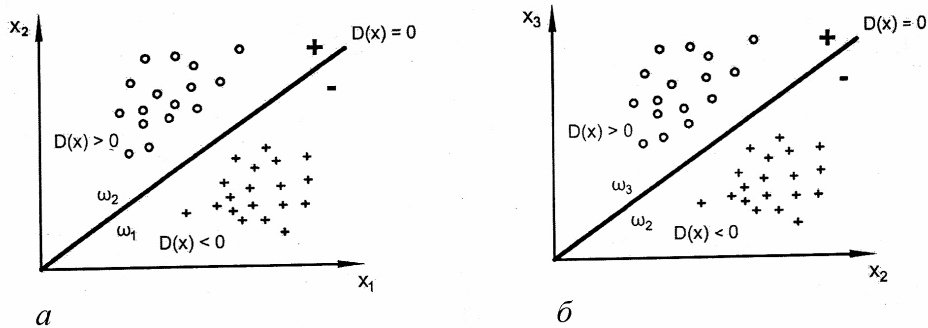


Рисунок 8 – Схеми розділення ознак контрольних образів відокремлюючими функціями на рівні 9 % втрати металу (а), класи ω_1 та ω_2 , та на рівні 12 % (б), класи ω_2 та ω_3

Таким чином, на основі експериментальних досліджень заздалегідь були визначені ознаки діагностичних образів від штучних дефектів у вигляді різних значень амплітуд відбитих від них сигналів, які слугують розв'язуючими межами на рівні 9 % і 12 % втрат металу по товщині стінки труби між класами ознак контрольних образів. У відповідності з теорією розпізнавання образів основу такого способу класифікації ознак контрольних образів складає процес навчання, в задачу котрого входить розділення отриманої підмножини амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей на відповідне число класів.

Враховуючи, що визначення класів ознак контрольних образів на розв'язуючих межах між класами здійснювалася на основі ознак діагностичних образів, отриманих шляхом проведення експериментальних досліджень, то такий спосіб класифікації називається «навчанням з учителем». Таким чином, на основі експериментальних досліджень було

одержано підмножину ознак діагностичних образів, які виконують функції розв'язуючих меж між класами ознак контрольних образів. В результаті було відпрацьовано критерій класифікації ознак контрольних образів, який враховує відмінність амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей, які характерні для окремих класів виходячи з величин втрати металу у поперечному перерізі стінки труби.

Проведені експериментальні дослідження показали, що існує монотонна залежність між амплітудою відбитих сигналів від ідеалізованих дефектів стінки труби та їх розмірами таким чином, що більші амплітуди відбитих сигналів отримують від більших дефектів. Відбиті сигнали від реальних несучільностей є більш складними через те, що форма та розміщення їх також впливають на амплітуду відбитого від них сигналу.

У процесі розробки технології Teletest далекодіючого низькочастотного

ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів методом ультразвукової локації з використанням не дисперсійних спрямованих хвиль дефекти класу ω_1 менше 9 % втрати металу стінки труби отримали назву «незначних». Дефекти стінки труби класу ω_2 , відбиті від яких сигнали перевищують 9 %, але менше 12 %, одержали назву «помірних». Нарешті дефекти класу ω_3 , сигнали від яких перевищують 12 % втрати металу стінки труби, називаються «серйозними».

Аналіз процедури контрольно-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічного трубопроводу. Відомо, що технологія та система Teletest є інструментом попереднього 100 % контролю, задачею якого є віднесення амплітуд відбитих сигналів від експлуатаційних несучільностей технологічного трубопроводу до одного із класів з метою визначення втрат металу стінки труби. Як це відбувається на практиці демонструє структурна схема процедури контрольно-діагностичного процесу при визначенні технічного стану трубопроводу, яка наведена на рис. 9.

Проведення процедури контрольно-діагностичного процесу згідно рис. 9 ґрунтується на виконанні операції ідентифікації втрат металу стінки труби технологічного трубопроводу протягом часу його експлуатації, яка здійснюється за допомогою двох методів:

1. Розділення підмножини ознак контрольних образів технологічного трубопроводу на розв'язуючих межах здійснюється з застосуванням так званого «правила порогової ідентифікації дефектів» на основі використання елементів порогової логіки.

2. Визначення розмірів втрат металу стінки труби здійснюється з використанням методів і засобів локальної дефектоскопії, зокрема, ультразвукової та магнітної товщинометрії.

Відомо, що практично кожний метод неруйнівного контролю при визначенні виявленої несучільності в якості дефекту ґрунтується на використанні найбільш розповсюдженого способу, який носить назву «правила порогової ідентифікації дефектів», для реалізації котрого в неруйнівному контролі

застосовуються саме елементи порогової логіки. В основі правила порогової ідентифікації у методах НК лежить порогове значення інформативних сигналів від виявлених несучільностей, що розділяє виміряні значення інформативних сигналів від виявлених несучільностей на відповідність бездефектним і дефектним ділянкам об'єкта контролю. Застосування правила порогової ідентифікації в НК полягає в порівнянні інформаційного сигналу від несучільності з деяким сигналом від несучільності, прийнятим в якості порогового, котрий однозначно дозволяє визначити характер несучільності: дефект чи не дефект.

Фактично в основі правила порогової ідентифікації дефектів з НК лежить логічна система кодування інформації, яка використовує цифри «нуль» та «одиниця», з яких і складається двійкова система кодування інформації.

Принцип дії правила порогової ідентифікації дефектів в неруйнівному контролі реалізується за допомогою порогових елементів, що базуються на основі двійкових сигналів, тобто двійковій системі числення, що використовується в різних системах автоматизованого неруйнівного контролю.

Використання двійкових сигналів на виходах порогових елементів таких систем кодування в будь-який момент часу є однозначними функціями двійкових сигналів на вході. Тому, порогові елементи складають численний та важливий клас різноманітних цифрових систем.

Зазвичай, пороговий елемент являє собою пристрій з декількома двійковими входами та одним двійковим виходом. На кожному виході порівнюється дійсне число, яке називається вагою. Сигнал на виході пристрою дорівнює константі, яка позначається логічним значенням «0» до того часу, коли зважена сума вхідних сигналів не стане рівною або не перевищить дійсне число, яке називається порогом. В цьому випадку вихідний сигнал стає рівним другій константі, яка позначається логічним значенням «1».

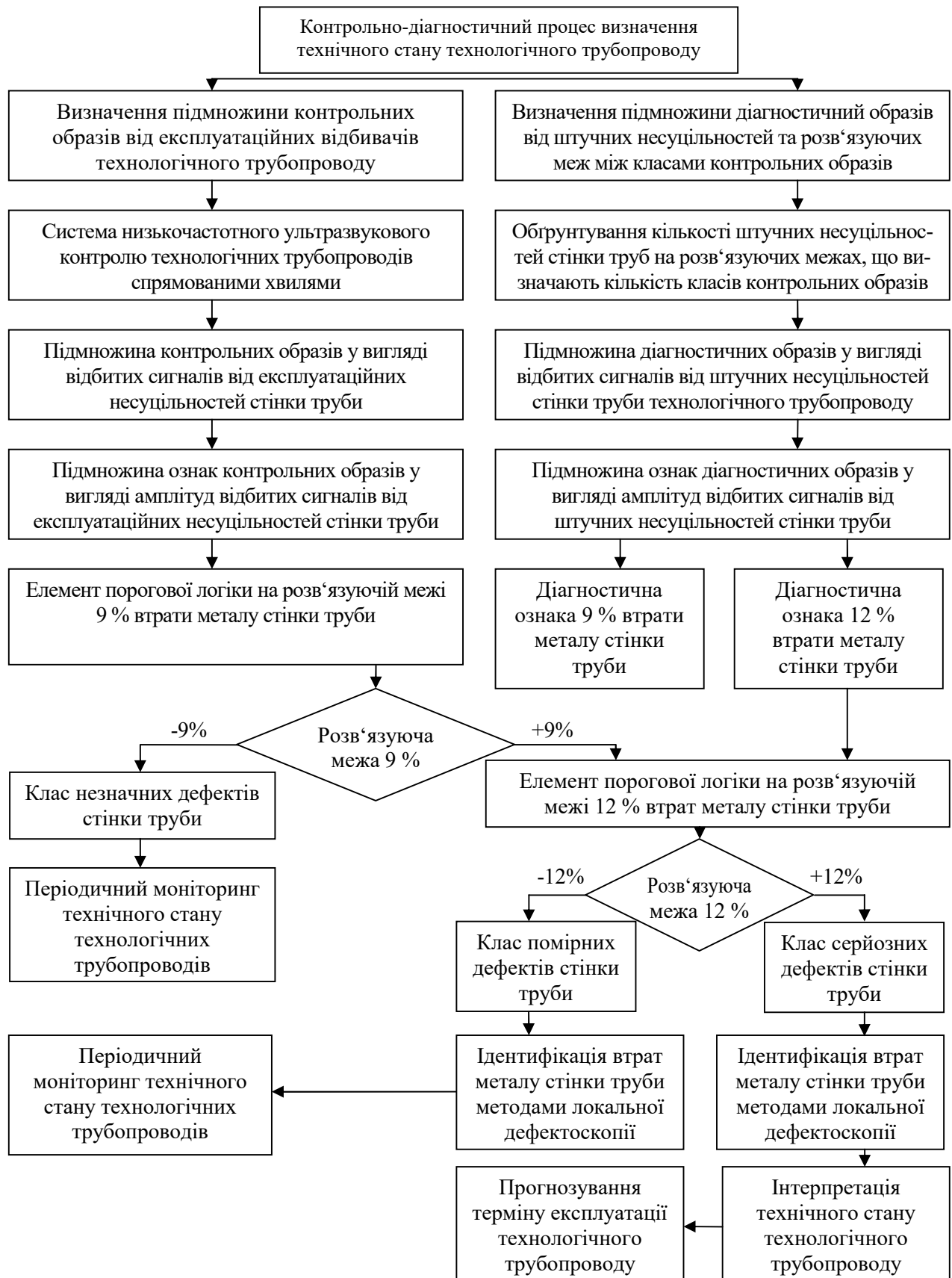


Рисунок 9 – Структурна схема контрольно-діагностичного процесу

В загальному випадку пороговий елемент визначається такими математичними співвідношеннями [14]:

$$G \equiv 1, \text{ якщо } \sum_{i=1}^n w_i y_i > K ;$$

$$G \equiv 0, \text{ якщо } \sum_{i=1}^n w_i y_i < K . \quad (10)$$

де G - двійковий сигнал на виході порогового елемента, який дорівнює 1 або 0; y_i - двійковий сигнал на i -му виході порогового елемента, який дорівнює 1 або 0; w_i - вага i -того входу, що є кінцевим дійсним числом; n - загальна кількість входів; K – поріг, кінцеве дійсне число.

Це математичне визначення порогового елемента з різним ступенем достовірності відповідає різнобічним реальним явищам. Зокрема, природними типами порогових елементів є нейрони, що існують в центральній нервовій системі людей і тварин та слугують

для передачі нейрологічної інформації. На базі штучних нейронних мереж створюються альтернативні системи автоматичного ультразвукового контролю.

Штучні порогові елементи можуть бути побудовані різними способами. На сучасному етапі розвитку науки і техніки в якості порогових елементів застосовуються досягнення електроніки. Тому значення співвідношень (10) полягає в тому, що вони описують поведінку природних та штучних порогових елементів, які отримали також широке розповсюдження в теорії прийняття рішень та в задачах, пов'язаних зі створенням штучного інтелекту.

Схема на рис. 10 ілюструє найпростіший загальний спосіб побудови порогових елементів згідно з виразом (10):

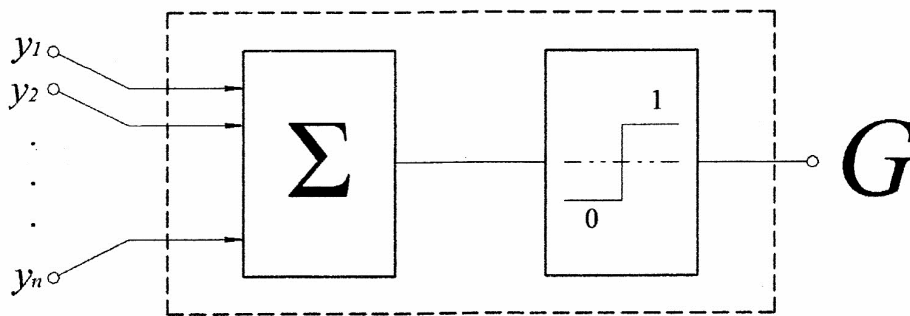


Рисунок 10 – Схема побудови порогових елементів простим способом

Якщо в якості прикладу прийняти, що на вхід порогового елемента з порогом $T = 1/2$ потрапляють три вхідних сигнали з вагами $w_1 = 1$, $w_2 = 1$, $w_3 = -1$, то логічна поведінка такого елемента буде відповідати логічному значенню 1(0). Модуль такого порогового елемента з позначенням порогу і його ваг наведено на рис. 11.

При застосуванні методології розпізнавання образів в НК в якості порогу можуть використовуватися різні цифри двійкової системи. Так, у наведеній на рис. 3 схемі лінійного класифікатора з двох класів логічна система кодування інформації пороговим елементом, використовуються цифри «+1» та «-1». У якості порогу, тобто розв'язуючої межі між вхідними сигналами, слугить цифра «0».

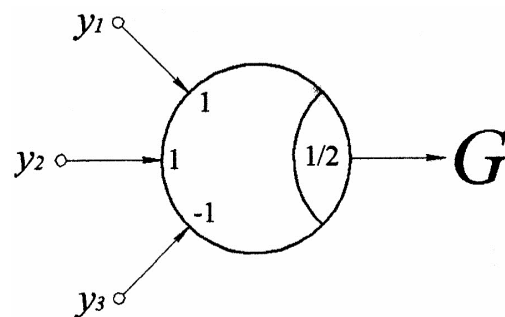


Рисунок 11 - Схема моделі порогового елемента з різними значеннями ваг трьох вхідних сигналів

У наведеній на рис. 9 структурній схемі процедури контрольно-діагностичного процесу

при визначенні технічного стану технологічних трубопроводів у якості порогу на розв'язуючих межах використовуються ознаки діагностичних образів, амплітуди сигналів яких відповідають втратам металу стінки труби на рівні порогів $K_1 = 9\%$ і $K_2 = 12\%$, тобто відповідно «+9%» та «-9%» і «+12%» та «-12%».

Враховуючи, що технологія та система Teletest є інструментом 100 % контролю технічного стану протяжного трубопроводу, віднесення відбитого сигналу як серйозного, що перевищує 12% втрати металу стінки труби, підлягає проведенню подальших досліджень зони дефекту локальними методами контролю. Класифікація відбитого сигналу як серйозного показує, що ймовірна присутність великого дефекту класу ω_3 . Дефекти класу ω_2 відповідно відбитого сигналу як помірного вимагають проведення періодичного моніторингу і тому він реєструється, хоча не перевищує сигналу серйозного дефекту. Дефекти типу «незначного» класу ω_1 , які наближаються до рівня 9%, повинні також реєструватися, оскільки для деяких застосувань системи Teletest виявлення невеликих дефектів також бажано й може вимагати моніторингу дільниці трубопроводу у зв'язку з можливим розвитком таких дефектів трубопроводу з часом.

Спосіб представлення попередньої контрольної інформації про технічний стан трубопроводу. Наведена на рис. 4 класифікація отриманої від відбивачів технологічного трубопроводу множини контрольних образів, розділених на підмножини технологічних, конструктивних та експлуатаційних контрольних образів трубопроводу, в цілому знайшла своє відображення при розробці формату шкали численних А-сканів на дисплеї системи Teletest, накладений один на одного [15]. Teletest – це технологія дистанційної

акустичної локації протяжних трубопроводів, яка являє собою імпульсну систему для діагностування великих обсягів металу з однієї точки установлення п'єзоперетворювачів акустичної антени. Спрямовані хвилі, відбиті від дефекту, приймаються п'єзоперетворювачами й після підсилення, обробки й заглушення завад виводяться на екран персонального комп'ютера як випрямлені сигнали у вигляді А-сканів залежності амплітуди від відстані, подібно використовуваному при звичайному ультразвуковому контролі, але в часовому діапазоні виміру, що відповідає десяткам метрів, а не сантиметрів. Враховуючи, що спрямовані хвилі носять дисперсійний характер, то при калібруванні часової шкали А-скану для зчитування відстані, а не часу, у системі Teletest є комп'ютерна програма визначення швидкості поширення хвилі для обраної частоти випробувань із каліброваної або «дисперсійної» кривої. У програмне забезпечення Teletest вбудована бібліотека дисперсійних кривих, які мають різний вигляд залежно від сполучення «діаметр труби/товщина стінки». Звичайно на дисплей накладені криві корегування «відстань – амплітуда», які призначені для часового регулювання чутливості й відображають лінії рівної чутливості при рівній відстані від перетворювачів.

На рис. 12 в якості прикладу наведено формат дисплея системи Teletest при контролі ділянки протяжного технологічного трубопроводу довжиною 36 м з виведенням на екран залежностей амплітуд відбитих сигналів від конструктивних, технологічних та експлуатаційних відбивачів трубопроводу згідно з рис. 7 в процесі розповсюдження у середовищі стінки труби низькочастотної ультразвукової спрямованої хвилі.

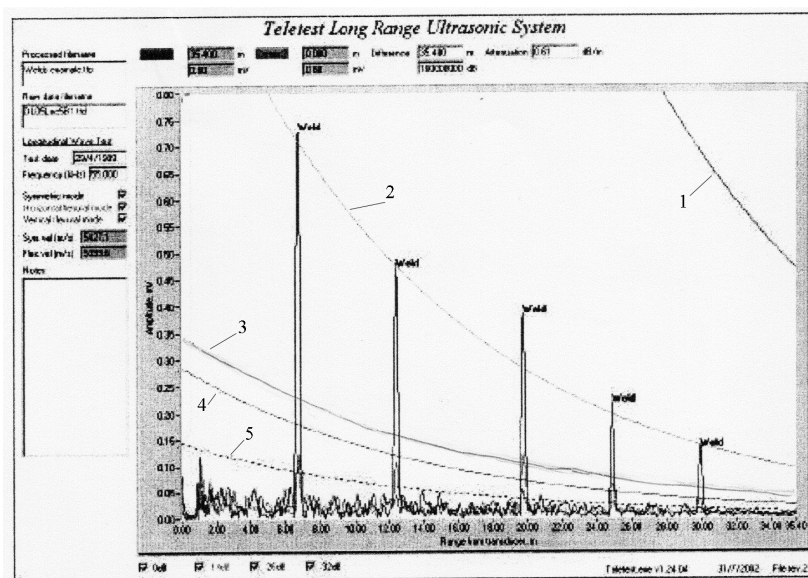


Рисунок 12 – Формат дисплея А-скану системи Teletest при контролі дільниці протяжного трубопроводу

Дисплей використовується для попереднього представлення контрольної інформації про технічний стан технологічного трубопроводу. По горизонталі відкладена відстань у метрах від місця встановлення перетворювачів системи або початку відліку, по вертикалі – амплітуди відбитих сигналів у dB від усіх відбивачів трубопроводу. На А-скан системи Teletest виведено п'ять кривих коригування «відстань – амплітуда» [15].

- Крива 1 (0 dB). Ця крива відображає 100 % відбиття сигналів від конструктивних елементів (відбивачів) трубопроводу, якими можуть бути фланець або кінець труби. Ці відбивачі відіграють роль майже ідеального відбивача і демонструють відсутність дисперсності спрямованої хвилі при розповсюдженні в трубопроводі. Відсутність дисперсності вибраної моди спрямованої хвилі можна продемонструвати на контрольному зразку у вигляді одиночного відрізка труби в лабораторії й використовувати для установа абсолютної стандартної чутливості системи Teletest та перевірки її працездатності. Цю еталонну величину звичайно називають «відбивач 0 dB». На дисплеї системи Teletest крива відображається як крива чорного кольору.

- Крива 2 (-14 dB). Ця крива відображає відбиття сигналів від технологічних відбивачів, якими є зварні з'єднання дільниці трубопроводу.

Сигнали від кільцевих зварених швів на трубі, які поступово загасають із відстанню, утворюють ідеальні відбивачі для задання кривої корегування. Досвід використання системи Teletest показує, що кільцевий шов зі звичайним профілем верхнього й кореневого проходу має відбивну здатність, еквівалентну до 20 % (-14 dB) сигналу від кінця труби (в 5 раз менш інтенсивне ніж відображення від загального відображення від кінця труби). Поки існують невеликі коливання від шва до шва, це положення добре підтверджується на практиці. На екрані дисплея системи Teletest ця крива відображається синім кольором.

- Крива 3 (-18 dB). Ця крива відображає відбиття мікросигналів від експлуатаційних відбивачів трубопроводу, якими є корозійне пошкодження та ерозійне зношення стінки труби, і визначає втрату металу на рівні 12 % відбиття сигналу від кінця труби. Цей граничний рівень втрати металу використовується для визначення аномалій, сигнали від яких розглядаються як «серйозні» і можуть досягати рівня -14 dB. На екрані дисплея А-скан системи Teletest ця крива відображається червоним кольором.

- Крива 4 (-20 dB). Ця крива визначає втрату металу стінки труби на рівні 9 % відбиття сигналу від кінця труби. Цей рівень втрати металу використовується для визначення

аномалій стінки труби, сигнали від яких розглядаються як «помірні» і можуть досягати рівня -18 дБ. Аномалії, які дають сигнали, що не перевищують криву -20 дБ, розглядаються як «незначні». На екрані дисплея А-скан системи Teletest ця крива відображається зеленим кольором.

• Крива 5 (-30 дБ). Ця крива відображає відбиття сигналів від експлуатаційних відбивачів на рівні 3 % втрати металу у поперечному перерізі стінки труби. Крива використовується як детермінанта ефективного діапазону тестування. Це дозволяє виявляемій аномалії (-30 дБ) мати коефіцієнт сигнал-шум 6 дБ або краще. Цей рівень відношення сигналу до шуму необхідний для ефективної інтерпретації даних тесту і практично відіграє роль межі як діапазону тестування, так і чутливості до менших аномалій. На екрані дисплея А-скан системи Teletest ця крива відображається штриховою лінією.

Нижче рівня кривої -30 дБ на дисплеї записані, накладені одна на одну, три криві розсіяного шуму, які відображають відбиття спрямованої хвилі від шорстких поверхонь труби.

Таким чином розпізнавання дефектів протяжних технологічних трубопроводів при використанні низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль здійснюється за величинами амплітуд відбитих сигналів, що відповідають втратам металу у поперечному перерізі стінки труби, та шляхом віднесення амплітуд до різних класів. Рішення при виявленні дефектів виносяться при перевищенні амплітудою відбитого сигналу відповідного порогу, визначеного для кожного класу на основі експериментальних досліджень. Таким чином, в основі класифікації дефектів технологічних трубопроводів лежить спосіб амплітудної класифікації.

Особливості ідентифікації втрат металу стінкою труби із-за дефекту. Згідно з приведеною на рис. 9 структурною схемою процедури контрольно-діагностичного процесу визначення технічного стану технологічного трубопроводу після рознесення амплітуд відбитих від дефектів труби сигналів за класами, найбільш важливою наступною операцією є ідентифікація кількісних втрат металу у поперечному перерізі труби із-за

дефекту і, в першу чергу, тих, що відносяться до класу «серйозних». Аналіз викладеної вище попередньої контрольної інформації про технічний стан трубопроводу у залежності від амплітуди сигналів, відбитих від реальних дефектів стінки труби, дає можливість, тільки у деякій мірі, судити про глибину ураження стінки труби в залежності від зміни поперечного перерізу стінки труби [9]. Висота відбитих сигналів від дефектів відповідає ступеню зміни площі поперечного перерізу труби під дією дефекту. Можна вважати, що амплітуда сигналу характеризує ступінь дефектності поперечного перерізу труби. Тому, в першому наближенні, можна прийняти, що ступінь дефектності D за циліндричним перерізом труби може визначатися у відсотках при віднесенні площі S_o до всієї площі S_{mp} поперечного перерізу

труби, тобто $D = \frac{S_o}{S_{mp}} \cdot 100\%$.

У той же час інформація про амплітуду відбитих сигналів низькочастотної спрямованої хвилі не містить інформації щодо глибини дефекту, яка в принципі є інформацією про товщину стінки труби. Така інформація про залишкову товщину стінки труби може бути отримана при вимірюванні її засобами локальної товщинометрії, наприклад, засобом ультразвукової товщинометрії, ультразвукова хвиля якого спрямована по товщині стінки труби перпендикулярно вісі труби.

Тоді глибина l дефекту стінки труби буде дорівнювати:

$$l = t - t_0,$$

де t - вся товщина стінки труби; t_0 - виміряна товщинометром залишкова товщина стінки труби.

Глибина дефекту характеризує ступінь H стоншення стінки труби, котре визначається у відсотках при віднесенні глибини l дефекту до номінальної товщини t стінки труби, тобто

$$H = \frac{l}{t} \cdot 100\%.$$

Як впливає із наведеного, прямої кореляційної залежності між даними про дефект, отриманої низькочастотними хвилями, і даними про глибину потоншення, отриманими при вимірюванні товщини стінки труби, немає.

Спрямована хвиля у загальному випадку чутлива до зміни площі поперечного перерізу труби в комбінації глибини ураження стінки та довжини вздовж окружності труби, що підтверджують дослідження в роботі [9]. Хоча глибокий дефект тієї ж площі з малою довжиною по окружності труби може давати більше відбиття, однак інформацію про ступінь ураження площі поперечного перерізу труби амплітуда відбитого сигналу несе в цілому, й із

цієї інформації неможливо обґрунтувати інформацію про глибину поразення стінки труби. Таку інформацію можуть дати інші фізичні засоби вимірювання товщини стінки труби, наприклад, ультразвукова товщинометрія, тощо.

Це ілюструє схема алгоритму оцінки втрат металу в поперечному перерізі стінки труби, яка наведена на рис. 13.

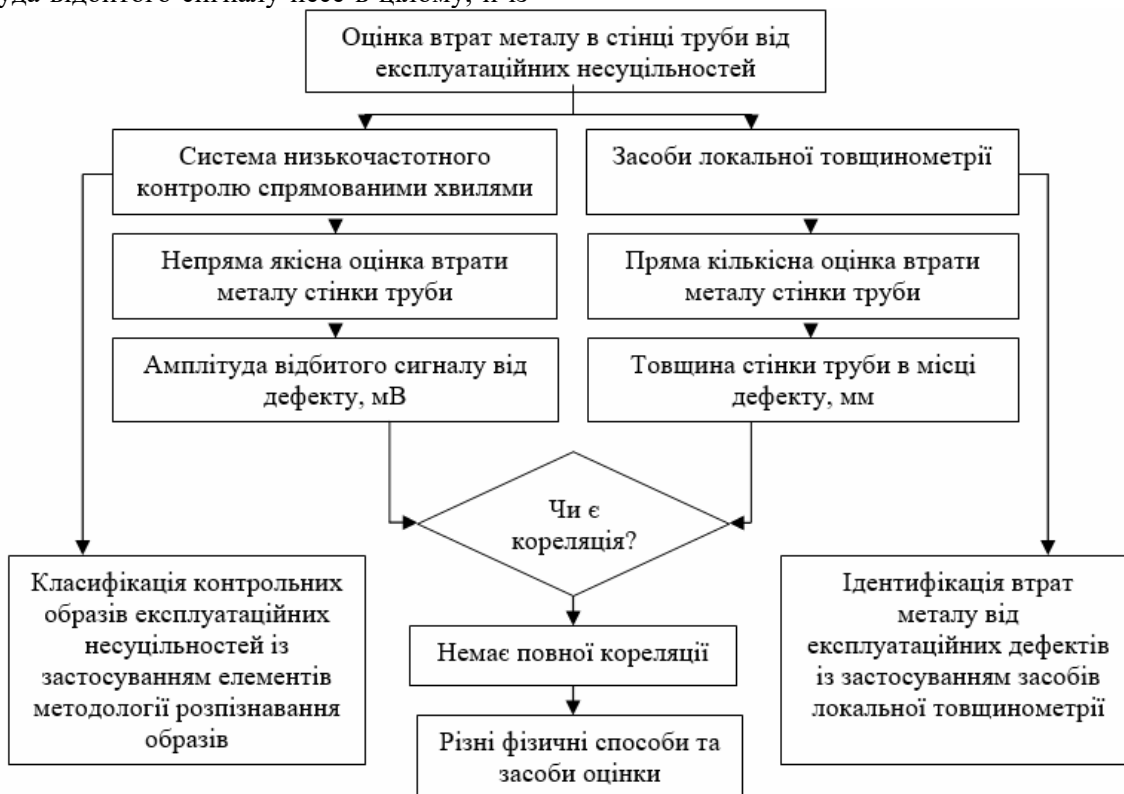


Рисунок 13 – Схема алгоритму оцінки втрат металу в поперечному перерізі стінки труби

Алгоритм визначає два наведені вище напрямки оцінки втрат металу в поперечному перерізі труби від експлуатаційних дефектів. Як відмічалось, про наявність дефекту та ступінь ураження стінки труби з використанням спрямованої хвилі роблять висновок за амплітудою відбитого сигналу, яка вимірюється в мВ. Але така оцінка ступеню дефектності стінки труби є непрямую, тобто якісною. Величина потоншення стінки труби, виміряна товщинометром, подається в мм і є прямою, тобто кількісною. Тому між цими величинами немає повної кореляції, тому що використовуються різні фізичні величини. Провести оцінку глибини потоншення стінки

труби за амплітудою відбитого сигналу в деякій мірі можливо, якщо відомий тип дефекту стінки труби (наприклад, тип корозії). Але, якщо врахувати, що на практиці спочатку проводиться попередній контроль технічного стану трубопроводу, то виконати це важко. У подальшому такий зв'язок може бути встановлений в процесі моніторингу технічного стану трубопроводу в результаті формування картини розвитку дефекту, накопичення та аналізу статистичних даних про дефекти з використанням низькочастотних спрямованих хвиль та засобів локального неруйнівного контролю [11]. Це означає, що для вирішення задачі оцінки технічного стану технологічного

трубопроводу низькочастотними спрямованими хвилями необхідно підтримувати зворотний зв'язок за фактичними статистичними даними, отриманими спрямованими хвилями, та даними за типом дефекту (ступеню утоншення стінки), за допомогою яких може бути встановлена кореляційна залежність.

Тому, як показано на рис. 13, основною функцією системи низькочастотного ультразвукового контролю технологічних трубопроводів на даний час є класифікація контрольних образів експлуатаційних несущальностей із застосуванням елементів методології розпізнавання образів, а засобів локальної товщинометрії – ідентифікація втрат металу експлуатаційних дефектів у поперечному перерізі стінки труби.

Варто також зазначити, що застосування технології та техніки низькочастотного ультразвукового контролю технологічних трубопроводів спрямованими хвилями вимагає повного розуміння факторів, які впливають на результатами оцінки технічного стану технологічних трубопроводів, та практичного досвіду інтерпретації отриманих результатів фахівцями, які проводять роботи в реальних умовах експлуатації трубопроводів різного призначення.

Висновки

1. Показано, що основою процесу технічного діагностування стану промислових об'єктів прийнято вважати загальну теорію розпізнавання образів як важливого розділу технічної кібернетики, яка ґрунтується на застосуванні математичних методів класифікації образів з використанням відокремлюючих функцій та розв'язуючих меж між класами образів.

2. Розроблена класифікація множини контрольних образів від відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі технологічного трубопроводу, які розділені на три кластери (групи), складовими котрих є підмножини контрольних образів, отриманих відповідно від технологічних, конструктивних та експлуатаційних відбивачів трубопроводу.

3. Наведено значення ознак діагностичних образів на розв'язуючих межах, які подані в зарубіжних наукових виданнях та прийняті в системах низькочастотного контролю спрямованими хвилями при визначенні

технічного стану протяжних трубопроводів у залежності від втрат металу в поперечному перерізі стінки труби із-за дефекту.

4. На основі проведеного аналізу процедури контрольньо-діагностичного процесу при визначенні технічного стану технологічного трубопроводу розроблена його структурна схема, яка базується на застосуванні системи низькочастотного контролю спрямованими хвилями та операції ідентифікації втрат металу в стінці труби.

5. Показано, що системою низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями технологічних трубопроводів шляхом застосування методології розпізнавання образів здійснюється операція розділення відбитих сигналів від експлуатаційних відбивачів за класами (класифікація контрольних образів), а засобами локальної товщинометрії виконується операція вимірювання фактичної глибини ураження стінки труби (ідентифікація втрат металу стінки труби).

6. При проведенні операції ідентифікації втрат металу в стінці труби із-за дефекту слід враховувати, що амплітуда відбитого від несущальності труби сигналу не несе інформацію про глибину ураження стінки, тому що оцінка дефектності труби спрямованими хвилями є якісною, а виміряна по місцю глибина є кількісною, й тому між цими величинами немає повної кореляції.

Список використаних джерел

1. Бондаренко О.Г. Методи неруйнівного контролю та технічного діагностування стану протяжних технологічних трубопроводів / *Методи та прилади контролю якості*. 2022. № 1. С. 5-17.

2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідник-посібник. Під заг. ред. В.В.Панасюка. – Т. 5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика. Під ред. З. Т. Назарчука. Львів: ФМІ ім.Г.В.Карпенка, 2001. 1134 с.

3. Tou J., Gonzalez R. Pattern Recognition Principles. London. 1974. 416 p.

4. Research Techniques in Nondestructive Testing. Edited by R.S. SHARPE. London, 1970. 490 p.

5. Verhaden C., Duin R., Groen F., Joosten J. and Verbeek P. Progress Report on Pattern Recognition. Reports on Progress in Physics/ 1980. V. 43. № 6. pp. 785-831.

6. Fu K. Sequential Methods in Pattern Recognition and Machine Learning. London. 1968. 265 p.

7. Недосека А.Я. Основы розрахунку та діагностики зварних конструкцій. К.: Вид-во «ІНДПРОМ», 1998. 640 с.

8. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. Toronto, 1973. 512 p.

9. Report. Teletest Long Range Ultrasonic Testing Technijue – Performance Details. / *Document Reference*: TTP/01. May. 2001. 20 p.

10. Murde P.J., Lank A.M., Allyne D.N. A long range method of the detection of orrosion under insulation in process pipework - Thermie Project: OG 474/94, 5-th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg. 26-28 November, 1996.

11. Jkeaa T., Kanehada R., Miyazawa M., Matsuoka J., Fujiwara M. Guided Ware Technology Process for Field Testing of Pipers of Plant / *Hinakai Kensa*. 2005. V. 54. - № 11. P. 595-599.

12. Reliability Assessment for Containment of Hazardous Materials RACH. European Commission. – Project OG 112/FR/UK. Final Report, 1999.

13. Koenig M.J., Budenik T.A., RUST s.w., Nestrekoroht J.B.: Topical Report GRI-94/0381:GRI Pipeline Simulation Facility Metal Loss Defect / *Gas research Institute*, April 1995.

14. Dertouzos M. Threshold Logic: A Synthesis Apporoach. Research Monograph № 32. Massachusetts. 1965. 342 p.

15. Long Kange Ultrasonic Test System. Section I. System Overview and Principles of Operation. – September, 2004. – 6 p.

References

1. Bondarenko O.H. Metody neruynivnoho kontrolyu ta tekhnichnoho diahnostuvannya stanu protyazhnykh tekhnolohichnykh truboprovodiv. *Metody ta prylyady kontrolyu yakosti*. 2022. № 1. S. 5-17. [in Ukrainian]

2. Mekhanika ruynuvannya i mitsnist' materialiv: Dovidnyk-posibnyk. Pid zah. red.

V.V.Panasyuka. – T. 5. Neruynivnyy kontrol' i tekhnichna diahnostyka. Pid red.. Z. T. Nazarchuka. L'viv: FMI im.H.V.Karpenka, 2001. 1134 s. [in Ukrainian]

3. Tou J., Gonzalez R. Pattern Recognition Principles. London. 1974. 416 p.

4. Research Techniques in Nondestructive Testing. Edited by R.S. SHARPE. London. 1970. 490 p.

5. Verhaden C., Duin R., Groen F., Joosten J. and Verbeek P. Progress Report on Pattern Recognition. Reports on Progress in Physics/ 1980. V. 43. № 6. pp. 785-831.

6. Fu K. Sequential Methods in Pattern Recognition and Machine Learning. London. 1968. 265 p.

7. Nedoseka A.YA. Osnovy rozrakhunku ta diahnostyky zvarnykh konstruksiy. K.: Vyd-vo «INDPROM», 1998. 640 s. [in Ukrainian]

8. Duda R., Hart P. Pattern Classification and Scene Analysis. Toronto, 1973. 512 p.

9. Report. Teletest Long Range Ultrasonic Testing Technijue – Performance Details. / *Document Reference*: TTP/01. May. 2001. – 20 p.

10. Murde P.J., Lank A.M., Allyne D. N. A long range method of the detection of orrosion under insulation in process pipework - Thermie Project: OG 474/94, 5-th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg. 26-28 November, 1996.

11. Jkeaa T., Kanehada R., Miyazawa M., Matsuoka J., Fujiwara M. Guided Ware Technology Process for Field Testing of Pipers of Plant / *Hinakai Kensa*. 2005. V. 54. № 11. P. 595-599.

12. Reliability Assessment for Containment of Hazardous Materials RACH. European Commission. – Project OG 112/FR/UK. Final Report, 1999.

13. Koenig M.J., Budenik T.A., RUST s.w., Nestrekoroht J.B.: Topical Report GRI-94/0381:GRI Pipeline Simulation Facility Metal Loss Defect / *Gas research Institute*, April 1995.

14. Dertouzos M. Threshold Logic: A Synthesis Apporoach. Research Monograph № 32. Massachusetts. 1965. 342 p.

15. Long Kange Ultrasonic Test System. Section I. System Overview and Principles of Operation. – September, 2004. – 6 p.

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 621.691.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-27-35

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ГРУПОВОЇ ТА ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СПРЯМОВАНОЇ МОДИ В СТІНКАХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

І. З. Лютак, З. П. Лютак, М. М. Яцишин, М. Ю. Чернишов

*Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна,
e-mail: ihorlt@gmail.com*

В роботі представлено алгоритм обчислення фазової та групової швидкостей ультразвукових спрямованих мод в стінках металевих конструкцій. Представлено теоретичну частину, що математично описує параметри мод ультразвукових хвиль та дає фізичні основи для використання алгоритму. В роботі обґрунтовано необхідність проведення контролю металевих конструкцій на основі магістральних трубопроводів. Показано фотографії нештатних ситуацій, пов'язаних із зсувами ґрунтів, дано аналіз чинників, що впливають на технічний стан металоконструкцій. Обґрунтовано причини здійснення контролю металоконструкцій для з'ясування впливу нештатних ситуацій на зміну рівня технічного стану. Побудований алгоритм обчислення фазових та групових швидкостей ультразвукових спрямованих мод представлено графічно та дано пояснення основних блоків його роботи. Алгоритм реалізовано на мові програмування MatLab, оскільки було обґрунтовано використання мови для проведення складних математичних обчислень та графічного представлення результатів із можливістю подальшого аналізу. Алгоритм складається із компонентів, які реалізовані у вигляді підпрограм, що забезпечує логіку побудови та можливість повторного використання коду програми алгоритму. Алгоритм вирішує математичну задачу пошуку мод ультразвукових спрямованих хвиль у хвилеводі, тому в роботі представлено умови застосування результатів алгоритму для проведення контролю в натурних умовах. Дано опис і послідовність операцій, що потрібно здійснити для успішного конфігурування конструкції із генеруючих та приймальних ультразвукових первинних перетворювачів. Для можливості точкового контролю результатів алгоритму та лабораторних практичних вимірювань параметрів спрямованої хвилі представлено таблицю результатів із числовими значеннями амплітуди хвилі та координат її реєстрації, що дасть змогу більш точно налаштувати лабораторні дослідження. Отримані відхилення результатів у натурних умовах проведення контролю від приведених в роботі дасть змогу більш детально провести аналіз змін технічного стану досліджуваного об'єкту. Наведено висновки результатів досліджень.

Ключові слова: ультразвук, металоконструкції, спрямовані хвилі, неруйнівний контроль.

The paper presents an algorithm for calculating the phase and group velocities of ultrasonic guided modes in the walls of metal structures. The theoretical part is presented, which mathematically describes the parameters of ultrasonic wave modes and provides the physical basis for using the algorithm. The work presents and substantiates the need to control metal structures based on main pipelines. Photographs of unusual situations associated with landslides are shown, and an analysis of the factors is given, which affects the technical condition of metal structures. The reasons for the control of metal structures to clarify the influence of abnormal situations on the change in the level of technical condition are substantiated. The constructed algorithm for calculating the phase and group velocities of ultrasonic guided modes is presented graphically and the main blocks of its work are explained. The algorithm was implemented in the MatLab programming language, as it was justified to use the language to perform complex mathematical calculations and graphically present the results with the possibility of further analysis. The algorithm consists of components that are implemented in the form of subroutines, which provides construction logic and the possibility of reusing the code of the algorithm program. The algorithm solves the mathematical problem of finding

the modes of ultrasonic guided waves in a waveguide, therefore the paper presents the conditions for applying the results of the algorithm for monitoring in real conditions. The description and sequence of operations that must be performed for the successful configuration of the structure from generating and receiving ultrasonic primary transducers are given. For the possibility of spot control of algorithm results and laboratory practical measurements of guided wave parameters, a table of results with numerical values of wave amplitude and coordinates of its registration is presented. That will allow more precise adjustment of laboratory studies. The obtained deviations of the results in the real conditions of control from those given in the work will make it possible to conduct a more detailed analysis of changes in the technical condition of the object under study. The conclusions of the research results are presented.

Key words: ultrasound, metal structures, guided waves, non-destructive testing.

Вступ. Контроль якості металевих конструкцій є самостійною технологічною операцією, яка використовується в різних промислових виробництвах. Це відноситься до контролю металевих конструкцій в нафтогазовій промисловості, літакобудуванні, при будівництві і експлуатації мостів, елементів будь якої промислової індустрії. До останнього часу основними методами контролю металевих конструкцій були радіографія, магнітографія, механічні випробування, візуальний контроль. Основою енергозабезпечення нашої держави є об'єкти нафтогазової промисловості, зокрема магістральні газопроводи. Через низьку оперативність радіографічного контролю, недостатню чутливість і відповідно низьку достовірність результату неможливо своєчасно виявити зміни механічних параметрів металу магістральних газопроводів під дією об'єктивних факторів, а саме через тріщини і зсуви ґрунтів, корозії просідання фундаментів, що може змінювати їх проектне положення, а це в свою чергу може привести до аварійних ситуацій з непередбачуваними екологічними наслідками, рис. 1.



Рисунок 1 – Зсувна ділянка

Використання новітніх технологій при будівництві, застосування більш якісних ізоляційних покриттів металу зовнішньої оболонки газопроводів не вирішує повністю

забезпечення безаварійної експлуатації магістральних газопроводів на окремих ділянках через ґрунтові зсуви, прориви кам'янистими частинками ізоляції особливо в гірській місцевості, що приводить до її пошкодження і зниження корозійної стійкості металу.

Важливим напрямком забезпечення працездатності магістральних газопроводів в нафтогазовій промисловості України, які експлуатуються понад допустимий термін, є одним з пріоритетних напрямків стабільності енергетичної галузі країни. Для забезпечення надійності магістральних газопроводів, які експлуатуються вже тривалий час, потрібно провести аналіз і систематизацію фізичної природи параметрів технічного стану елементів компресорних станцій і, насамперед, лінійної частини газопроводів.

Проблема з забезпеченням надійності магістральних газопроводів на небезпечних ділянках залишається актуальною. На окремих ділянках лінійної частини магістральних газопроводів через зсуви ґрунтів пошкоджується ізоляційне покриття, що вимагає його часткової або повної заміни, рис. 2.



Рисунок 2 – Аварійна ділянка газопроводу

Для визначення працездатності магістральних газопроводів в експлуатаційних умовах необхідно оцінити напружено - деформований

стан металу на небезпечних ділянках, визначити причини, які викликали зміни технічного стану, порівняти отримані дані з допустимими і прийняти рішення.

Основні дослідження поширенню спрямованих ультразвукових хвиль було представлено в праці [1]. Тут автори основну увагу приділили дослідженню поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінках металевих трубопроводів, де досліджували кільцеві моди. Більш загальні дослідження по акустопружності провели автори в працях [2, 3]. Сучасні дослідження в галузі акустопружності направлені на вивчення взаємодії первинних перетворювачів та хвилеводів, що заповнені рідиною [4]. Також для збільшення точності та дослідження нових методів неруйнівного контролю, що базуються на акустопружності, науковці досліджують ефекти впливу температури на зміну результатів вимірювань [5]. Як можна побачити із представлених досліджень неруйнівний контроль напружено-деформованого стану металоконструкцій є сучасним методом, який якісно розвивається і набуває ширшого застосування у промисловості.

Мета роботи. Для збільшення області застосування ультразвукових спрямованих хвиль для неруйнівного контролю є необхідність здійснити дослідження їх параметрів поширення в металевих пластинах, що можуть бути несучими елементами різних металевих конструкцій. Для більш оптимального способу досліджень нами буде використано напрацювання для дослідження поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінках трубопроводів та перенесення отриманих підходів та алгоритмів на металеві конструкції.

Теоретичне обґрунтування. Успішним досвідом використання ультразвукових методів контролю технічного стану магістральних газопроводів є його широке застосування в багатьох суміжних галузях. Трубопроводи, які використовуються в нафтогазовій промисловості для перекачування нафтопродуктів і газу, бувають різного типу, розміру і призначення - прямі ділянки лінійної частини магістральних газопроводів, згинні вставки, кранові вузли перекачуючих агрегатів і компресорної станції діаметром до 1420мм і

товщиною від 16 до 45 мм, виготовлених в залежності від призначення сталі марок Х40 - Х70, 10ГС2, і 16ГС. Дані марки сталі добре піддаються прозвучуванням ультразвуку з невеликим загасанням при поширенні його в металі.

Для визначення напружень у металі стінок магістральних газопроводів використовується у даний час акустичний луно-імпульсний метод контролю [1]. Суть методу полягає у визначенні часу поширення поляризованих ультразвукових хвиль через стінку металу труб газопроводу у двох взаємно-перпендикулярних площинах з одностороннім доступом п'єзоперетворювача до досліджуваної поверхні металу. Даний метод має високу чутливість, але через відносно малу зміну часу поширення ультразвуку через товщину металу не завжди вдається визначити зміну структури металу, а відповідно і деформації. Тому дуже часто визначають частоту автоциркуляції з використанням розробленого пристрою в Івано - Франківському національному технічному університеті нафти і газу. Метод автоциркуляції дає можливість розширити діапазон контролю металу малих товщин, а також підвищити точність контролю. Для визначення напружено - деформованого стану металу трубопроводу в певному перерізі визначаємо частоти автоциркуляції f_1, f_2 у двох взаємно-перпендикулярних напрямках, за значеннями яких визначають величини напружень.

Найбільш небезпечними напруженнями є поздовжні, набуті внаслідок дії зовнішніх сил і які не завжди можна врахувати при проектуванні та кільцеві напруження, які виникають внаслідок тиску газу, визначаються [1]:

$$\delta_{20} = \frac{3PD}{2\delta}, \quad (1)$$

де δ_{20} – кільцеве напруження, викликане тиском газу P в трубі діаметром D і товщиною стінки δ .

$$\delta_{30} = \frac{PD}{2\delta}, \quad (2)$$

де δ_{30} – поздовжнє напруження труби, викликане дією зовнішніх сил, зокрема зсувом ґрунтів просіданням фундаментів, зміною температур зовнішнього середовища і температури газу, який протікає по трубі.

Площину згину трубопроводу вважаємо відомою. Частота автоциркуляції пов'язана з напруженням через співвідношення [1]:

$$f_3 + f_2 = (\bar{\sigma}_{30} + z\bar{\sigma}_{31} + \bar{\sigma}_2) \frac{f_0}{B} + 2f_0, \quad (3)$$

$$f_3 - f_2 = (\bar{\sigma}_{30} - \bar{\sigma}_2) \frac{f_0}{A} + z\bar{\sigma}_{31} \cdot \frac{f_0}{A}.$$

де f_2, f_3 – виміряні частоти імпульсів автоциркуляції в перерізі труби в поздовжньому і кільцевому напрямках; $\bar{\sigma}_{31}$ – згинне знакозмінне напруження по окружній координаті. Воно виникає у разі просідань та зсувів ґрунтів, а також у разі втрати стійкості трубопроводу; z – відстань точки контролю від перерізу її згину у вертикальній площині; f_0 – частота імпульсів в точці виміру при відсутності навантажень; A, B – константи, які враховують властивості металу труб і, як приклад, вони визначаються на зразках металу шляхом розтягу або стиснення зразків у лабораторних умовах. Вони пов'язані наступним співвідношенням [2]:

$$f = \left[\frac{f_0}{A} \right]^0 + \left[\frac{f_0}{B} \right]^1, \quad (4)$$

де перша складова формули - це значення частоти імпульсів з врахуванням константи A , тобто при відсутності навантажень, а друга складова формули - це значення частоти імпульсів з врахуванням константи B .

Використовуючи залежності зміни частоти автоциркуляції і відповідно швидкостей в двох напрямках контролю, знаходимо напруження в контрольованих точках [3]:

$$\Delta C_{вим} = A(\delta_{20} + \delta_{30}) + B(\delta_{20} - \delta_{30}), \quad (5)$$

де $\Delta C_{вим}$ - виміряна швидкість поширення поперечної ультразвукової хвилі в напруженому стані вздовж труби і в перпендикулярному напрямку.

Дана залежність може бути використана для визначення напружень у довільному напрямку.

Недоліком даної системи контролю є те, що для визначення напружень в перерізі трубопроводу потрібний доступ до даної ділянки, тобто дозволяє контролювати її на відкритих ділянках. На ділянках, де трубопровід знаходиться в ґрунті, потрібне шурфування, що знижує продуктивність контролю, при цьому

можуть виникнути додаткові напруження, а також недопустимі деформації.

Досить ефективним методом, який пропонується, для оцінки зміни напруженого стану металу, визначення дефектів з внутрішньої поверхні металу трубопроводу, а також в місцях, де трубопровід заглиблений в ґрунті, є використання нормальних хвиль, які по своїй фізичній суті є неоднорідними, так званих спрямованих хвиль. Такі хвилі утворюються при нахиленому введенні її в метал, товщина якого співрозмірна з довжиною хвилі. В цьому випадку внаслідок взаємодії падаючої хвилі з багатократним відбиттям хвилі від внутрішньої поверхні металу труби виникають резонансні явища. Вони приводять до утворення нормальних хвиль, які поширюються на великі віддалі вздовж труби і стоячих у перпендикулярному напрямку.

Для визначення фізичної суті поширення спрямованих акустичних хвиль визначають фазову і групову швидкості, які пов'язані між собою співвідношенням [1]:

$$\frac{1}{C_q} - \frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_p} \frac{dC_p}{df}, \quad (6)$$

де C_q - групова швидкість, C_p - фазова швидкість.

Фазова швидкість C_p визначає швидкість поширення хвильового фронту. Вона дозволяє враховувати частоту f ультразвукових коливань і необхідний кут падіння.

Кут, при якому відбувається резонанс падаючої і відбитої хвиль:

$$h \cos(\alpha) = n \left(\frac{\lambda}{2} \right), \quad (7)$$

де h - товщина металу труби; $n = 1, 2, 3, \dots$ і т. д.; λ – довжина хвилі; α – кут падіння хвилі.

Фазова швидкість визначається [1]:

$$C_p = \frac{C_2}{\sin(\alpha)}, \quad (8)$$

де C_2 - швидкість поширення об'ємної хвилі.

Із виразу (8) видно, що фазова швидкість залежить від частоти ультразвуку і товщини металу труби. При n непарному хвилі є симетричними і при n парному - асиметричними.

Групова швидкість C_q характеризує швидкість поширення енергії хвильового фронту імпульсу і визначається [1]:

$$C_q = C_2 \sin(\alpha) = C_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{2h}\right)^2}. \quad (9)$$

Із виразу (9) видно, що групова швидкість ніколи на перетворюється в безконечність і при $h/\lambda = n(1/2)$ прямує до нуля, в той час, як фазова швидкість прямує до безконечності.

Умови утворення спрямованих хвиль у трубопроводі ускладнюються через наявність у ньому поздовжніх і поперечних хвиль і при відбитті ці хвилі трансформуються одна в іншу, а фаза хвилі при відбитті змінюється на число відмінне не кратне π .

Побудова алгоритму проведення обчислення швидкості поширення спрямованої хвилі. Для практичного використання рівнянь (1) - (9) побудуємо алгоритм обчислення фазової та групової швидкостей спрямованих хвиль в стінці металевого трубопроводу, рис. 3.

Розроблений алгоритм складається із окремих компонентів, які використовуються як підпрограми, зображені у відповідних блоках. Алгоритм реалізований на мові програмування MatLab. Вибір мови програмування обґрунтовувався широким набором бібліотек математичних функцій, що дозволяє значно спростити пошук коренів характеристичних рівнянь. Другим важливим аргументом, що обґрунтовує вибір пакету MatLab, є детально налаштовувана компонента побудови графіків, що дозволяє не тільки здійснити представлення, але й має набір графічних функцій для подальшого аналізу даних.

Для початку роботи алгоритму необхідно ідентифікувати об'єкт дослідження, наприклад, геометричні розміри трубопроводу та матеріал стінок. В залежності від вибраного досліджуваного об'єкту вибирається робоча частота ультразвукових коливань. Найбільш впливає на вибір частоти ультразвукової хвилі товщина стінки труби. Зі збільшенням товщини стінки труби при однаковій частоті генерованої ультразвукової хвилі збільшується кількість і порядок мод спрямованих хвиль. Збільшення порядкових номерів ультразвукових спрямованих хвиль є небажаним процесом при

проведенні реального контролю, оскільки хвильова енергія не зосереджується в перших модах, а розподіляється між більшою кількістю мод та відповідно зменшується відношення сигнал / завади при реєстрації спрямованої хвилі. Також на вибір частоти ультразвукової хвилі впливає необхідна точність проведення натурних досліджень.

Робота алгоритму є ресурсоємною, і тому було прийнято рішення зробити попередній пошук частотних відрізків у вибраному діапазоні частот, щоб відфільтрувати ті частотні області, які не містять спрямованих хвиль. Для вибраних частотних відрізків застосовуються кілька алгоритмових кроків:

1) Уточнення значення хвильового числа для коренів характеристичного рівняння (існування мод). Точність пошуку задається із міркувань використання ресурсів комп'ютера та точністю натурних досліджень.

2) Здійснюється пошук горизонтально-поляризованих мод ультразвукових хвиль для уточнення наявності інших типів спрямованих хвиль у вибраному частотному діапазоні.

3) Здійснюється аналіз профілю ультразвукових спрямованих хвиль для вибраної товщини стінки трубопроводу з метою ідентифікації мод.

За отриманими наборами значень для знайдених хвильових чисел обчислюються значення фазової та групової швидкостей і будуються графіки. Необхідно зробити зауваження, що для розробленого алгоритму побудова графіків є важливим кроком, що дозволяє аналізувати вибрану частотну область інтегрально та робити рішення щодо використання діапазону поширення ультразвукових спрямованих хвиль.

Алгоритм може обчислювати і загасання амплітуди спрямованої хвилі. Ця можливість може бути реалізована шляхом перетворення хвильового числа в комплексне, де уявна частина відповідатиме за загасання. Необхідно зазначити, що пошук коренів характеристичного рівняння у випадку комплексних чисел вимагає розроблення нового алгоритму, який буде проходити не вздовж однієї осі частоти, а по площині. У випадку комплексного хвильового числа ресурси обчислення значно зростають.

Для використання обчислених результатів на практиці необхідно провести перевірку та

калібрування результатів на пристрої. З цією метою вибрану центральну частоту ультразвукової спрямованої хвилі генерують первинним давачем на зразку у лабораторних умовах та реєструють другим давачем. Калібрування здійснюється вибором найбільш оптимальних кутів нахилу первинних перетворювачів на прийомі та реєстрації ультразвукових коливань. У випадках, коли частота генерованої ультразвукової хвилі є великою для вибраної товщини стінки трубопроводу і в стінці утворюються багато вищих мод, необхідно ставити другий давач на відстані, кратній півхвилі вибраної спрямованої хвилі для підсилення корисного сигналу (моди спрямованої хвилі).

Отриману в лабораторних умовах налаштовану конструкцію із первинних перетворювачів можна використовувати в натурних умовах. Отримані відхилення від лабораторних значень є предметом подальшого аналізу та передумовою для створення рекомендації щодо технічного стану стінки трубопроводу чи ділянки трубопроводу.

Результати. Проведено тензоакустичні вимірювання. На рис. 4 показано значення отриманих напружень у чотирьох перерізах А, В, С, D. Експериментальні значення результатів апроксимовані кубічними поліномами. Як видно з рис. 4, напруження становлять менше ніж 10%

від поздовжніх стискувальних (незалежних від точки в даному перерізі). Для контролю тензоакустичним методом використовувався прилад, розроблений в ІФНТУНГ.

У табл. 1 наведено номінальні дані тривалості проходження ультразвуку в перерізах А, В, С, D. У перерізах А, В тривалість проходження ультразвуку в стінці труби відрізняється від тривалості проходження в перерізах С, D, що свідчить про різну товщину металу труб, а саме 16,5 мм для перерізів А і В і 18,5 мм для перерізів С і D відповідно. За даними, отриманими по кожному перерізу, швидкість проходження ультразвуку в точках перерізу практично однакова, тобто напруження в стінці труби розподілено рівномірно, а отже можна стверджувати, що труби між перерізами В і С мають косий стик. Допустимі напруження, які було встановлені, є визначальним чинником для подальшого проведення ремонтних робіт.

Нами було прораховано акустичний тиск в стінці металевого пружного середовища на окремих точках віддалення від первинного перетворювача, табл. 2.

Результати акустичного тиску із табл. 2 є основою для перевірки (тестування) результатів моделі поширення спрямованої хвилі та натурального експерименту

Таблиця 1 – Тривалість проходження ультразвуку крізь стінку труби

Переріз	Тривалість проходження ультразвуку		Інтервал часу між двома відбиттями, Δt
	5-те відбиття	4-те відбиття	
A	22988	17407	5581
B	22963	17384	5579
C	27153	20535	6618
D	27149	20536	6613

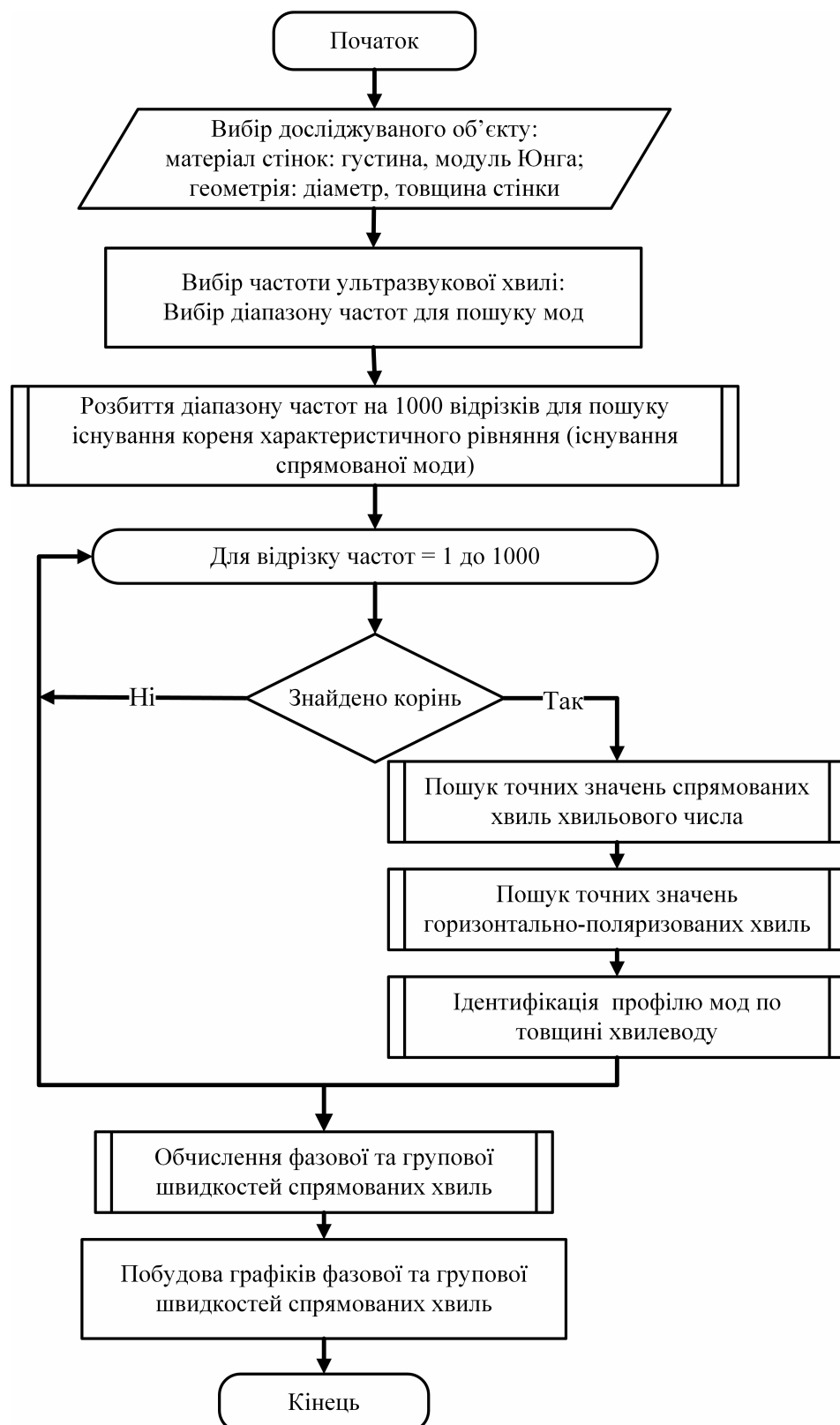
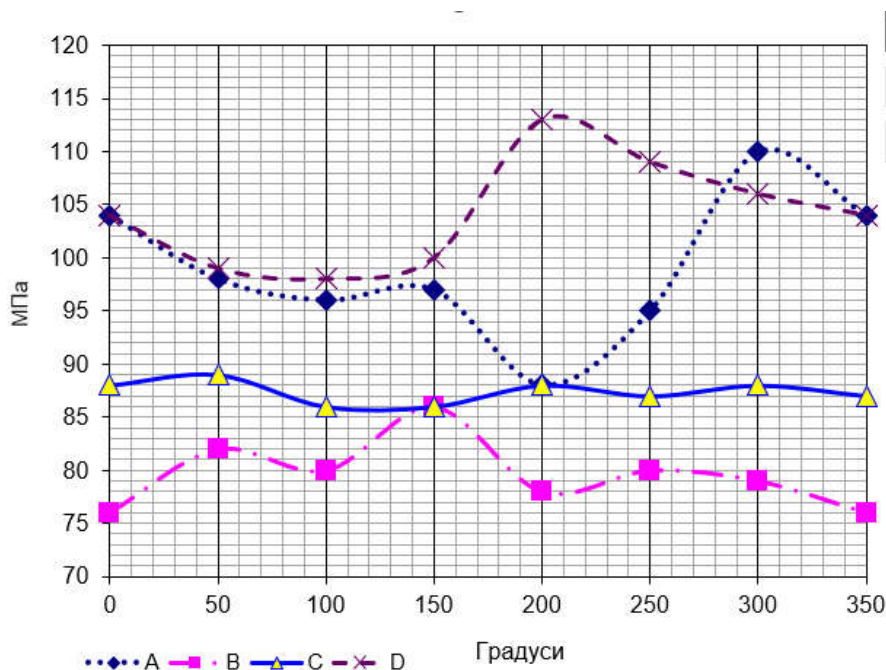


Рисунок 3 – Алгоритм обчислення групової та фазової швидкостей поширення ультразвукової спрямованої моди в стінках металевих конструкцій



Переріз А віддалено від зварного шва на відстань 12 м, а переріз D – на відстань 8,5 м. Перерізи В і С знаходяться безпосередньо в зоні сполучення труб на відстані 0.85 м від зварного шва

Рисунок 4 – Трубопровідні напруження

Таблиця 2 – Акустичний тиск на окремих точках пружного середовища поширення спрямованої хвилі

Координата відстані по довжині труби, м	Координата відстані по товщині стінки труби, м	Акустичний тиск, Па
0.041287	-0.0010099	1.6359E5
0.041287	-0.0022291	1.8713E5
0.041693	-0.0042611	-37826
0.041287	-0.0061576	-30096
0.041558	-0.0090025	-15844
0.041422	-0.010222	1563.2
0.041151	-0.011441	1126.9
0.041151	-0.013067	69680
0.041151	-0.013879	74595
0.046570	-0.013879	-56263
0.046977	-0.011441	-91977
0.046841	-0.010086	-1.1976E5
0.046706	-0.0084606	-1.4811E5
0.046706	-0.0058867	-6029.0
0.046435	-0.0039901	75437
0.046435	-0.0027709	1.2818E5
0.046706	-0.0012808	1.2571E5
0.049686	-0.0010099	-6034.5

Продовження таблиці 2

0.049686	-0.0026355	-36734
0.049821	-0.0042611	-59537
0.049957	-0.0073768	15281
0.049957	-0.0087315	36496
0.049957	-0.011576	55659
0.049957	-0.012931	36796
0.052666	-0.013337	-3787.5
0.053344	-0.011441	-36023
0.053073	-0.0095443	12947
0.052937	-0.0081897	3208.6
0.052937	-0.0062931	-12033
0.052937	-0.0045320	-19273
0.052937	-0.0033128	-5765.4
0.052937	-0.0019581	23005

Висновки. Встановлено, що застосування ультразвукових спрямованих хвиль для контролю технічного стану стінок трубопроводів підвищує точність контролю, оскільки через особливість поширення, хвилею охоплюється об'єм металу стінок в сотні разів більшою, аніж при використанні традиційних методів на основі об'ємних ультразвукових хвиль.

Розроблений алгоритм обчислення фазової та групової швидкостей ультразвукових спрямованих хвиль можна застосовувати для товщин стінок, що на порядок перевищують довжину спрямованої ультразвукової хвилі.

Точність визначення існування спрямованих ультразвукових хвиль для розробленого алгоритму є в прямій пропорційній залежності від використання ресурсів комп'ютера і відповідно повинна регулюватись, виходячи із обчислювальних можливостей.

Список використаних джерел

1. Лютак І. З., Кісіль І. С. Ультразвуковий контроль параметрів технічного стану магістральних трубопроводів. Івано-Франківськ, 2010. 285 с.
2. Cantrell, J. H., and K. Salama. Acoustoelastic characterisation of materials. *International materials reviews*. 1991 36, no. 1. 125 – 145.
3. Man, Chi-Sing, and W. Y. Lu. Towards an acoustoelastic theory for measurement of residual stress. *Journal of elasticity* 1987 17, no. 2 p. 159-182.

4. Wang, Ting-Ting, Yan-Feng Wang, Zi-Chen Deng, Vincent Laude, and Yue-Sheng Wang. Reconfigurable coupled-resonator acoustoelastic waveguides in fluid-filled phononic metaplates. *Composite Structures* 2033 303 p. 116 – 355.

5. Zeng, Shengyang, Jinying Zhu, Bibo Zhong, and Xiongbing Li. Thermo-acoustoelastic effect of Rayleigh wave: Theory and experimental verification. *Ultrasonics*. 2023p 106 – 948.

References

1. Lyutak I.Z., Kisil' I.S. Ul'trazvukovyy kontrol' parametriv tekhnichnoho stanu mahistral'nykh truboprovodiv. Ivano-Frankivs'k, 2010. 285 s. [in Ukrainian]
2. Cantrell, J. H., and K. Salama. Acoustoelastic characterisation of materials. *International materials reviews*. 1991 36, no. 1. 125 – 145.
3. Man, Chi-Sing, and W. Y. Lu. Towards an acoustoelastic theory for measurement of residual stress. *Journal of elasticity* 1987 17, no. 2 p. 159-182.
4. Wang, Ting-Ting, Yan-Feng Wang, Zi-Chen Deng, Vincent Laude, and Yue-Sheng Wang. Reconfigurable coupled-resonator acoustoelastic waveguides in fluid-filled phononic metaplates. *Composite Structures* 2033 303 p. 116 – 355.
5. Zeng, Shengyang, Jinying Zhu, Bibo Zhong, and Xiongbing Li. Thermo-acoustoelastic effect of Rayleigh wave: Theory and experimental verification. *Ultrasonics*. 2023 p. 106 – 948.

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 532.538;621.38

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-36-45

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ ЗА ЕЛЕКТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Є. В. Походило, Ю. А. Стасишин**Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, вул. С. Бандери, 12,
Україна, 79013. E-mail: yevhen.v.pokhodylo@lpnu.ua, yurii.a.stasyshyn@lpnu.ua*

Наведено метод ідентифікації харчової продукції за результатами вимірювання електричних параметрів. Такими параметрами вибрано реактивну та активну компоненти адмітансу багатоеlementного двополюсника, яким подається контрольована продукція. У роботі наведено електричну модель первинного ємнісного перетворювача двоелектродної конструкції з неізолюваними електродами та контрольованим харчовим продуктом. Вона містить паралельне з'єднання еквівалентних ємності та опору контрольованого об'єкта та послідовно ємності подвійного шару кожного з електродів. Відповідно до електричної моделі отримано математичну модель у вигляді аналітичного виразу, що описує активну та реактивну компоненти адмітансу. Проаналізовано такі моделі в широкому частотному діапазоні для різних значень параметрів. Активна та реактивна компоненти адмітансу залежать пропорційно від реактивної та активної провідностей контрольованого об'єкта. Разом з тим, зміна характеру кривих, що описують активну та реактивну компоненти, також залежать від співвідношення між активною провідністю об'єкта контролю та ємністю подвійного шару і частотою. Відповідно до математичної моделі реактивна компонента визначається сумою складових. Одна складова пропорційна ємності подвійного шару, а друга – еквівалентній ємності об'єкта. Із зростанням частоти перша зменшується, а друга зростає. Відповідно, зменшення частоти призводить до зростання першої і зменшення другої. Звідси очевидним є те, що в широкому частотному діапазоні крива, що описує реактивну компоненту, має два екстремальних значення. Також за отриманими результатами моделювання можна оцінити вплив ємності подвійного шару на зміну компонент адмітансу при сталих інших параметрах математичної моделі в широкому частотному діапазоні. На основі цього виявлено ідентифікаційні ознаки, за якими доцільно ідентифікувати харчову продукцію. Однією з них є залежність активної компоненти від частоти. На початку діапазону така зміна є нелінійною і залежить від частоти, а на вищих частотах має адитивний характер від частоти. Іншою ідентифікаційною ознакою є зміна форми кривої, що відображає реактивну компоненту адмітансу. Характерною ознакою є наявність двох екстремальних значень, які є максимальними та мінімальними відповідно до діапазону частот. При цьому екстремальне значення для різного значення активної провідності об'єкта має свою частоту, а також змінюється за амплітудою. Зроблено висновки щодо застосування виявлених ідентифікаційних ознак для ідентифікації харчових продуктів за параметрами адмітансу.

Ключові слова: адмітанс; імпеданс; активна компонента; реактивна компонента; ідентифікація; імпедансна спектроскопія; математична модель; електрична модель

The method of identification of food products based on the results of measuring electrical parameters is given. These parameters are used to select the reactive and active components of the admittance of the multi-element bipolar device, which supplies the controlled products. The paper presents an electrical model of a primary capacitive transducer of a two-electrode design with non-insulated electrodes and a controlled food product. It contains a parallel connection of the equivalent capacitance and resistance of the controlled object and in series the capacitance of the double layer of each of the electrodes. According to the electrical model, a mathematical model was obtained in the form of an analytical expression describing the active and reactive components of the admittance. Such models were analyzed in a wide frequency range for different values of model parameters. The active and reactive components of the admittance depend proportionally on the reactive and active conductivities of the controlled object. At the same time, the change in the nature of the curves describing the active and reactive components also depends on the ratio

between the active conductivity of the control object and the double-layer capacity and frequency. According to the mathematical model, the reactive component is determined by the sum of the components. One component is proportional to the capacity of the double layer, and the second is to the equivalent capacity of the object. As the frequency increases, the first decreases, and the second increases. Accordingly, a decrease in frequency leads to an increase in the first and a decrease in the second. From this it is obvious that in a wide frequency range the curve describing the reactive component has two extreme values. Also, based on the obtained simulation results, it is possible to estimate the influence of the double-layer capacitance on the change in the admittance components with constant other parameters of the mathematical model in a wide frequency range. On the basis of this, identifying signs were found, which should be used to identify food products. One of them is the frequency dependence of the active component. At the same time, at the beginning of the range, such a change is non-linear and depends on the frequency, and at higher frequencies it has an additive character depending on the frequency. Another identifying feature is a change in the shape of the curve, which reflects the reactive component of the admittance. A characteristic feature is the presence of two extreme values, which are maximum and minimum according to the frequency range. At the same time, the extreme value for a different value of the active conductivity of the object has its own frequency, and also changes in amplitude. Conclusions were made regarding the application of the identified identification features for the identification of food products by admittance parameters.

Key words: admittance; impedance; active component; reactive component; identification; impedance spectroscopy; mathematical model; electric model

Вступ. Розширення ринків реалізації харчової продукції сприяє її фальсифікації. Це стає проблемою для державних контролюючих органів та споживачів фальсифікованої продукції. Найпоширенішими методами фальсифікації харчових продуктів є її підміна, розбавлення, приховування інформації, неправильне маркування та підроблення. З метою забезпечення певних органолептичних характеристик (смак, аромат, колір тощо) фальсифікують харчові продукти через додавання до неї різного виду добавок. При цьому досить важко відрізнити справжній продукт від фальсифікованого. Ідентифікувати справжній харчовий продукт чи виявити фальсифікацію можливо лише в результаті проведення складних та лабораторних досліджень. Недоліком всіх традиційних методів та засобів контролю якості та безпечності харчових продуктів є їхня складність та тривалість у застосуванні. Такі засоби здебільшого є вартісними та часто недоступними широкому колу споживачів харчової продукції. Разом з тим, широкого використання набули електричні методи вимірювання, що виділяються багатьма своїми перевагами. Серед таких методів є метод імпедансної спектроскопії [2] або імітансний метод [4], який характеризується тим, що об'єкт контролю неелектричної природи можна подати у колі змінного струму у вигляді дво- або багатоелементного двополюсника. Одним із практичних реалізацій такого методу є

вимірювання параметрів моделі об'єкта контролю і базового зразка (поданих двополюсниками) за певних умов та порівняння параметрів цих двох двополюсників. А параметри таких двополюсника містять основну інформацію про фізико-хімічні властивості контрольованого та базового зразків об'єктів. Електричні параметри двополюсника відображають відповідні одиничні показники якості харчової продукції (домішки, концентрацію, жирність, вологість, вміст добавки тощо).

Об'єкт дослідження – методи та засоби ідентифікації харчової продукції.

Предмет дослідження – ідентифікація харчової продукції за параметрами адмітансу.

Мета роботи – створення способів ідентифікації харчових продуктів за електричними параметрами.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: проаналізувати способи ідентифікації фальсифікованої продукції, дослідити зміни параметрів адмітансу за певних умов дослідження в частотному діапазоні, проаналізувати електричну та математичні моделі первинного перетворювача «об'єкт-адмітанс», запропонувати ідентифікаційні ознаки, за якими можна реалізувати ідентифікацію

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – запропоновано ідентифікаційні ознаки, за якими можна ідентифікувати

харчову продукцію. Вони полягають в тому, що активна компонента адмітансу об'єкта контролю пропорційно залежить від його інформативного опору. Реактивна складова того ж об'єкта має як амплітудну, так і частотну залежність, а саме на окремих частотах значення реактивної складової має екстремальне значення, частотна залежність якого зв'язана з інформативною реактивною компонентою об'єкта.

Практична значущість результатів дослідження – запропоновані ідентифікаційні ознаки можуть бути використані для розроблення відповідних портативних технічних засобів контролю якості продукції або враховані у разі використання для досліджень харчових продуктів серійних CLR-метрів.

Аналіз досліджень та публікацій.

Багато останніх досліджень та публікацій щодо контролю якості та безпечності харчових продуктів стосується як нормативного [1], так і методично-технічного забезпечення. Серед електричних методів технічного забезпечення одним із найпоширенішим є метод імпедансної [2] або адмітансної [3] спектроскопії, що справедливим є узагальнений термін «імпедансної спектроскопії». Відомий імітансний метод контролю якості [4], суть якого полягає в тому що аналізуються параметри імпедансу чи адмітансу об'єктів неелектричної природи в широкому частотному діапазоні. Запропоновано метод вимірювання твердості води за параметрами імітансу та його метрологічне забезпечення [5]. Відомий спосіб експресного визначення вмісту етилового спирту у водно-спиртовому розчині [6], а також розроблено імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових напیتків [7]. Використовується електричний метод ідентифікації м'ясної продукції, зокрема досліджено залежність імпедансу від електропровідності м'яса [8] та спосіб ідентифікації свіжого та розмороженого м'яса методом імпедансної спектроскопії [9]. Електроімпедансна спектрометрія використовується для контролю процесу виробництва подрібнених м'ясних продуктів [10]. Також електричний метод використовується для контролю якості та дозрівання деяких фруктів, зокрема

спектроскопії електричного імпедансу мандарина під час дозрівання [11], дозрівання та розвиток охолодження у плодах хурми [12].

Імітансний метод ідентифікації харчових продуктів

Одним з електричних методів контролю є метод імпедансної чи адмітансної спектроскопії (тобто імітансної спектроскопії або імітансний метод). Такий метод контролю якості продукції [4] ґрунтується на тому, що вона подається багатоелементним двополюсником, параметри якого відображають її фізико-хімічні властивості. Тобто, за зміною електричних параметрів можна судити і про зміну показників якості продукції. Одним із практичних реалізацій такого методу є вимірювання параметрів моделі об'єкта контролю і базового зразка (поданих двополюсниками) у певних умовах та порівняння параметрів цих двох двополюсників. Такими параметрами є активна та реактивна компоненти імітансу двополюсника на різних частотах або окремі параметри елементів. На основі теорії електричних кіл можна сказати, що еквівалентними є двополюсники, в яких комплексні опори (імпеданси) або комплексні провідності (адмітанси) є рівними $Z_{x1} = Z_{x2}$, $Y_{x1} = Y_{x2}$. Відповідно, вони можуть замінювати один одного, не змінюючи характеристик кола, з яким вони сполучені. Еквівалентність може мати місце на одній частоті, в певному діапазоні частот або в всьому діапазоні від нуля до нескінченості. Можна вважати, що стосується це і двополюсників, якими подається у нашому випадку харчова продукція. У цьому і полягає суть застосування імітансного методу ідентифікації харчової продукції, за допомогою якого можна встановити електричні параметри як контрольованого, так і базового зразків продукту у вигляді окремих електричних параметрів багатоелементного двополюсника, яким їх подають. Якщо схема заміщення (електрична модель) об'єкта відома, то такими параметрами будуть елементи схеми. Для невідомої моделі (у більшості випадків) інформативними параметрами будуть активні та реактивні компоненти імпедансу та адмітансу на окремих частотах тестового сигналу. Окрім цього інформативними параметрами також можуть бути модулі та фазові кути або

еквівалентні ємності та опори схеми, поданими паралельною чи послідовною схемами заміщення. Тобто, імпеданс та адмітанс можна зобразити у вигляді векторів на комплексній площині для будь-якої частоти тестового

сигналу. На рис. 1 показано вектори імпедансів Z_x, Z_0 (рис. 1а) та адмітансів Y_x, Y_0 (рис. 1б) контрольованого та базового зразків, їхні модулі та фазові кути, активні та реактивні складові.

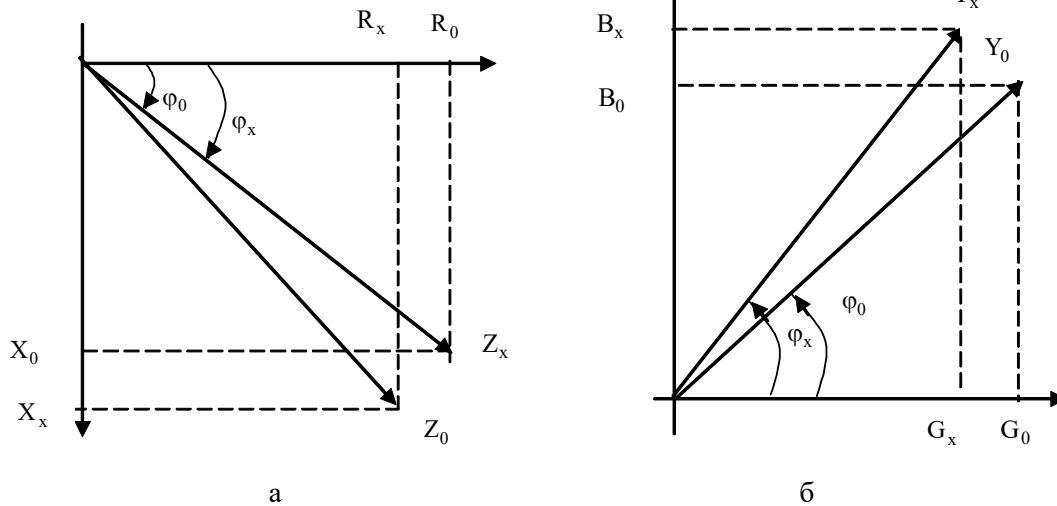


Рисунок 1 – Вектори імпедансів та адмітансів об’єктів порівняння на одній частоті

Не співпадіння векторів імітансу, як показано на рис. 1, контрольованої та базової продукції свідчить про різний рівень її внутрішньої структури, а відповідно і показників якості. Кількісне оцінювання здійснюється за результатами вимірювання та порівнянням параметрів, що характеризують зазначені вектори, а саме: модуль і фаза, активна та реактивна компоненти або інші комбінації перелічених параметрів [4].

Концепція диференційного імітансного методу [4] ідентифікації харчової продукції за складовими адмітансу ґрунтується на вимірюванні параметрів електричної моделі, якою подається об’єкт контролю. У такому разі для складових адмітансу, як інформативних параметрів, відносні показники відповідно до складової адмітансу описуються виразами

$$\left(\frac{\text{Re}(Y_x)}{\text{Re}(Y_0)}\right)_{f_1} = A_1, \left(\frac{\text{Re}(Y_x)}{\text{Re}(Y_0)}\right)_{f_2} = A_2, \left(\frac{\text{Re}(Y_x)}{\text{Re}(Y_0)}\right)_{f_3} = A_3, \dots, \left(\frac{\text{Re}(Y_x)}{\text{Re}(Y_0)}\right)_{f_n} = A_n, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\text{Im}(Y_x)}{\text{Im}(Y_0)}\right)_{f_1} = P_1, \left(\frac{\text{Im}(Y_x)}{\text{Im}(Y_0)}\right)_{f_2} = P_2, \left(\frac{\text{Im}(Y_x)}{\text{Im}(Y_0)}\right)_{f_3} = P_3, \dots, \left(\frac{\text{Im}(Y_x)}{\text{Im}(Y_0)}\right)_{f_n} = P_n, \quad (2)$$

де Y_x, Y_0 - адмітанси досліджуваних зразків контрольованого та базового об’єктів;

$\text{Im}(Y_x), \text{Re}(Y_x), \text{Im}(Y_0), \text{Re}(Y_0)$ - реактивна та активна складові досліджуваних зразків контрольованого та базового об’єктів;

$f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ - частоти, на яких вимірюються складові;

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ - відношення активних складових;

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ - відношення реактивних складових.

За результатами вимірювань одержані значення повинні міститися в заданих межах для конкретного об’єкта контролю. На основі цього можна ідентифікувати продукцію як таку, що відповідає або не відповідає заданому рівні якості. Тобто, загалом вимірювальна процедура зводиться до визначення відмінності між

електричними параметрами адмітансу досліджуваного та базового зразків.

Електрична та математична моделі первинного перетворювача «об'єкт-адмітанс»

Для вибору електричної моделі первинного перетворювача скористаємося графічними залежностями отриманими за результатами дослідження спиртового розчину з різним вмістом спирту у дистильованій воді

[13]. Отримані результати експериментальних досліджень у графічному вигляді наведені на рис. 2-4. На рис. 2 та рис. 3 зображені залежності активних та реактивних складових від частоти в діапазоні 100 Гц – 100 кГц для різного рівня концентрації спиртового розчину, а на рис. 4 зображено їхню залежність від частоти у діапазоні 50 Гц - 1 кГц.

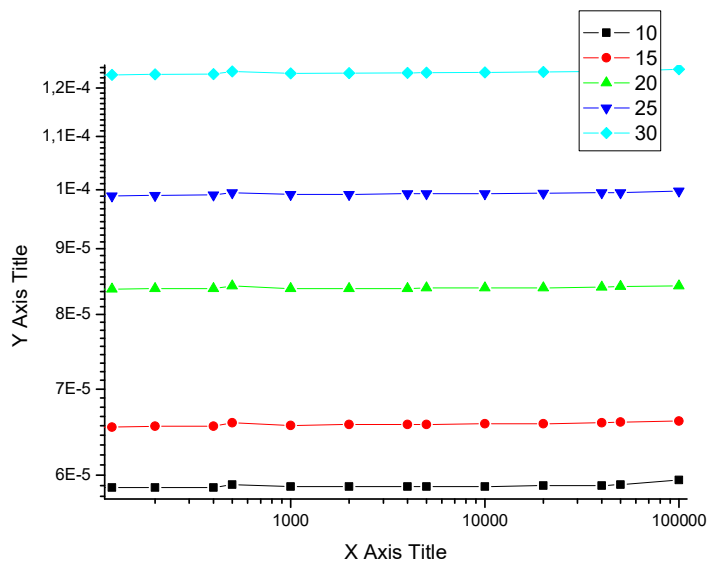


Рисунок 2 – Залежність активних складових адмітансів спиртових розчинів різної концентрації від частоти в діапазоні 100 Гц – 100 кГц.

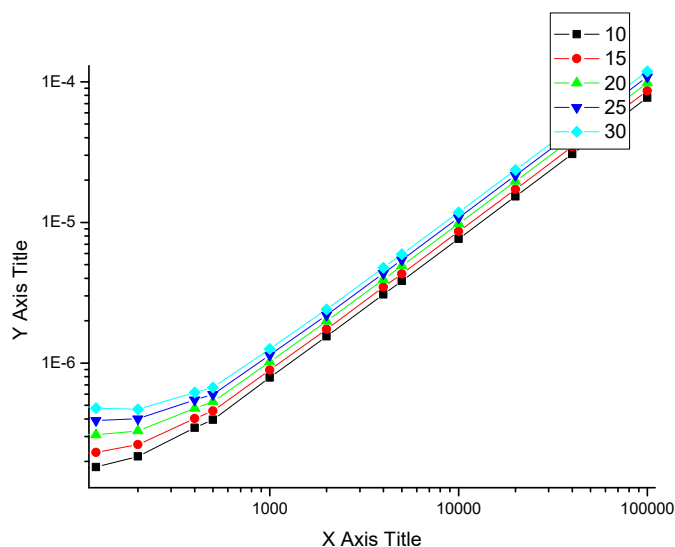


Рисунок 3 – Залежність реактивних складових адмітансів спиртових розчинів різної концентрації від частоти в діапазоні 100 Гц – 100 кГц.

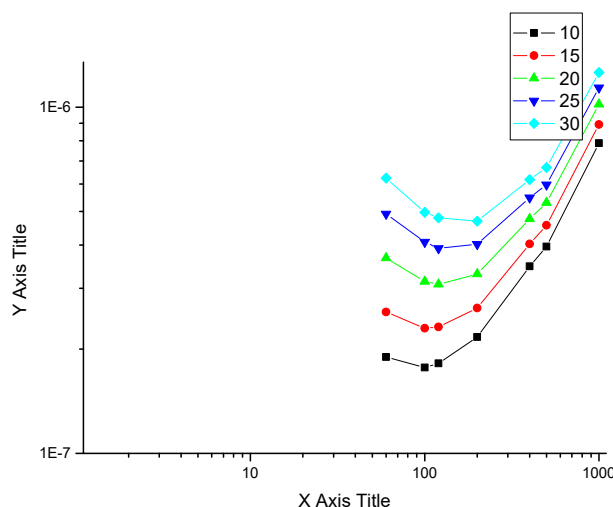


Рисунок 4 – Залежність реактивних складових адмітансів спиртових розчинів різної концентрації від частоти в діапазоні 50 Гц – 1 кГц

Аналіз графічних залежностей складових адмітансу показує, що активна складова практично не залежить у вказаному діапазоні від частоти тестового сигналу. Амплітудний рівень складової пропорційний до концентрації спиртового розчину. Реактивна складова містить нелінійну складову до 1 кГц (рис. 3), а далі є лінійною. Амплітудне її значення також залежить від концентрації. Для кращої наглядності нелінійності кривих на рис. 4 показано фрагмент залежності її від частоти в діапазоні 50 Гц – 1 кГц. З рисунка видно, що криві мають явно виражені екстремальні значення на різних частотах заданого діапазону. При цьому вони є пропорційними до концентрації розчину. Звідси виходить, що електрична модель спиртового розчину повинна містити суму реактивностей, які по різному впливають на форму кривої. На низьких частотах амплітудне значення складової зростає набагато швидше від впливу другої реактивності до деякої частоти. Потім вплив реактивностей вирівнюється, після чого вплив першої реактивності спадає, а другої зростає. У такому разі перша реактивність це приелектродний імпеданс ємнісного характеру, а друга імпеданс розчину, схема якого містить паралельно з'єднані еквівалентні ємність та опір. Приелектродний імпеданс на межі «електрод - об'єкт» складається з послідовного з'єднання елементів С та R, що характеризують

імпеданс Варбурга, які паралельно з'єднанні з приелектродною ємністю C_n . Однак, з урахуванням того, що дослідження здійснюються на частотах, на яких інші види імпедансів, наприклад імпеданс Варбурга [15], неінформативні послідовні та паралельні імпеданси практично відсутні, то електрична модель може бути спрощеною. Отже, можна вважати, що приелектродний імпеданс визначається, в основному, імпедансом, утвореним ємністю подвійного шару. На основі цього для подальших досліджень можна використовувати спрощену електричну модель контактного (з неізолюваними електродами) первинного перетворювача, яка зображена на рис. 5.

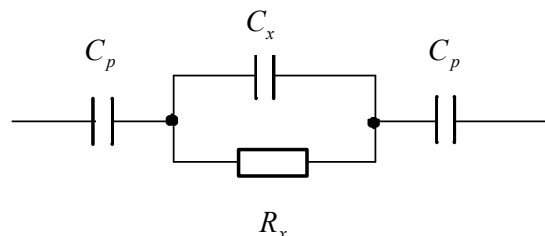


Рисунок 5 – Спрощена схема заміщення двоелектродного імітансного сенсора

На схемі конденсатор C_p відображає ємність подвійного шару першого та другого

електродів; R_x та C_x - еквівалентні опір та ємність об'єкта контролю.

Ємність подвійного шару пропорційна площі електродів. Якщо електроди первинного перетворювача мають однакову активну площу (площа електрода, що контактує з об'єктом контролю), то і приелектродні ємності однакові. Це властиве ємнісному первинному перетворювачу плоско-паралельної конструкції. Для перетворювачів коаксіальної конструкції така рівність не забезпечується, оскільки площа електродів є різною. Вона залежить від діаметрів електродів та їхньої довжини, а тому співвідношення площ, а відповідно і ємностей C_p подвійного шару пропорційне відношенню діаметрів електродів такого сенсора.

Математична модель відповідно до електричної моделі (рис. 5) в частотному діапазоні описується імпедансом Z_x :

$$Z_x = \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} = \frac{1 + j\omega C_x R_x + j\omega C_p R_x}{j\omega C_p (1 + j\omega C_x R_x)} \quad (3)$$

або з урахуванням $Y_x = \frac{1}{Z_x}$ та $C_x \ll C_p$ [2]

адмітансом Y_x :

$$\text{Im}(Y_x) = \omega C_p \frac{1}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} + \omega C_x \frac{1}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = \omega C_p \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega C_p}{G_x}\right)^2} + \omega C_x \frac{1}{1 + \left(\frac{G_x}{\omega C_p}\right)^2} \quad (8)$$

Проаналізуємо отримані математичні моделі активної (7) та реактивної (8) складових адмітансу. З виразів (7), (8) очевидно, що на характер активної та реактивної складових впливає співвідношення між активною

провідністю G_x $\left(G_x = \frac{1}{R_x}\right)$ об'єкта контролю

та реактивною провідністю ωC_p , утвореною ємністю подвійного шару. При цьому рівень впливу визначається значенням такого співвідношення у порівнянні з одиницею. Тому розглянемо такий вплив за крайніх умов, а саме

за умови $\left(\frac{G_x}{\omega C_p}\right)^2 \ll 1$.

У такому разі зазначені складові матимуть вигляд:

$$\text{Re}(Y) = G_x, \quad (9)$$

$$Y_x = \frac{j\omega C_p (1 + j\omega C_x R_x)}{1 + j\omega C_x R_x + j\omega C_p R_x} = \frac{j\omega C_p (1 + j\omega C_x R_x)}{1 + j\omega C_p R_x}. \quad (4)$$

З урахуванням перетворення виразу (4) матимемо:

$$Y_x = \frac{(j\omega C_p - \omega^2 C_p C_x R_x)(1 - j\omega C_p R_x)}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} \quad (5)$$

З виразу (5) виділимо активну складову адмітансу:

$$\text{Re}(Y_x) = \frac{\omega^2 C_p^2 R_x^2 - \omega^2 C_p C_x R_x}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = \frac{\omega^2 C_p^2 R_x^2 \left(1 - \frac{C_x}{C_p R_x}\right)}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2}, \quad (6)$$

а після перетворення (6) з урахуванням $\frac{C_x}{C_p} \ll 1$ та матимемо:

$$\text{Re}(Y_x) = \frac{\omega^2 C_p^2 R_x^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = G_x \frac{1}{1 + \omega^2 C_p^2 R_x^2} = G_x \frac{1}{1 + \left(\frac{G_x}{\omega C_p}\right)^2} \quad (7)$$

Аналогічно з виразу (5) виділимо реактивну складову адмітансу:

$$\text{Im}(Y) = \omega C_x + \frac{G_x^2}{\omega C_p} \quad (10)$$

Аналіз виразу (9) показує, що на високих частотах активна складова адмітансу не залежить від частоти. Як видно з виразу (10) розширення діапазону частот у сторону зменшення визначається співвідношенням

$\frac{G_x}{\omega C_p}$. Амплітудний рівень активної складової

адмітансу пропорційний інформативному параметру G_x . На низьких частотах залежність активної складової нелінійний, а діапазон частот, у якому є така не лінійність,

визначається співвідношенням $\frac{G_x}{\omega C_p}$. Аналіз

виразу (8) показує, що реактивна складова містить дві частини. Перша стосується впливу

ємності C_x , а друга - ємності C_p . При цьому їхній вплив на результат (8) різний і визначається співвідношенням між активною провідністю та ємністю подвійного шару, $\frac{G_x}{\omega C_p}$

або навпаки $\frac{\omega C_p}{G_x}$.

Прийнята умова досягається високою частотою тестового сигналу та низькою активною провідністю при сталому значенні ємності подвійного шару для вибраного типу первинного перетворювача. За такої умови матимемо незалежність активної складової адмітансу (9) від ємності подвійного шару у даному частотному діапазоні. Разом з тим, за цих же умов реактивність (10) визначається сумою складових, які по різному залежать від частоти, а саме: якщо то перша зростає лінійно із зростанням частоти, то друга із зростанням частоти нелінійно зменшується. Тобто маємо не лінійність реактивної складової на низьких частотах, оскільки переважає друга складова над першою. В подальшому із зростанням частоти вплив другої складової на реактивність (10) зменшується.

За умови $\left(\frac{G_x}{\omega C_n}\right)^2 \gg 1$, а відповідно

матимемо $\left(\frac{\omega C_n}{G_x}\right)^2 \ll 1$, отримуємо наступні вирази:

$$\operatorname{Re}(Y) = \frac{\omega^2 C_n^2}{G_x} \quad (11)$$

$$\operatorname{Im}(Y) = \omega C_p + \omega C_x \frac{\omega^2 C_p^2}{G_x^2} \quad (12)$$

Досягається така умова малою частотою та високою провідністю при сталому значенні ємності подвійного шару. За такої умови, як видно з виразів (11) та (12), активна складова пропорційна квадрату частоти та обернено пропорційна активній провідності. За цих же умов реактивність (12) визначається сумою складових, які по-різному залежать від частоти, а саме: якщо перша із зростанням частоти зростає лінійно, то інша зростає нелінійно із

зростанням частоти. Тобто маємо не лінійність реактивної складової на низьких частотах, оскільки переважає друга складова над першою. В подальшому із зростанням частоти вплив другої складової зростає скоріше.

Отже, на основі аналізу математичних моделей за крайніх умов та аналіз частотної залежності реактивної складової можна зробити висновок, що крива, що її описує має два екстремальні значення у частотному діапазоні. На початку діапазону реактивна складова зростає до екстремального (максимального) значення, а потім спадає до екстремального (мінімального) значення. Визначається це також окрім частоти активною електропровідністю об'єкта.

Обговорення результатів дослідження

Розглянуто використання двоелектродного ємнісного сенсора з об'єктом контролю з урахуванням впливу приелектродного імпедансу для режимів вимірювання активної та реактивної компонент адмітансу об'єктів контролю. З метою оцінювання залежностей інформативних параметрів, а також впливу ємності подвійного шару на результат авторами проаналізовано математичні моделі реактивної та активної компонент в широкому частотному діапазоні. При цьому виявлено різний вплив параметрів приелектродного імпедансу на його активну та реактивну складові. За результатами аналізу математичних моделей реактивної складової імпедансу та адмітансу контрольованого об'єкта в широкому частотному діапазоні таких схем показано, що на низьких частотах реактивна складова як імпедансу, так і адмітансу визначається переважно ємністю подвійного шару, а на вищих частотах переважає ємність об'єкта контролю. Такий перехід від низьких частот до вищих супроводжується тим, що реактивна складова набуває екстремальних значень в частотному діапазоні. Це може бути ідентифікаційною ознакою об'єктів контролю неелектричної природи різного походження, зокрема контролю концентрації солей у водних розчинах, горілочних виробів, м'яса тощо [3,5,8]. Окрім цього на низьких частотах ємність подвійного шару можна використати як інформативний параметр об'єкта контролю.

Висновки

1. Отримано математичні моделі активних та реактивних компонент, за якими можна здійснювати комп'ютерне моделювання в широкому частотному діапазоні і для різних значень інформативних параметрів.

2. Зміна характеру кривих, що описують активну та реактивну компоненти залежать від співвідношення між активною провідністю об'єкта контролю та ємністю подвійного шару і частотою.

3. Реактивна компонента визначається сумою двох складових, одна з яких пропорційна ємності подвійного шару, а друга – еквівалентній ємності об'єкта. При цьому із зростанням частоти перша зменшується, а друга зростає. Відповідно, зменшення частоти призводить до зростання першої і зменшення другої.

4. На основі результатів аналізу математичної моделі запропоновано ідентифікаційні ознаки, за якими можна здійснювати ідентифікацію харчової продукції.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 22000:2019 (ISO 22000:2019 IDT). Системи керування безпечністю харчових продуктів.

2. Григорчак І. І. Імпедансна спектроскопія: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 352 с.

3. Pokhodylo Ye., Stasyshyn Y. Identification of food products with additive E621 according to admittance parameters. *Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2022. Вип. 83, № 4. С. 43–46.

4. Походило Є. В. Імітансний контроль якості: монографія. Л.: НУЛП, 2012. – 164 с.

5. Мартинович Н.В. Метод вимірювання твердості води за параметрами імітансу та його метрологічне забезпечення: Автореф. дис. кандидата техн. наук. НУ «Львівська політехніка» МОН України. - Львів, 2012. – 18 с.

6. Патент України № 93243. Спосіб експресного визначення вмісту етилового спирту в водно-спиртовому розчині, МПК G01N27/48, G01N27/02, від 25.09.2014.

7. Пат. на КМ №93243 Україна, МПК G01N27/48, G01N27/02. Імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових

напитків / Кукла А. Л., Павлюченко А. С., Майстренко А. С., Мамикін А. В. Технологія і конструювання в електронній промисловості, Київ, 2012, №1, С.15-21.,

8. Походило Є. В., Флюнт Н. Б. Ідентифікація свіжого та розмороженого м'яса методом імпедансної спектроскопії. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2010 № 80 (3). С. 15-20.

9. Щебетовська О. О., Бик О. О. Визначення свіжості курячого м'яса методом імпедансної спектроскопії. ЛНУВМ ім. С. Гжицького. 2011. вип. 13, № 4(4), С. 352–358.

10. Chanet, M., Riviere, C., and Eynard, P.: Electroimpedance spectrometry for process control of minced meat products. *Food Eng.* 1999. № 42, p. 153–159.

11. Chowdhury, A., Singh, P., Kanti Bera, T., Ghoshal, D., and Chakraborty, B.: Electrical impedance spectroscopy study of mandarin during ripening. *Food Meas. Character.* 2017 p 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9545-y>, 2017b.

12. Harker, F. R. and Forbes, S. K.: Ripening and chilling development in persimmon fruit: an electrical impedance study. *New Zeal Crop Hort.* 1997. № 25, P. 149–157.

13. Походило Є. В., Юзва В. З. Вимірювання електрофізичних параметрів спиртових розчинів. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології: міжвідомчий науково-технічний збірник. Видавництво Національного університету "Львівська політехніка"*, 2015. №1.С.37-45.

14. Герасим М. Р. Розвиток метрологічного забезпечення вимірювання електрофізичних параметрів об'єктів кваліметрії неелектричної природи: Автореф. дис. кандидата техн. наук / НУ «Львівська політехніка» МОН України. Львів, 2014. 20 с.

Referencis

1. DSTU ISO 22000:2019 (ISO 22000:2019 IDT). Systemy keruvannya bezpechnisty kharchovykh produktiv. [in Ukrainian]

2. Hryhorchak I.I. Impedansna spektroskopiya: navchal'nyy posibnyk. L'viv: Vydavnytstvo L'vivs'koyi politekhniki, 2011. 352 s. [in Ukrainian]

3. Pokhodylo Ye., Stasyshyn Y. Identification of food products with additive E621 according to

admittance parameters. Vymiryval'na tekhnika ta metrolohiya: mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. 2022. Vyp. 83, № 4. S. 43–46. [in Ukrainian]

4. Pokhodylo YE. V. Imitansnyy kontrol' yakosti: monohrafiya. L.: NULP, 2012. – 164 s. [in Ukrainian]

5. Martynovych N.V. Metod vymiryuvannya tverdosti vody za parametry imitansu ta yoho metrolohichne zabezpechennya: Avtoref. dys. kandydata tekhn. nauk. NU «L'vivs'ka politekhnika» MON Ukrayiny. L'viv, 2012. – 18 s. [in Ukrainian]

6. Patent Ukrayiny № 93243. Sposib ekspresnoho vyznachennya vmistu etylovoho spyrtu v vodno-spyrtovomu rozchyni, MPK G01N27/48, G01N27/02, vid 25.09.2014. [in Ukrainian]

7. Pat. na KM №93243 Ukrayina, MPK G01N27/48, G01N27/02. Impedansnyy analizator dlya identyfikatsiyi marok vodno-spyrtovykh napytkiv / Kukla A. L., Pavlyuchenko A. S., Maystrenko A. S, Mamykin A. V. Tekhnolohiya i konstruyuvannya v elektronniy promyslovosti, Kyiv, 2012, №1, S.15-21. [in Ukrainian]

8. Pokhodylo YE. V., Flyunt N. B. Identyfikatsiya svizhoho ta rozmorozhenoho m'yasa metodom impedansnoyi spektroskopiyi. Vymiryval'na tekhnika ta metrolohiya. 2010 № 80 (3). S. 15-20. [in Ukrainian]

9. Shchebetovs'ka O. O., Byk O. O. Vyznachennya svizhosti kuryachoho m'yasa metodom impedansnoyi spektroskopiyi. LNUVM im. S. Hzhys'koho. 2011. vyp. 13, № 4(4), S. 352–358. [in Ukrainian]

10. Chanet, M., Riviere, C., and Eynard, P.: Electroimpedance spectrometry for process control of minced meat products. *Food Eng.* 1999. № 42, p. 153–159.

11. Chowdhury, A., Singh, P., Kanti Bera, T., Ghoshal, D., and Chakraborty, B.: Electrical impedance spectroscopy study of mandarin during ripenin. *Food Meas. Character.* 2017 p 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9545-y>, 2017b.

12. Harker, F. R. and Forbes, S. K.: Ripening and chilling development in persimmon fruit: an electrical impedance study. *New Zeal Crop Hort.* 1997. № 25, P. 149–157.

13. Pokhodylo YE. V., Yuzva V. Z. Vymiryuvannya elektrofizychnykh parametriv spyrtovykh rozchyniv. Komp'yuterni nauky ta

informatsiyini tekhnolohiyi: mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu "L'vivs'ka politekhnika", 2015. №1.C.37-45. [in Ukrainian]

14. Herasym M. R. Rozvytok metrolohichnoho zabezpechennya vymiryuvannya elektrofizychnykh parametriv ob'yektiv kvalimetriyi neelektrychnoyi pryrody: Avtoref. dys. kandydata tekhn. nauk / NU «L'vivs'ka politekhnika» MON Ukrayiny. L'viv, 2014. 20 s. [in Ukrainian]

УДК 681.5

DOI 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-46-75

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ДЛЯ БУДІВЛІ УНІВЕРСИТЕТУ

*А. В. Яворський¹, В. С. Цих*¹, М. О. Карнаш², Л. Я. Жовтуля²*

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна 76019, e-mail: vitalii.tsykh@nung.edu.ua*

²*Університет Короля Данила, вул. Є. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, Україна 76018, e-mail: university@ukd.edu.ua*

В статті наведена та обґрунтована важлива проблема сьогодення, яка полягає в нестачі електричної енергії для забезпечення потреб споживачів, а також неможливості чіткого детального обліку використання енергетичних ресурсів окремими будівлями за потрібний період – місяць, тиждень, добу чи годину. Описані недоліки існуючих підходів до обліку споживання, які полягають в помісячному зборі інформації без прив'язки до зовнішньої температури, та до внутрішніх параметрів мікроклімату. Сформульована актуальність публікації, яка пов'язана із необхідністю розроблення автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу та управління енергозабезпеченням, яка дозволить реалізувати визначення, збір та зберігання, а також можливість аналізу годинних та добових показників енергоспоживання різними об'єктами чи обладнанням за видами ресурсів, фіксацію параметрів внутрішнього мікроклімату в приміщеннях, а також здійснювати оперативне управління функціонуванням системи енергозабезпечення. Обрано основні складові та запропоновано структурну схему такої інформаційно-вимірювальної системи, яка в результаті була реалізована в частині будівлі університету та загалом 10 навчальних аудиторій. Реалізована система дозволяє отримати інформацію щодо споживання теплової, електричної енергії, води в конкретних приміщеннях, а також отримати онлайн-інформацію щодо параметрів мікроклімату в них, а саме – температура, вологість та вміст вуглекислого газу в повітрі. Додатково в системі реалізована метеостанція, яка дозволяє фіксувати параметри зовнішнього середовища: температура, атмосферний тиск, вологість та радіаційний фон. Уся інформація із відповідних давачів через Wi-Fi мережу передається в хмарне сховище, з якого можна отримати як історію даних, так і реальні онлайн-значення із під'єднаних до системи приміщень університету. Розроблена інформаційно-вимірювальна система володіє достатньою точністю за кожним із вимірювальних каналів та в перспективі дозволить реалізувати її в усьому університеті та отримувати необхідну інформацію щодо енергетичного споживання з метою подальшого впровадження максимально оптимальних енергоефективних заходів.

Ключові слова: структурна схема, енергетичний моніторинг, кафедра університету, показники мікроклімату, споживання енергії.

The article presents and substantiates an extremely important problem of today, which consists in the lack of electrical energy to meet the needs of consumers, as well as the impossibility of clear and detailed accounting of the use of energy resources by individual buildings for the required period - a month, a week, a day or an hour. The shortcomings of existing approaches to accounting for consumption are described, which consist in the monthly collection of information without reference to both the external temperature and the internal parameters of the microclimate. The relevance of the publication is formulated, which is related to the need to develop an automated information and measurement system for monitoring and managing energy supply, which will allow to implement the definition, collection and storage, as well as the possibility of analyzing hourly and daily indicators of energy consumption by various objects or equipment by types of resources, recording parameters of the internal microclimate in the premises, as well as to carry out operational management of the functioning of the energy supply system. The main components were selected and a structural diagram of such an information and measurement system was proposed, which was eventually implemented in a part of the university building and which covers a total of 10 classrooms. The implemented system allows you to get information about the consumption of heat, electricity, and water in specific rooms, as well as get online information about the parameters of the microclimate in them, namely, temperature, humidity, and carbon dioxide content in the air. In addition, the system implements a weather station that allows you to record the parameters of the external environment: temperature, atmospheric pressure, humidity and

radiation background. All information from the respective sensors is transmitted via Wi-Fi to the cloud storage, from which both the data history and the real online values from the university premises connected to the system can be obtained. The developed information and measurement system have sufficient accuracy for each of the measurement channels and in the future will allow to implement it as a whole in the university and obtain the necessary information on energy consumption in order to further implement the most optimal energy-efficient measures.

Key words: structural diagram, energy monitoring, university department, microclimate indicators, energy consumption.

Вступ

В умовах воєнного часу Україна стикнулася із надзвичайно важливою проблемою, а саме нестачею генерованої електричної енергії для забезпечення потреб усіх споживачів у зв'язку із руйнуванням енергетичної інфраструктури росією. Щоденні вимкнення електричної енергії найбільш суттєво відчуваються в опалювальний період, оскільки значна частина теплової енергії отримується з використанням електричної. Особливо актуальним таке питання постає для громадських організацій, функціонування яких без наявної електричної енергії, зазвичай, є практично неможливим.

Безперервний моніторинг споживання тепла, електричної енергії та води в громадських будівлях є основою для ефективного управління енергозабезпеченням та енергоспоживанням. У реальних умовах експлуатації будівель визначення їх поточного енергоспоживання за різними видами енергоресурсів проводиться за рахунок використання пристроїв обліку – лічильників тепла, електроенергії та води. Станом на сьогодні в системі енергозабезпечення відсутня детальна інформація щодо реального енергоспоживання окремими населеними пунктами чи навіть окремими споживачами. Існуюча практика оперує лише місячними показами енергоспоживання будівель, що надзвичайно утруднює процес оперативного аналізу та, відповідно, ускладнює процес прийняття рішень щодо зменшення енергоспоживання при дотриманні нормативних умов мікроклімату у приміщеннях будівель. Крім того, наявні системи обліку витрати енергетичних ресурсів у організаціях чи на підприємствах дають можливість зрозуміти виключно загальні обсяги споживання різних видів енергії впродовж встановленого проміжку часу, тоді як інформація щодо подинного чи погодинного споживання їх окремих структурних частин є недоступною.

Наявність інформації щодо погодинного споживання енергії окремими споживачами та конкретними об'єктами в будівлях дозволять зрозуміти реальні потреби в енергії, а також планувати відповідний розподіл енергопостачальними організаціями. Така інформація також сприятиме пошуку шляхів щодо підвищення енергетичної ефективності саме в тих місцях, де наявне високе споживання енергетичних ресурсів.

Тому, **мета роботи** полягає у розробленні спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу споживання енергетичних ресурсів, пілотна версія якої буде реалізована в будівлі університету.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Правовою основою, в якій наведені основні принципи енергоефективності та основи енергетичного моніторингу є недавно прийнятий Закон України «Про енергетичну ефективність» [1]. В статті 3 даного Закону наведений перелік, який відображає основну державну політику в сфері забезпечення енергоефективності. В цьому переліку присутня така складова, як «популяризація та використання високоефективних технологій, систем енергетичного менеджменту, систем моніторингу споживання енергії».

Енергетичний моніторинг – це комплекс заходів, спрямований на отримання даних по енергоспоживанню об'єкту та їх обробку, для виявлення випадків відхилення енергоспоживання від базової лінії. Проведення енергомоніторингу дає змогу виключити перевитрати паливно-енергетичних ресурсів, які можуть бути пов'язані з аваріями або невірним налаштуванням обладнання. По суті, енергетичний моніторинг – це інструмент управління, націлений на постійне підтримання енергоспоживання на відповідному рівні [2].

Основними об'єктами, для яких дане питання є найбільш актуальним, є будівлі, оскільки на них припадає близько 40% світового

споживання енергії [3]. Витрати енергії для будівель в Україні є у 2–3 рази вищими, ніж подібні витрати в країнах ЄС. Практично 90% будівель України не відповідають сучасним вимогам енергоефективності, що призводить до перевитрат енергії на опалення та недотримання вимог по мікроклімату приміщень [4]. Ці будівлі включають в себе значну кількість громадських будівель – від дитячих садків та шкіл, і до університетських, адміністративних будівель та закладів охорони здоров'я і культури. Відповідно, на утримання цих будівель в Україні витрачається значна частина коштів з місцевого та державного бюджетів [5].

На даний час в світі присутні багато рішень для енергетичного моніторингу будівель [6-10]. Проте саме для громадських будівель, враховуючі значні площі і велику кількість точок вимірювання енергетичних параметрів і параметрів мікроклімату, важливою є простота і вартість побудови інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), інтеграція з існуючими засобами обліку, гнучкість і доступність у налаштуванні візуалізації та зберігання отриманих даних, що не потребують спеціалізованих навичок.

Наявні в Україні підходи насамперед пов'язані з впровадженням систем енергетичного менеджменту із використанням інформації щодо споживання енергетичних ресурсів, однак в більшій мірі із ручним збором інформації щодо споживання та без можливості оперування погодинною чи подовою витратою [4,11,12].

Формулювання цілей статті

Таким чином, актуальним завданням є розроблення автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи моніторингу та управління енергозабезпеченням, що має реалізовувати завдання визначення годинних та добових показників енергоспоживання різними муніципальними будівлями за різними видами енергоресурсів з фіксацією параметрів внутрішнього мікроклімату, а також здійснювати управління функціонуванням системи енергозабезпечення на основі оперативного прийнятих рішень.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

В розробленій ще в 2015 році «Методиці моніторингу енергоефективності будівель» [2] наведені основні вимоги щодо системи

моніторингу. Основною її складовою повинна бути інформаційно-вимірювальна система, яка забезпечуватиме облік паливно-енергетичних ресурсів, на основі чого буде можливість проводити наступне [2]:

- формувати енергетичні баланси різного профілю за будь-який період, що цікавить;
- визначати залежності енергоспоживання від визначальних факторів;
- проводити аналіз ефективності використання енергії.

Основним інструментом системи енергетичного моніторингу є діаграма «Енергія-Температура» (ЕТ-діаграма), яка дозволяє отримати інформацію щодо споживання енергії за різних температурних умов у приміщенні. На горизонтальній осі відкладається «середня зовнішня температура» (°C) за добу/тиждень, а вертикальна вісь показує «споживання енергії» на одиницю опалювальної площі за ту саму добу/тиждень ($\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$). ЕТ-діаграма включає покази вимірів спожитої енергії і відповідної зовнішньої температури впродовж деякого проміжку часу. Отримана в результаті вимірів лінія називається «ЕТ-крива» [2] (рисуюнок 1).

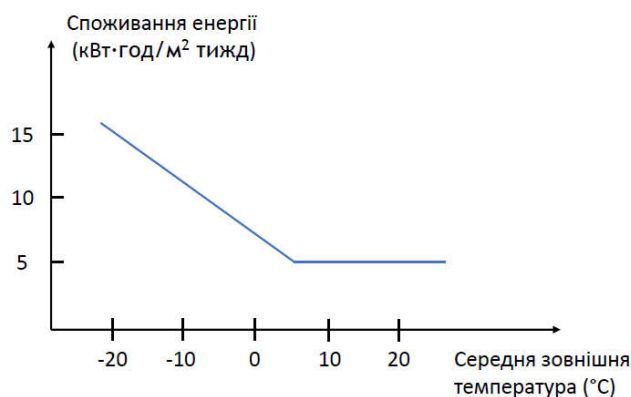


Рисунок 1 – Крива «Енергія-Температура»

На основі наведених вимог в [1, 2] і повинна бути побудована інформаційно-вимірювальна система (ІВС) моніторингу споживання енергії.

Науковцями Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) в рамках міжнародного проєкту «Cross-border Network of Energy Sustainable Universities (NET4SENERGY)» (HUSKROUA/1702/6.1/0075) було проведено

грунтовне дослідження, щодо пошуку найбільш оптимального рішення для побудови ІВС енергетичного моніторингу університетської будівлі, яка має відповідати вище наведеним вимогам [13]. Для побудови системи моніторингу обрано «смарт»-пристрої енергомонітори українського компанії smart-MAIC [14].

Модельний ряд пристроїв smart-MAIC представлений енергомоніторами для постійного вимірювання параметрів електричної мережі та споживання електроенергії, універсальними імпульсними лічильниками для вимірювання споживання води, газу, тепла і за допомогою відповідних давачів вимірювання температури, вологості, тиску, концентрації вуглекислого газу в повітрі, швидкості та напрямку вітру та інших параметрів.

Пристрої smart-MAIC легко встановлюються і приєднуються. Всі пристрої виконані в універсальному корпусі з можливістю монтажу на DIN-рейку. Після включення пристрій доступний як точка доступу Wi-Fi, початкове налаштування можливе з будь-якого мобільного пристрою і займає лічені хвилини. Спеціальні налаштування для роботи не потрібні, пристрій самостійно приєднується до хмарного сервера даних і забезпечує двонаправлений обмін інформацією. Після встановлення і початкового налаштування пристрій smart-MAIC почне перетворення вимірюваних параметрів в інформацію, яка буде відправлена за допомогою бездротової технології Wi-Fi на хмарний сервер даних. Використання існуючої в громадській будівлі мережі Wi-Fi значно здешевлює встановлення ІВС енергетичного моніторингу, оскільки відпадає потреба у прокладанні кабельних ліній значної довжини. Для аналізу і візуалізації даних використовується універсальний WEB-додаток smart-MAIC Dashboard який є в звичайному інтернет браузері, а також як додаток для платформ Windows, Android і iOS. Всі зібрані дані зберігаються на хмарному сервері з хвилинною деталізацією. Під час роботи в режимі реального часу показання з лічильників оновлюються з інтервалом 5 секунд. Smart-MAIC Dashboard дає можливість контролювати поточні показання і візуалізувати історичні дані отримані з пристроїв smart-MAIC, наприклад, для оптимізації споживання за умови двотарифного

або багатотарифного обліку. Користувачеві доступні гнучке налаштування віджетів індикаторів і графіків, необмежену кількість сторінок і підключених пристроїв до одного облікового запису. Так само поточні дані доступні на WEB сторінці самого пристрою.

Пілотна ІВС енергетичного моніторингу для університетської будівлі з використанням пристроїв smart-MAIC інстальована на базі кафедри «Енергетичного менеджменту і технічної діагностики» (ЕМіТД) ІФНТУНГ. Кафедра ЕМіТД займає третину будівлі навчального корпусу №9 університету і розміщується на двох поверхах будівлі, обладнана різноманітними автоматичними системами електричного опалення. Відповідно на основі приміщень кафедри можна повністю від моделювати ІВС енергетичного моніторингу, яку потім можна буде за аналогією поширювати на інші будівлі як даного університету, так і на громадські будівлі загалом.

Структура пілотної ІВС енергетичного моніторингу для навчальної будівлі університету наведена на рисунку 2. Дана ІВС енергетичного моніторингу дозволяє отримати реальні дані по споживанню електричної та теплової енергії, холодної та гарячої води для університетської будівлі. Окрім того в кожному навчальному приміщенні передбачено моніторинг основних показників мікроклімату – температури і вологості повітря, концентрації вуглекислого газу. Окремою складовою системи моніторингу є метеорологічний модуль, що дозволить відслідковувати температуру і вологість зовнішнього повітря, значення і тренд зміни атмосферного тиску.

Як було зазначено, продуктова лінійка smart-MAIC представлена рішеннями для моніторингу будь-яких подій, станів і процесів – однофазний електролічильник та трифазний електролічильник з кільцевими або роз'ємними трансформаторами струму, лічильники імпульсів з давачами температурних режимів і аналоговим входом. Пристрої мають зручне виконання у вигляді корпусу на DIN-рейку відповідно до BS EN 60715:2017 [15], що дозволяє монтувати їх у будь-якому новому або вже змонтованому електрощитку. На рисунку 3 наведено приклад інсталяції сегменту системи енергетичного моніторингу для навчальної аудиторії університету.

В навчальній аудиторії за допомогою системи енергетичного моніторингу відслідковуються параметри мікроклімату в приміщенні (температура, вологість і рівень вуглекислого газу) для цього використовується універсальний лічильник smart-MAIC D105 до якого приєднується датчик температури-вологості і вуглекислого газу. В якості датчиків температури і вологості повітря для приміщень використовуються широко розповсюджені цифрові датчики AM2302 (які дозволяють вимірювати температуру в діапазоні $-40 \dots 80^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ а вологість в діапазоні $0 \dots 99,9\%$ з точністю $\pm 2\%$) [16]. Вимірювання рівня вуглекислого газу в повітрі навчальної аудиторії здійснюється на базі цифрового датчика

MH-Z41A (який дозволяє вимірювати концентрацію вуглекислого газу в діапазоні $0 \dots 5000\text{ppm}$ з точністю $\pm 50\text{ppm}$) [17]. Для визначення рівня споживання електричної енергії в аудиторії (навчальна аудиторія обладнана електричним опаленням) використовується енергомонітор smart-MAIC D103, що забезпечує приєднання до трифазної лінії електропостачання по напрузі і по струму (за допомогою кільцевих трансформаторів струму на номінал 100A). Відносна похибка вимірювання значення струму і напруги за допомогою енергомонітору smart-MAIC D103 складає 1%.

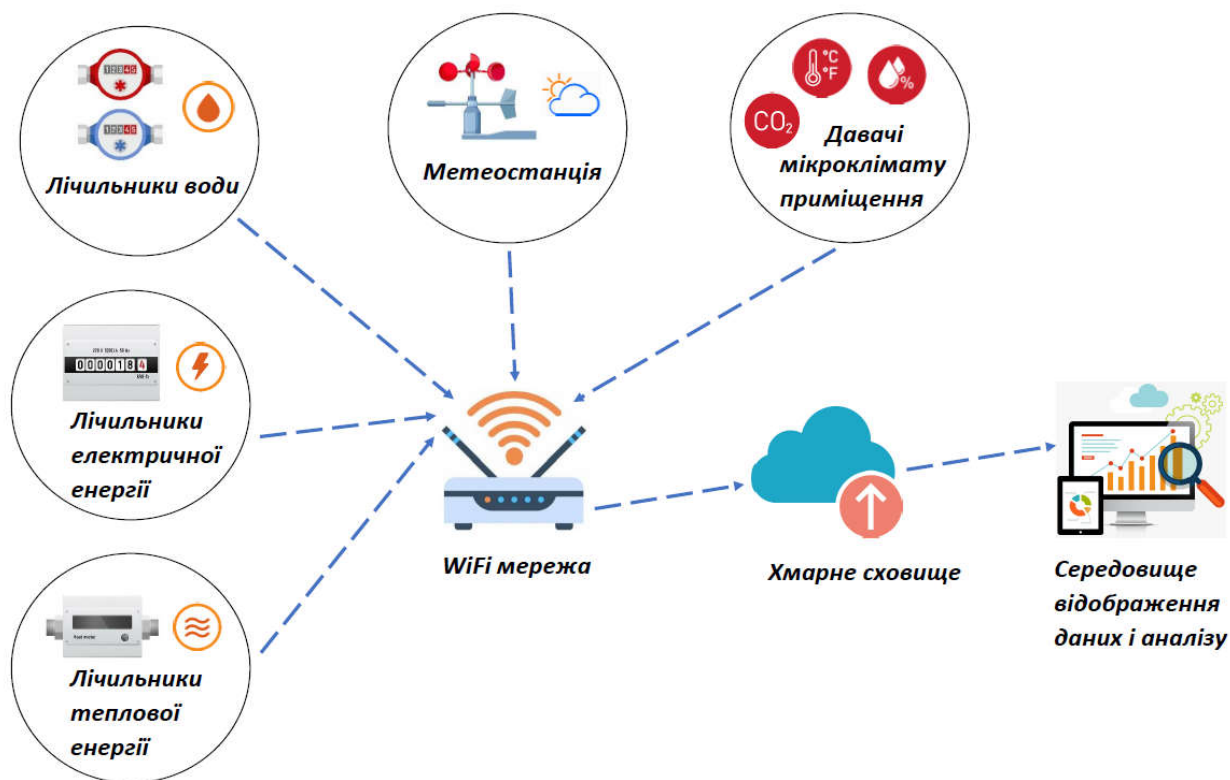
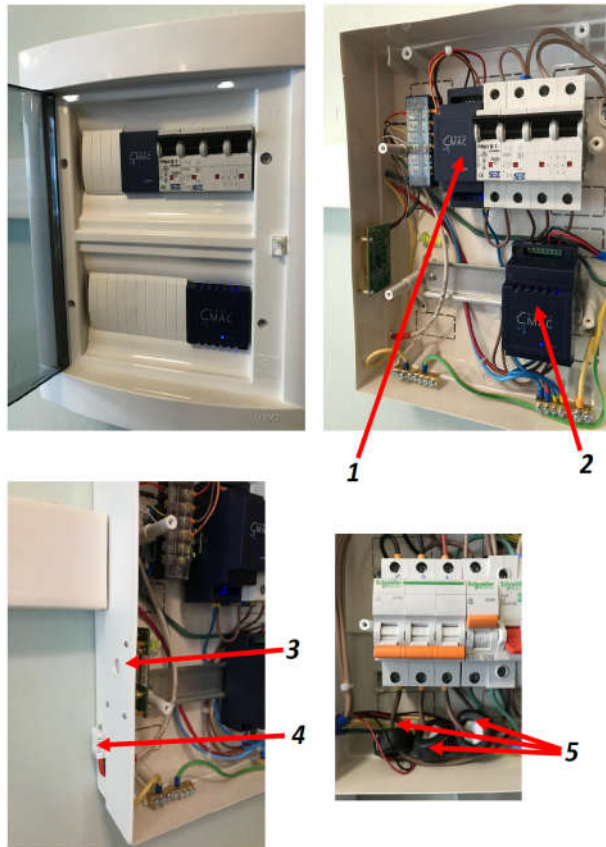


Рисунок 2 – Структура пілотної інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу для навчальної будівлі університету



- 1 – універсальний лічильник smart-MAIC D105;
- 2 – енергомонітор smart-MAIC D103;
- 3 – давач рівня вуглекислого газу;
- 4 – давач температури і вологості повітря;
- 5 – трансформатори струму (100А) для енергомонітору smart-MAIC D103

Рисунок 3 – Приклад інсталяції сегменту інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу для навчальної аудиторії університету:

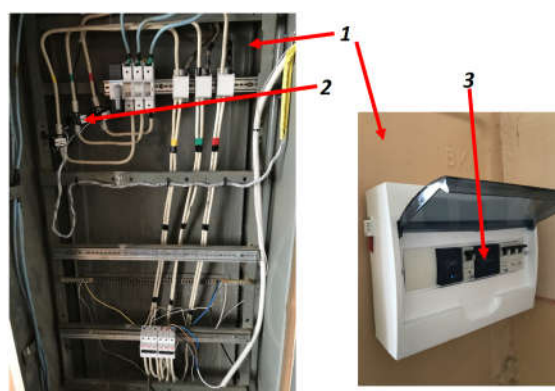
Дані, які збираються з пристроїв, зберігаються в хмарному сховищі і доступні для перегляду та аналізу в режимі реального часу. Агрегування інформації, щодо конкретної аудиторії чи інших об'єктів моніторингу, її візуалізація та подальший аналіз здійснюється в хмарному WEB-додатку smart-MAIC Dashboard. Користувач сам налаштовує вид віджетів індикаторів, графіків та таблиць для інформаційної панелі. На рисунку 4 наведений приклад інформаційної панелі сегменту системи енергетичного моніторингу для навчальної аудиторії університету.

На інформаційну панель (рисунку 4) виводяться поточні значення температури та вологості повітря та концентрації вуглекислого газу в приміщенні, напруги, струму, споживаної потужності по кожній фазі лінії електропостачання. Важливим для аналізу енергоспоживання, температурної інерції будівлі, ефективності роботи системи опалення кондиціонування та вентиляції є відслідковування зміни контрольованих параметрів в часі. WEB-додаток smart-MAIC Dashboard дає можливість побудови різноманітних графічних залежностей з різною часовою деталізацією (хвилина, година, день, тиждень, місяць, рік) і в з різним типом графічного відображення трендів (лінія, площа, стовпчикова діаграма). Додатково користувач може сконфігурувати виведення необхідних даних у вигляді таблиці, зокрема для деталізації споживання та витрат, задавши відповідно вартість для енергоносія чи гарячої/холодної води, витрата яких відслідковується системою моніторингу. Для подальшого аналізу, до прикладу, в середовищі Excel (як стандартний програмний інструмент для задач енергоменеджменту), дані арегovanі в таблиці експортуються в форматі csv.

Для оцінки споживання електричної енергії усією будівлею чи її частиною теж використовується енергомонітор smart-MAIC D103 з відповідними трансформаторами струму. В лінійці пристроїв smart-MAIC використовуються трансформатори струму від 100А до 2000А, що дозволяє контролювати навантаження в будівлі до 1,5МВт. Приклад інсталяції сегменту системи енергетичного моніторингу для визначення споживання електричної енергії частиною будівлі показано на рисунку 5. В даному випадку моніториться споживання електричної енергії для цілої кафедри, що займає частину будівлі. Відповідно використовується енергомонітор smart-MAIC D103 з накидними кільцевими трансформаторами струму на 300А. Для візуалізації та аналізу даних по споживанню електричною енергією кафедрою формується окрема інформаційна сторінка в хмарному WEB-додатку smart-MAIC Dashboard аналогічна до наведеної на рисунку 4.



Рисунок 4 – Приклад інформаційної панелі сегменту інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу для навчальної аудиторії університету



- 1 – шафа ввідно-розподільча;
- 2 – трансформатори струму (300A);
- 3 – енергомонітор smart-MAIC D103

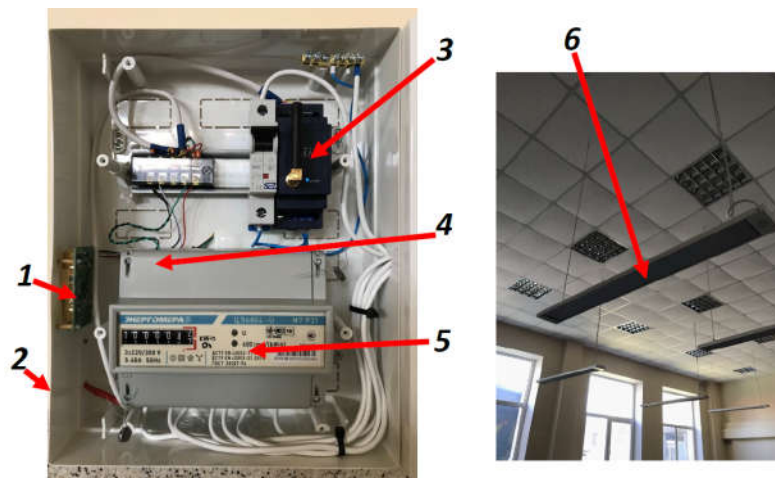
Рисунок 5 – Приклад інсталяції сегменту інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу для визначення споживання електричної енергії частиною будівлі

З метою комплексного вирішення задач енергетичного моніторингу прилади сторонніх виробників теж інтегруються з пристроями smart-MAIC - лічильники води, тепла, палива, давачі до газових лічильників та інші витратоміри з імпульсними виходами. Важливим є те, що такий підхід дозволяє задіяти в систему енергетичного моніторингу прилади обліку, що вже наявні в будівлі або необхідні для технологічного обліку енергоємного обладнання. В цьому випадку використовується універсальний монітор smart-MAIC D105, який обладнаний двома імпульсними входами.

Поеднання класичних приладів обліку і елементів ІВС енергетичного моніторингу будівлі показано на рисунку 6. В даному випадку поряд з визначенням параметрів мікроклімату в лекційній аудиторії проводиться моніторинг споживання електричної енергії на потреби системи інфрачервоного опалення. На рисунку 7 показано приклад реалізації моніторингу споживання гарячої води в будівлі і витрати електричної енергії на її приготування.

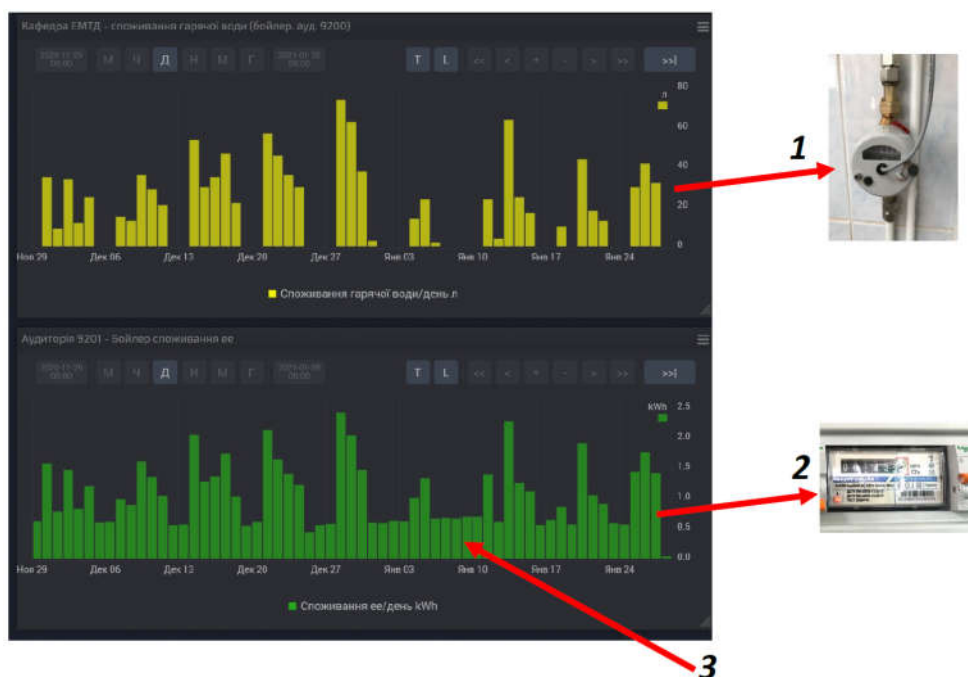
В цьому випадку використовується лічильник гарячої води з імпульсним видом, який змонтований на виході електричного бойлера і класичний електронний лічильник з механічним обліковим пристроєм (через який відбувається електроживлення бойлера), що має телеметричний імпульсний вихід. Відповідно ці лічильники приєднуються до універсального монітора smart-MAIC D105 для передачі даних в систему енергетичного моніторингу будівлі.

Отримані дані по споживанню електричної енергії і витраті гарячої води для електричного бойлера (рисунк 7), чітко показують нераціональне використання електричної енергії в часовий проміжок, коли не відбувається розбір гарячої води в громадській будівлі (вихідні і святкові дні, нічний час). Даний приклад показує, як дані по енергоспоживанню, які накопичуються в системі, дають можливість реально оцінити ефективність використання енергетичних ресурсів для потреб громадської будівлі.



1 – давач рівня вуглекислого газу; 2 – давач температури і вологості повітря; 3 – універсальний лічильник smart-MAIC D105; 4 – імпульсний телеметричний вихід електролічильника; 5 – електролічильник технологічного обліку; 6 – інфрачервоні панелі системи електроопалення лекційної аудиторії

Рисунок 6 – Приклад інсталяції сегменту інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу для контролю параметрів мікроклімату і споживання електричної енергії (в поєднанні з електролічильником) на потреби електроопалення лекційної аудиторії

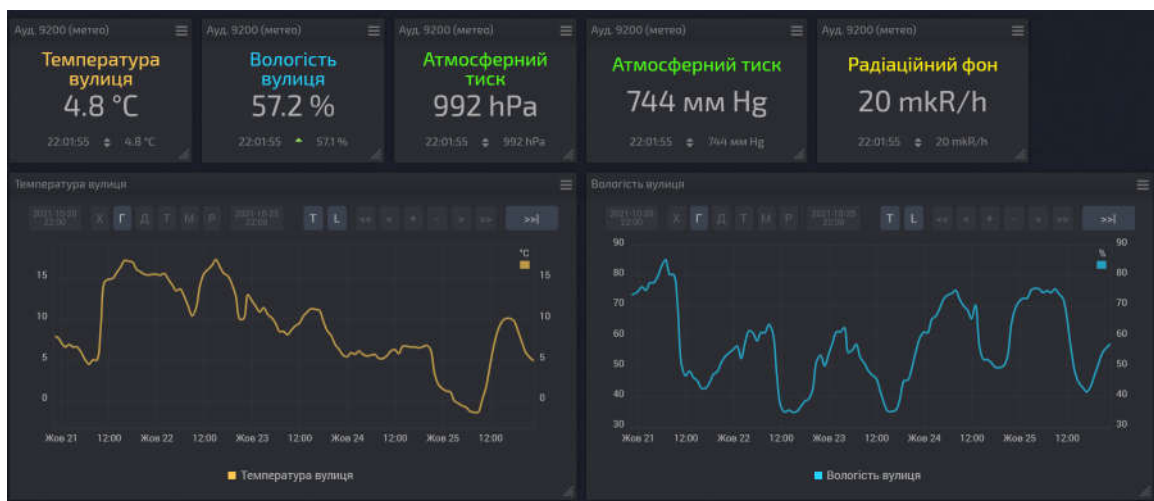
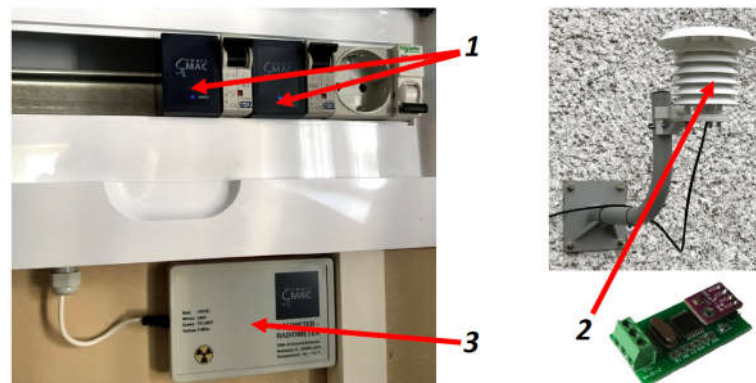


1 – споживання гарячої води (л/день), що визначається за допомогою лічильника з імпульсним виходом;
 2 – споживання електричної енергії (кВт·год/день) на підігрів води в бойлері, що визначається за допомогою електрولیчильника з імпульсним виходом; 3 – приклад нераціональної витрати електричної енергії на підігрів води під час вихідних днів

Рисунок 7 – Приклад інсталяції сегменту інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу для контролю споживання гарячої води

Обов'язковим сегментом в ІВС енергетичного моніторингу будівлі має бути метеорологічний модуль для отримання локальних метеоданих. Адже для оцінки енергетичної ефективності будівлі необхідно володіти інформацією щодо споживання теплової енергії або витрати природного газу чи електроенергії, що використовуються на потреби опалення будівлі, в залежності із зовнішньою температурою повітря. На рисунку 8 наведено реалізацію частини метеорологічного модуля системи енергетичного моніторингу будівлі, що призначений для реєстрації температури та вологості зовнішнього повітря і значення атмосферного тиску. В якості первинного перетворювача використовується цифровий давач температури, вологості і атмосферного

тиску ВМЕ280 [18], який приєднаний до універсального монітора smart-MAIC D105. Даний давач дозволяє вимірювати температуру в діапазоні $-40...85^{\circ}\text{C}$ з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$, вологість в діапазоні $0...100\%$ з точністю $\pm 3\%$ і атмосферний тиск в діапазоні від $300...1100$ гПа з точністю ± 1 гПа. Для забезпечення отримання коректних метеоданих давач змонтований в радіаційному екрані, для захисту від сонячного випромінювання, і розміщується на північній стороні будівлі в затінку. Також ІВС енергетичного моніторингу дозволяє інтегрувати в себе і інші пристрої, як приклад що відносяться до систем безпеки. На рисунку 8 наведено як в систему енергетичного моніторингу будівлі долучено дозиметр радіометр для контролю за станом радіаційного фону.



1 - універсальні лічильники smart-MAIC D105; 2 - цифровий давач температури, вологості і атмосферного тиску BME280 в радіаційному екрані; 3 – дозиметр-радіометр.

Рисунок 8 – Реалізація метеорологічного модуля і інформаційної панелі сегменту інформаційно-вимірювальної системи енергетичного моніторингу будівлі, що призначений для реєстрації температури та вологості зовнішнього повітря і значення атмосферного тиску:

Висновки

На даний час пілотна ІВС енергетичного моніторингу будівлі охоплює 10-ть навчальних аудиторій з використанням 18-ти пристроїв smart-MAIC. Отримані дані по фактичному енергоспоживанню, після розгортання пілотної системи моніторингу, протягом календарного року (з повноцінним енергопостачанням) дозволять зокрема оцінити питомі теплові характеристики будівлі, визначити необхідні обсяги енергоспоживання для забезпечення нормативних показників мікроклімату в приміщеннях будівлі, оцінити раціональність і тренди споживання енергоносіїв. Також такі дані допоможуть оцінити реальний ефект після впровадження енергоефективних заходів для зменшення споживання енергоресурсів в будівлях університету.

Успішне впровадження та використання такої ІВС дає можливість обґрунтувати необхідність використання подібних систем і в інших громадських будівлях – навчальних та медичних закладах, державних адміністраціях і т. ін.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про енергетичну ефективність». Відомості Верховної Ради України, 2022, №2, ст.8. [Електронний ресурс], URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
2. Методика моніторингу енергоефективності будівель. USAID. Муніципальна енергетична реформа в Україні. Київ, 2015. [Електронний ресурс], URL: <http://surl.li/evtbm>.

3. P. Nejat, F. Jomehzadeh, M. M. Taheri, M. Gohari and M. Z. A. Majid, "A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries)". *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015 vol.43, pp. 843-862.
4. O. M. Shevchenko, M. M. Shovkalyuk, "KPI energy efficient campus: instruments and research methods", *Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. Series: Technical Sciences*, 2019 vol. 4, pp. 97-105.
5. Y. Parfenenko, V. Shendryk, V. Nenja and S. Vashchenko, "Information system for monitoring and forecast of building heat consumption" in *Int. Conf. Information and Software Technologies*, Oct, 2014, PP. 1-11.
6. Zhao, L., Zhang, J. L., & Liang, R. B. Development of an energy monitoring system for large public buildings. *Energy and Buildings*, 2013 66, PP 41-48.
7. Baranyai, B., & Kistelegdi, I. Energy management monitoring and control of public buildings. *Pollack Periodica*, 2014 9(2), 77-88.
8. Ibaseta, D., García, A., Álvarez, M., Garzón, B., Díez, F., Coca, P., ... & Molleda, J. Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit. *Sustainable Cities and Society*, 2021 65, PP. 102-637.
9. Mataloto, B., Calé, D., Carimo, K., Ferreira, J. C., & Resende, R. 3D IoT System for Environmental and Energy Consumption Monitoring System. *Sustainability*, 2021 13(3), PP. 14-95.
10. Nguyen, V. K., Zhang, W. E., & Mahmood, A. Semi-supervised Intrusive Appliance Load Monitoring in Smart Energy Monitoring System. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 2021 17(3), 1-20.
11. Шовкалюк Ю.В. Інструменти і методи для підвищення енергоефективності будівельного фонду. *Молодий вчений*. 2021 №1 (53), 2018. С. 573-577.
12. Дешко В.І., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М., Суходуб І.О., Сотник М.І., Соколова Н.П. Досвід створення та функціонування системи енергоменеджменту у ВНЗ *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016 №2. С. 34-45.
13. Indoor climate and energy monitoring system at educational institutions / Ihor Rybitskyi, Maksym Karpash, Andrii Yavorskyi, Vitalii Tsykh. *Building Smart Communities for the Future: SMART solutions for energy*. Technical University of Košice, 2021. p. 69-76. ISBN 978-80-553-3840-8.
14. Smart-MAIC. Smart meters for any kind of consumptions. URL: <https://smart-maic.com/en/>.
15. BS EN 60715:2017. Dimensions of low-voltage switchgear and controlgear. Standardized mounting on rails for mechanical support of switchgear, controlgear and accessories.
16. AM2302 SIP Packaged Temperature and Humidity Sensor. URL: <http://www.aosong.com/en/products-22.html>.
17. Давач вуглекислого газу CO₂ (діоксид вуглецю), RS485. URL: <https://store.smart-maic.com/ua/p964247124-datchik-uglekislogo-gaza.html>.
18. BME280 digital humidity pressure and temperature sensor. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/#documents/>

Referencis

1. Закон Украйны «Pro enerhetychnu efektyvnist'». Vidomosti Verkhovnoyi Rady Украйны, 2022, №2, st.8. [Elektronnyy resurs], URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>. [in Ukrainian]
2. Metodyka monitorynhu enerhoefektyvnosti budivel'. USAID. Munitsypal'na enerhetychna reforma v Украйни. Kyiv, 2015. [Elektronnyy resurs], URL: <http://surl.li/evtbn>. [in Ukrainian]
3. P. Nejat, F. Jomehzadeh, M. M. Taheri, M. Gohari and M. Z. A. Majid, "A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries)". *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015 vol.43, pp. 843-862.
4. O. M. Shevchenko, M. M. Shovkalyuk, "KPI energy efficient campus: instruments and research methods", *Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. Series: Technical Sciences*, 2019 vol. 4, pp. 97-105. [in Ukrainian]
5. Y. Parfenenko, V. Shendryk, V. Nenja and S. Vashchenko, "Information system for monitoring

and forecast of building heat consumption” in *Int. Conf. Information and Software Technologies*, Oct, 2014, PP. 1-11.

6. Zhao, L., Zhang, J. L., & Liang, R. B. Development of an energy monitoring system for large public buildings. *Energy and Buildings*, 2013 66, PP 41-48.

7. Baranyai, B., & Kistelegdi, I. Energy management monitoring and control of public buildings. *Pollack Periodica*, 2014 9(2), 77-88.

8. Ibaseta, D., García, A., Álvarez, M., Garzón, B., Díez, F., Coca, P., ... & Molleda, J. Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit. *Sustainable Cities and Society*, 2021 65, PP. 102-637.

9. Mataloto, B., Calé, D., Carimo, K., Ferreira, J. C., & Resende, R. 3D IoT System for Environmental and Energy Consumption Monitoring System. *Sustainability*, 2021 13(3), PP. 14-95.

10. Nguyen, V. K., Zhang, W. E., & Mahmood, A. Semi-supervised Intrusive Appliance Load Monitoring in Smart Energy Monitoring System. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 2021 17(3), 1-20.

11. Shovkalyuk YU.V. Instrumenty i metody dlya pidvyshchennya enerhoefektyvnosti budivel'noho fondu. *Molodyy vchenyy*. 2021 №1 (53), 2018. S. 573-577. [in Ukrainian]

12. Deshko V.I., Shevchenko O.M., Shovkalyuk M.M., Sukhodub I.O., Sotnyk M.I., Sokolova N.P. Dosvid stvorennya ta funktsionuvannya systemy enerhomenedzhmentu u VNZ Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2016 №2. S. 34-45. [in Ukrainian]

13. Indoor climate and energy monitoring system at educational institutions / Ihor Rybitskyi, Maksym Karpash, Andrii Yavorskyi, Vitalii Tsykh. *Building Smart Communities for the Future: SMART solutions for energy*. Technical University of Košice, 2021. p. 69-76. ISBN 978-80-553-3840-8. [in Ukrainian]

14. Smart-MAIC. Smart meters for any kind of consumptions. URL: <https://smart-maic.com/en/>.

15. BS EN 60715:2017. Dimensions of low-voltage switchgear and controlgear. Standardized mounting on rails for mechanical support of switchgear, controlgear and accessories.

16. AM2302 SIP Packaged Temperature and Humidity Sensor. URL: <http://www.aosong.com/en/products-22.html>.

17. Давач вуглекислого газу CO2 (діоксид вуглецю), RS485. URL: <https://store.smart-maic.com/ua/p964247124-datchik-uglekislogo-gaza.html>.

18. BME280 digital humidity pressure and temperature sensor. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/#documents/>

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.51

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-58-65

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕТИЛЕНУ

¹В. С. Борин,² І. Р. Головач,¹ А. А. Ікалюк¹Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67, e-mail: kafatp@ukr.net²Інститут енергетики та систем управління, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013; тел. (067)710-45-17, e-mail: ihor.r.holovach@lpnu.ua

У даній роботі створено проектне рішення та втілено ієрархічне керування етиленовим реактором із структурою керування на двох рівнях автоматизації. Розроблено автоматизовану систему управління технологічним процесом піролізу етилену, програму керування, яка включає математичне моделювання процесу запуску печі при відмінних технологічних параметрах, реалізацію алгоритму управління. Він є складним, і реакції крекінгу не піддаються завжди повному контролю, тому рекомендовано нову схему керування цим процесом та випробувано автоматизовану систему керування процесом виготовлення етилену. Проведено аналіз та вдосконалення процесу піролізу. Спроектовано та реалізовано ієрархічне рішення управління етиленовим реактором із структурою управління на двох рівнях автоматизації. Використано середовище моделювання Matlab Simulink, яке допомогло перевірити ефективність, захищену даними алгоритмами управління. Отримано результати моделювання для випадку, коли амплітуда опорного сигналу для контуру регулювання пари становить третину амплітуди еталонного сигналу для контуру управління бензином. Розглянуто основні процеси під час піролізу етилену. Це забезпечило якісне керування процесом піролізу з більшим виходом етилену. Судячи з відстеження видно, що контролер забезпечує відхилення сигналів збурень ступінчастого типу, що подаються на вихід системи. Отримано відповідне числове подання даних алгоритмів управління для того, щоб мати можливість реалізувати їх на пристрої фізичної обробки. Використано Poles Placement Method, щоб з'ясувати параметри контролера, які могли б забезпечувати необхідні властивості відслідковування та регулювання для систем із замкнутим циклом. Порівнявши алгоритм управління RST з класичним алгоритмом управління ПІД ми зупинились на першому тому, що він дозволяє накладати різні характеристики відстеження та регулювання, також він може призвести до надійного алгоритму управління, який, беручи до уваги робочий контекст, є дуже важливим.

Ключові слова: піроліз, етилен, реактор, крекінг, температура, тиск, математична модель, метод, система управління, алгоритм управління, регулятор, програмований логічний контролер.

In this work, a design solution was created and hierarchical control of an ethylene reactor with a control structure at two levels of automation was implemented. An automated control system for the technological process of ethylene pyrolysis has been developed, a control program that includes mathematical modeling of the furnace start-up process with excellent technological parameters, and the implementation of the control algorithm. It is complex and cracking reactions are not always fully controlled, so a new control scheme for this process is recommended and an automated control system for the ethylene production process is tested. The analysis and improvement of the pyrolysis process was carried out. A hierarchical control solution for an ethylene reactor with a control structure at two levels of automation was designed and implemented. The Matlab Simulink simulation environment was used, which helped to verify the efficiency protected by these control algorithms. The simulation results are obtained for the case when the amplitude of the reference signal for the steam regulation circuit is one third of the amplitude of the reference signal for the gasoline control circuit. The main processes during the pyrolysis of ethylene are considered. This ensured high-quality control of the pyrolysis process with a higher yield of ethylene. Judging by the tracking, it can be seen

that the controller provides rejection of step-type disturbance signals applied to the system output. An appropriate numerical representation of control algorithm data is obtained in order to be able to implement them on a physical processing device. The Poles Placement Method was used to find out the controller parameters that could provide the required tracking and regulation properties for closed-loop systems. Comparing the RST control algorithm with the classic PID control algorithm, we settled on the first one because it allows us to impose different tracking and regulation characteristics, and it can also lead to a reliable control algorithm, which, taking into account the working context, is very important.

Key words: pyrolysis, ethylene, reactor, cracking, temperature, pressure, mathematical model, method, control system, control algorithm, regulator, programmable logic controller.

Вступ. Хімічна та нафтохімічна промисловості, в даний час, переживає небачене зростання завдяки оновленню виробничих ліній та модернізації устаткування, а крім того за рахунок масштабування виробничих потужностей. Сьогодні нафтохімічна промисловість є незамінним постачальником продуктів для промисловості та населення (текстильна, харчова, механічна, фармацевтична, електронна тощо). Вона була і є пріоритетом для сучасної економіки. Як базовий продукт для багатьох синтезів у нафтохімічній промисловості застосовується етилен, який є найпростішим з олефінів (наприклад фарб, розчинників, косметики, пластмас та іншого) [1].

Сьогодні на рік використовується понад 125 мільйонів тон етилену на рік, а швидкість зростання необхідної речовини складає 3,5% на рік.

Виробництво етилену є одним з найпотрібніших процесів нафтохімічного комбінату, а реактор крекінгу є основою процесу. Враховуючи те, що етилен є одним із необхідних матеріалів у хімічній промисловості, а ситуація на ринку блискавично змінюється, необхідною є оптимальна робота заводу та контроль за процесом. Рівень контролю виконує наступні завдання: регулювання основних параметрів процесу виробництва етилену та збір даних з фізичної установки (реактора). Другий рівень автоматизації повинен завершувати оптимізацію виробництва етилену. Швидкі зміни економічних умов та глобальну конкуренцію хімічна та нафтохімічна галузі стикалися з багатьма проблемами. Покращення автоматизації, керування процесами виробництва етилену та оптимізація в он-лайн режимі відіграли ключову роль у підвищенні продуктивності виробництва.

Хімічна промисловість в своєму розвитку знаменується збільшенням виробництва продуктів органічного синтезу. Станом на

сьогодні технологічний розвиток нафтохімічної промисловості складає в основному чотири вуглеводню: пропілен, бутадієн, бензол і етилен. Головним джерелом отримання вуглеводнів є термічний піроліз. На виробництві ЕП-300в процес фабрикування етилену і пропілену введено високотемпературний піроліз бензину і ре-циклу метанової фракції з метою отримання піролізного газу, який має різноманітний склад. Отримання пропілену, етилену і супутніх продуктів (наприклад воднева фракція, метанова фракція, бутілен-бутадієнова фракція, пропанова фракція, піролізний конденсат) з сировини (піролізного газу) за допомогою високотемпературної, середньотемпературної і низькотемпературної ректифікації.

Етилен на сьогодні є основною сировиною важкого органічного синтезу. Процес піролізу є ендотермічним і відноситься до низки енергоємних виробництв, в яких важливе значення має утилізація гарячих газів. Схеми реакційних вузлів мають певні відмінності: зовнішній обігрів топковими газами, за допомогою високо перегрітої водяної пари (гомогенний або адіабатичний піроліз), часткове згоряння тепла при подачі кисню (окислювальний піроліз), нагрівання нерухомим або перемішування твердим теплоносієм (регенеративний піроліз), електрокрекінг. Але в зв'язку з розвитком низки процесів синтезу інтенсивно проводяться дослідження, направлені на отримання шляхом піролізу також нижчих олефінів. Останнім часом ця течія в піролізі стала переважаючою.

Постановка завдання. Забезпечення якісного керування процесом піролізу з більшим виходом етилену. Розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом піролізу етилену.

Метою даної роботи є аналіз та застосування програмного забезпечення, яке включає математичне моделювання процесу

запуску печі при відмінних технологічних параметрах та реалізацію алгоритму управління.

Об'єктом дослідження є етиленовий реактором із структурою керування на двох рівнях автоматизації.

Висвітлення результатів. У промисловості найширше застосування отримали трубчасті печі піролізу. Експлуатація пічних блоків відбувається в циклічному режимі: нагрівання - піроліз - випал коксу - охолодження - чистка загартувально-випарних апаратів (ЗВА). Термін пробігу печей залежить від:

1) процесу прогріву печі. Швидкість підйому середньої температури (COT – Coil Outlet Temperature) на виході з змішувачів не повинна перевищувати регламентного значення (поки COT < 540 °C швидкість зростання температури становить ≤ 1 °C / хв., При COT > 540 °C швидкість зростання температури становить ≤ 2 °C / хв.);

2) температури процесу під час піролізу. Чим вища температура, тим більше в пірогазі сполук, що призводять до утворення і відкладання коксу на стінках труб. Глибина перетворення вихідних вуглеводнів в коксі промислових печах є невелика. Вихід коксу складає $\geq 0,01\%$ від розходу сировини, при чому негативний вплив плівки коксу на результати піролізу є відчутним. Час переведення печі зі стану повної зупинки в нормальний робочий режим займає близько 100 годин, в той час як на пуск всього виробництва потрібно 144 год. Зупинка печі на декоксування і ремонтні роботи виконується 10 раз в рік і складає близько 15% від загального обсягу робочого часу устаткування. Матеріальні та енергетичні витрати в період пуску / зупинки складають не виробничу частину витрат, які включаються в собівартість продукції. Пуск печей проводиться контролерами в режимі ручного управління, а також по команді шляхом ввімкнення / вимкнення технологічних потоків по місцю печі відповідним апаратником. За таких умов запуск установок є непростим і вирішальним етапом в процесі роботи виробництва, також його ускладнює взаємодія багатьох працівників цього підприємства і велика кількість параметрів, що мають контролюватися. Розглянута піч за регламентом під час запуску з теплового резерву має виходити на сталий режим піролізу за 14-15 год.

Фактичний час запуску печі з резерву в ручному режимі становить 25,2 год. Така його тривалість пояснюється тим, що через людський фактор в процесі можливі небажані порушення температурного і технологічного режимів у вигляді гідравлічних і температурних ударів. Задля скорочення періоду запуску печі і зменшення впливу людського фактору пропонується змінити процес пуску з ручного управління на автоматичне.

Для втілення цієї ідеї розроблено програму керування, яка включає математичне моделювання процесу запуску печі при відмінних технологічних параметрах, реалізацію алгоритму управління. Програма повинна бути інтегрована в програмований логічний контролер (ПЛК). Для побудови системи управління процесом пуску печі експериментально-статистичним методом внаслідок обробки експериментальних даних при запуску печей піролізу етану (пропан-бутанової фракції) отримані математичні моделі процесу запуску печі для різних контрольованих і регульованих технологічних параметрів в вигляді рівнянь регресії.

Під час аналізу процесу пуску печі було виявлено, що необхідним є складний алгоритм управління з великою кількістю вкладених циклів і кроків. Для реалізації було вирішено використовувати мову структурованого тексту, оскільки схожість синтаксису з такими мовами, як C++ і Open Pascal дозволяє зменшити трудовитрати на реалізацію програмного коду, значною мірою оптимізувати процес налагодження та збільшити зрозумілість програмного коду.

Для написання таких програм система Centum CS 3000R3 пропонує використовувати мову SEBOL, різновид мови ST. Це можливо в блоці SFC, де існують кроки, які можна представити як окремі стадії запуску печі. Програма на мові SEBOL записана в кожному кроці, котрі організовано в циклі WHILE, який виконується до тих пір, поки змінна закінчення кроку не набуде значення «істина».

Рівень контролю має виконувати наступні завдання: збір даних з фізичної установки та регулювання базових параметрів процесу. Наглядний рівень повинен закінчити оптимізацію виробництва етилену. Останніми роками хімічна та нафтохімічна галузі

стикалися з проблемами через загальну конкуренцію та швидкі зміни економічних умов. Збільшена автоматизація, керування процесами та оптимізація в режимі он-лайн зіграли головну роль у збільшенні продуктивності підприємства.

Якщо колись базовою метою рішення управління була стабільність системи, то останніми роками сучасні стратегії управління широкомасштабними виробничими процесами зосереджуються на ефективності та продуктивності даних підприємств.

Вони мають підвищувати саме якість продукції, освоювати весь її асортимент, збільшувати безпеку технологічних процесів та доступність різноманітних установок, розумно використовувати ресурси, а також знижувати викиди в довкілля.

Спосіб практичної реалізації он-лайн схеми оптимізації та управління промисловим процесом розглядає загальну конструкцію як двошарову ієрархічну систему, як показано на рис. 1 [1,2].

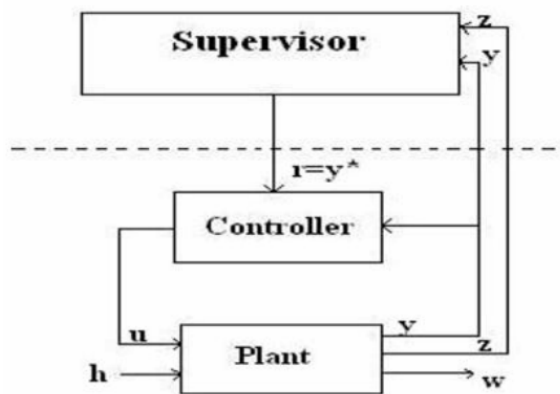


Рисунок 1 – Архітектура двошарової ієрархічної системи

Установка функціонує в номінальному режимі за нормальної технологічної еволюції. Це забезпечується систему управління з нижчого рівня, яка розглядається як рівень виконання. Щоб процес набув оптимального режиму роботи розроблено ефективне рішення щодо управління, нав'язуючи та дотримуючись критерію якості.

Тобто на цьому рівні визначена оптимальна стратегія управління на основі інформації в режимі реального часу для досягнення мети управління шляхом регулювання керованими змінними або заданих точок на рівні виконання.

Оскільки зміни в глобальній еволюції процесу залежать від тимчасових змін збурення v рівень прийняття рішень має повільну динаміку.

На відміну від цього, динаміка рівня виконання є вищою через тимчасовий режим роботи систем управління. Модель процесу на першому етапі повинна оцінюватися процедурою ідентифікації. Загалом, ця модель є багатоваріантною та нелінійною.

Метою другого етапу було визначення та рішення проблеми оптимізації. Для побудови критерію якості $J(y)$ була використана модель процесу. Рішення задачі:

$$\max J(y), y \in D \quad (1)$$

(де D - допустима область зміни параметрів), являє собою оптимальне рішення.

$$r^* = y^* = \underset{y \in D}{\operatorname{argmax}} J(y) \quad (2)$$

Основна частина щорічного світового комерційного виробництва олефінів ґрунтується на термічному крекінгу нафтових вуглеводнів з парою; що зазвичай називають піролізом чи «паровим крекінгом». Цей процес не вважається старою технологією, але паровий крекінг не є таким простим, як може здатися. Він включає в себе складні процеси, як реакції тепла, системи переносу маси та тепла, регулювання екстремальних тиску і температури та інші роботи агрегату.

Частиною суперечок між різними дизайнерами та консультантами з технологій є оптимальний потік процесу щодо вихідної сировини. За останні кілька десятиліть розвивалися процеси установки парового крекінгу, оскільки технологія постійно змінюється.

При паровому крекінгу газоподібні або рідкі вуглеводні, такі як нафта, зріджений газ або етан, розбавляються парою і недовго нагріваються в реакторі в анаеробному середовищі. Зазвичай температура реакції дуже висока і складає 850 °С, а тиск низький, зазвичай 4 бари, але реакція може проходити дуже короткочасно.

Час перебування у нових крекінгових печах зменшується до мілісекунд, через що швидкість руху газу більша швидкості звуку, для покращення виходу. Щоб зупинити реакцію в теплообміннику лінії передачі газ після досягнення температури розтріскування швидко гаситься.

Зазвичай піч парового крекінгу в якості джерела тепла використовує променеве тепло від пальників, таких як звичайні газові чи масляні пальники. Розміщують їх переважно на підлозі та / або стінках печі, і ними визначається високотемпературна зона печі, яку називають «зоною випромінювання» печі.

Зона конвекції розташовується безпосередньо над зоною випромінювання, звідки виходять гарячі гази, що згорають. Її використовують для попереднього нагрівання вуглеводнів, які піддаються крекінгу, які також відомі як «вихідна сировина».

Отже, суміш вуглеводнів попередньо нагрівають до 500°C в зоні конвекції печі, після чого вона потрапляє в зону випромінювання печі, де досягає температури реакції (в діапазоні від 700°C до 900°C). Після цього для відновлення певної кількості тепла та очищення відходів сировину охолоджують і стискають.

Після цього в системі дотримуються послідовності методів розділення та складних хімічних обробок. Для забезпечення необхідних умов розвитку реакції піролізу, важливо в правильних пропорціях розподілити реагенти у співвідношенні 3:1 (1500 м³ / год палива та 500 м³ / год пари).

Рівень управління представляє собою базовий рівень в будь-якій ієрархічній системі управління і включає в себе обладнання, яке використовується для реалізації алгоритмів управління, а також пристрої, що підключають їх до фізичної установки, а саме датчики та виконавчі механізми.

Рівень контролю повинен виконувати два важливі завдання: регулювання основних параметрів процесу та отримання даних з фізичної установки. Отримані з установки фізичні дані обробляються і використовуються для ідентифікації математичних моделей, на основі яких обчислюються команди для різних системами регулювання.

Зрештою, алгоритми управління можуть бути вдосконалені для того, щоб зберегти ефективність, отриману в змодельованому середовищі для системи із замкнутим циклом, з ідентифікованою моделлю процесу та алгоритмом управління, обчисленим на основі цієї моделі, коли справа доходить до її реалізації на фізичній платформі.

Це означає, що необхідно знайти рішення для того, щоб компенсувати невизначеності, які виникають на етапі моделювання процесу, і забезпечити стабільність реальної системи, а також збереження характеристик номінальної системи для фізичної установки.

Одним з таких рішень є обчислення надійних алгоритмів управління, як показано нижче.

Стандартне рішення для автоматичного управління повинно мати можливість розглянути два основні аспекти, від яких залежить правильний хід процесу. По-перше, це стосується кількості реагентів – алгоритм повинен пропонувати можливість підтримувати належну їх пропорцію. По-друге, алгоритм повинен встановлювати необхідні температуру та тиск, за яких відбуватимуться бажані хімічні реакції всередині реактора [1,4].

Саме тому обрано рішення для автоматизації з чотирма контурами управління, що показано на рис. 2.

Контроль над потоком бензину та пари до етиленового реактора забезпечують перші дві петлі управління. Окрім цієї сировини, ще одним контрольованим технологічним параметром є внутрішній тиск реактора.

Щоб процес функціонував належним чином необхідно зберігати значення тиску в межах допустимого робочого діапазону, одночасно з тим стінки реактора не повинні піддаватися руйнівним впливам. У цьому випадку оптимальний діапазон тиску усередині реактора було встановлено на рівні не менше 3,3 бар і не більше 4,5 бар.

Контролем кількості СН₄ регулюється температура в середній ділянці реактора, яка слугує задля згоряння та нагріває установку. Для автоматизації треба знайти таке рішення, яке дозволяє підтримувати значення температури в межах 820°C і 860°C.

Спершу на основі серії технологічних даних, наданих власниками заводу, ми аналітично визначили математичні моделі двох процесів. Математична модель для процесу потоку бензину [1]:

$$H_{F_1}(s) = \frac{0.24}{(8s+1)(0.67s+1)} \approx \frac{0.24}{8s+1} \quad (3)$$

та для процесу потоку пари:

$$H_{F_2}(s) = \frac{0.21}{(4s+1)(0.2s+1)} \approx \frac{0.21}{4s+1} \quad (4)$$

Далі ми перейшли до проектування контролерів для двох вищезгаданих систем з використанням алгоритму ПІД керування.

Щоб визначити параметри контролера, які забезпечували б бажані характеристики для систем із замкнутим циклом застосовано Poles Placement Method.

За допомогою таких пов'язаних передавальних функцій описано два розроблені нами контролери:

$$H_{R_1}(s) = 11.11 \left(1 + \frac{1}{8s} \right), \quad (5)$$

$$H_{R_2}(s) = 6.34 \left(1 + \frac{1}{4s} \right).$$

Використано середовище моделювання Matlab Simulink, яке допомогло перевірити ефективність, захищену даними алгоритмами управління. На рис. 3 показано результати моделювання для випадку, коли амплітуда опорного сигналу для контуру регулювання пари становить третину амплітуди еталонного сигналу для контуру управління бензином.

(5)

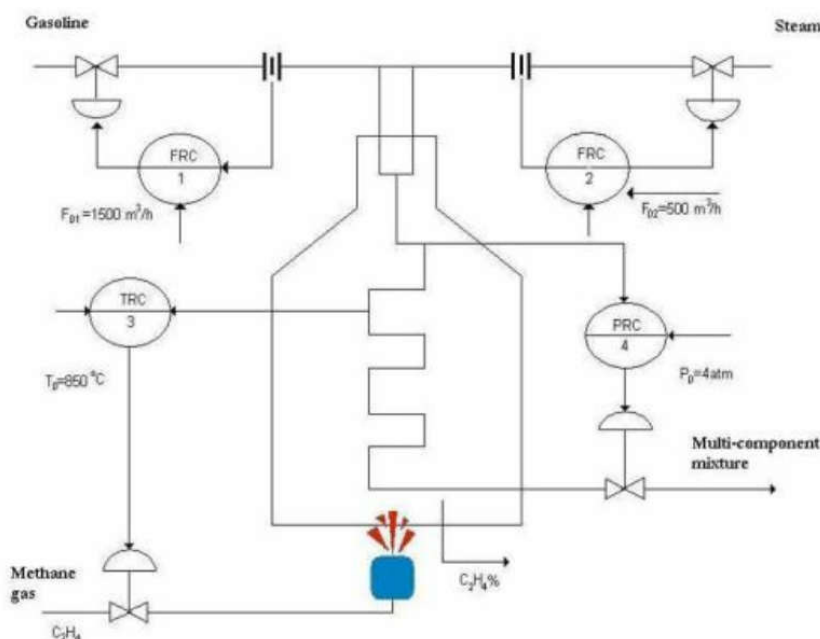


Рисунок 2 – Управління етиленовим піролізним реактором по чотирьох контурах

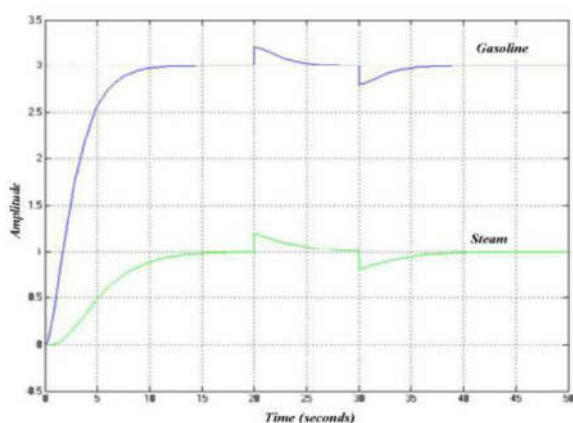


Рисунок 3 – Результати математичного моделювання системи управління

Судячи з відстеження видно, що контролер забезпечує відхилення сигналів збурень ступінчастого типу, що подаються на вихід системи.

Але нам потрібно було отримати відповідне числове подання даних алгоритмів управління для того, щоб мати можливість реалізувати їх на пристрої фізичної обробки. Ми отримали дискретні подання двох алгоритмів управління за допомогою методу наближення Ейлера $\frac{1}{s} \approx \frac{h}{z-1}$ для періоду дискретизації $h=0.1$ секунди:

$$H_{R_1}(z^{-1}) = \frac{11.24 - 11.11z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

$$H_{R_2}(z^{-1}) = \frac{7.92 - 6.34z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

Виконавши кроки, коротко описані нижче, ми безпосередньо розробили чисельні варіанти

відповідних контролерів для тиску та систем регулювання температури.

За допомогою експериментального методу ідентифікації з використанням даних, отриманих з фізичної установки, ми отримали моделі процесів[1].

Метод найменших квадратів у його рекурсивній формі є найпоширенішим методом параметричної адаптації. Після ідентифікації, моделі перевірено з використанням різних наборів даних. Ми використовували тест на отримання залишків для перевірки отриманої моделі. Цей тест стверджує, що різниця між результатом фізичного процесу після подання на збурення та виходом моделі повинна оцінювати білий шум.

Ми ідентифікували та перевірили модель для системи контролю температури

$$H_{P_2}(z^{-1}) = \frac{0.04711z^{-1}}{1-1.61402z^{-1}+0.65344z^{-2}} \quad (7)$$

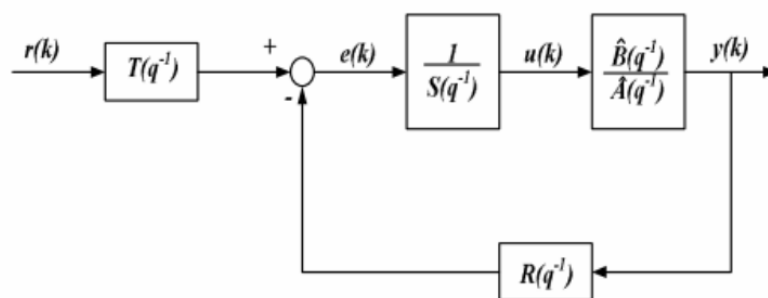


Рисунок 4 – Структура використаного контролера RST

Порівнявши алгоритм управління RST з класичним алгоритмом управління ПД ми зупинились на першому тому, що він дозволяє накладати різні характеристики відстеження та регулювання, також він може призвести до надійного алгоритму управління, який, беручи до уваги робочий контекст, є дуже важливим.

Висновок. Створено проектне рішення та втілено ієрархічне керування етиленовим реактором із структурою керування на двох рівнях автоматизації. Розроблено автоматизовану систему управління технологічним процесом піролізу етилену, програму керування, яка включає математичне моделювання процесу запуску печі при відмінних технологічних параметрах, реалізацію алгоритму управління. Спроектовано та реалізовано ієрархічне рішення управління етиленовим реактором із структурою управління на двох рівнях автоматизації.

використавши період вибірки 5 секунд. Також розглянуто більший період відбору проб тому, що динаміка процесу повільна.

В ситуації з системою регулювання тиску, модель, яка була ідентифікована та перевірена під час періоду відбору проб протягом 2 секунд, є такою:

$$H_{P_2}(z^{-1}) = \frac{0.06597z^{-1}}{1-1.68364z^{-1}+0.70730z^{-2}} \quad (8)$$

Після, задля забезпечення низки бажаних характеристик відстеження та регулювання, за допомогою алгоритму управління RST розроблено два контролери. Структура алгоритму RST показана на рис. 4.

Даний алгоритм обраний через те, що має два ступені свободи, більшу гнучкість та одноманітність для проектування та реалізації команди в управлінні числовими системами.

Використано середовище моделювання Matlab Simulink, яке допомогло перевірити ефективність, захищену даними алгоритмами управління. Отримано результати моделювання для випадку, коли амплітуда опорного сигналу для контуру регулювання пари становить третину амплітуди еталонного сигналу для контуру управління. Обчислено три контрольні поліноми R, S і T за допомогою методу Poles Placement Method. I, хоча дві отримані номінальні системи управління забезпечували бажані характеристики відстеження та регулювання - це траплялося тільки для збурень з амплітудами максимум 3% амплітуди опорного сигналу. Тому нами перероблено алгоритми управління таким чином, щоб системи із замкнутим циклом були надійними до більш широкого кола можливих порушень.

Список використаних джерел

1. Boryn Vasyl, Holovach Ihor, Ikaliuk Andrii. Автоматизація технологічного процесу піролізу етилену: The 7th International scientific and practical conference “Innovative areas of solving problems of science and practice” (November 08 – 11, 2022) Oslo, Norway. International Science Group. 2022. – P. 595-601, ISBN – 979-8-88831-925-3

DOI – 10.46299/ISG.2022.2.7.

2. Борин В.С., Ікалюк А.А. Оптимізація процесу піролізу етилену: Тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ, ТЕХНІЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ». 13 жовтня 2022 року. ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ. С. 64-65

3. Дубовой В.М., Кветний Р.Н, Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця: ПП «Едельвейс», 2017. 804 с.

4. Борин В.С., Ікалюк А.А. Автоматизоване управління етиленовим піролізним реактором: Тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ, ТЕХНІЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ» 13 жовтня 2022 року. ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ. – С. 73-74.

References

1. Boryn Vasyl, Holovach Ihor, Ikaliuk Andrii. Avtomatyzatsiya tekhnolohichnoho protsesu pirolizu etylenу: The 7th International scientific and practical conference “Innovative areas of solving problems of science and practice” (November 08 – 11, 2022) Oslo, Norway. International Science Group. 2022. – P.. 595-601, ISBN – 979-8-88831-925-3 [in Ukrainian]

DOI – 10.46299/ISG.2022.2.7.

2. Boryn V.S., Ikalyuk A.A. Optymizatsiya protsesu pirolizu etylenу: Tezy dopovidey vseukrayins'koyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i studentiv. «INFORMATSIYNI TEKHNOLOHIIYI V OSVITI, TEKHNITSI TA PROMYSLOVOSTI». 13 zhovtnya 2022 roku. IFNTUNH, m. Ivano-Frankivs'k. S. 64-65 [in Ukrainian]

3. Dubovoy V.M., Kvyetnyy R.N, Mykhal'ov O.I., Usov A.V. Modelyuvannya ta optymizatsiya system: pidruchnyk. Vinnytsya: PP «Edel'veys», 2017. 804 st. [in Ukrainian]

4. Boryn V.S., Ikalyuk A.A. Avtomatyzovane upravlinnya etylenovym piroliznym reaktorom: Tezy dopovidey vseukrayins'koyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i studentiv «INFORMATSIYNI TEKHNOLOHIIYI V OSVITI, TEKHNITSI TA PROMYSLOVOSTI» 13 zhovtnya 2022 roku. IFNTUNH, m. Ivano-Frankivs'k. – S. 73-74. [in Ukrainian]

УДК 624.044

DOI 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-66-73

ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧОЇ-ВІЛЬЯМСА У ДОСЛІДЖЕННІ СТАНУ ПІДШИПНИКІВ ГПА

О. І. Белей, Л. О. Штаєр

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67, e-mail: ktsu@ukr.net

Незважаючи на високий рівень розвитку вібраційної діагностики, існує ряд невирішених наукових проблем, пов'язаних із створенням технічних засобів і методів віброконтролю, зокрема, вібродіагностики газоперекальчуваних агрегатів (ГПА). Одним із силових елементів ГПА є підшипники, стан яких визначає вібраційний стан агрегату в цілому. У зв'язку з цим проводилося дослідження щодо вдосконалення віброакустичного методу діагностування стану газоперекачувального агрегату шляхом обробки сигналів, які містять віброакустичну інформацію, що відповідає різним станам підшипників. Основною метою даної роботи є вивчення ефективності застосування перетворення Чої-Вільямса для підвищення інформативності обробки віброакустичних сигналів при визначенні технічного стану підшипників ГПА. В роботі розглянуто сучасний стан діагностування підшипників. Встановлено, що найпоширенішим методом визначення їх поточного стану є віброакустичний контроль. Вивчено питання використання методів часо-частотного аналізу при обробці віброакустичних сигналів. Запропоновано використати перетворення Чої-Вільямса, за допомогою якого забезпечується краща роздільність інформаційних сигналів за рахунок усунення високочастотних шумів. Наведено структуру програмної частини системи вібраційного контролю стану підшипників та розроблено інформаційний модуль вібраційного контролю з використанням обраного перетворення. Продемонстровано результати опрацювання віброакустичних сигналів при проведенні моделювання типових дефектів підшипників типу тріщина і розбалансу. Сформовано висновки щодо отриманих результатів. Наукова новизна отриманих результатів полягає у доведенні ефективності використання перетворення Чої-Вільямса для дослідження стану підшипників ГПА на прикладі розглянутих модельних станів. Практичне значення полягає у розробці інформаційного модуля контролю технічного стану підшипників ГПА, яка дає можливість виявити діагностичні ознаки його стану. Подальші наукові дослідження будуть спрямовані на вивчення можливості використання вказаного підходу до обробки сигналів в режимі реального часу, а також формування бази даних образів різного роду дефектів функціональних елементів ГПА.

Ключові слова: інформаційний модуль, дефект, часо-частотне перетворення, контроль.

There are a number of unsolved scientific problems in vibration diagnostics, although the high level of its development. They are related to the development of technical equipment and methods of vibration control, in particular, vibration diagnostics of gas pumping unit. One of the power elements of the gas pumping unit is the bearings, the vibration state of the unit depends on their condition. There is conducted research on improving the vibroacoustic method of diagnosing the state of the gas pumping unit by processing signals that contain vibroacoustic information corresponding to different states of the bearings. The main purpose of the paper is to study the effectiveness of the application of the Choi-Williams transform for increasing the information of processing vibroacoustic signals in determining the state of bearing units of the gas pumping unit. There is shown the current state of diagnosis of bearing units. It is established that the most common method of determining the bearing current state is vibroacoustic control. The issue of using time-frequency analysis methods in the processing of vibroacoustic signals is studied. It is proposed to use the Choi-Williams transform for better signal detection and separation by eliminating high-frequency noise. The software structure of the vibration control system of the bearing unit state is given. An information module of vibration control was developed with the use of chosen transform. The results of vibroacoustic signal processing during modeling of typical bearing defects such as cracks and imbalances are demonstrated. Conclusions regarding the obtained results were formed. The scientific novelty of the obtained results occurred in proving the effectiveness of using the Choi-Williams transformation to study the condition of the bearing units of the GPA using the example of the presented model conditions. The development of an information module for monitoring the technical condition of bearing units of the HPA, which makes it possible to detect diagnostic signs of

the condition of the unit, becomes of practical importance. Further scientific research is aimed at studying the possibilities of using the given approach to signal processing in real time, as well as the formation of a database of images of various types of defects of functional elements of the GPA.

Key words: information module, defect, time-frequency transform, control.

Вступ

Газ по магістральних газопроводах повинен бути доставлений споживачам найоптимальнішим і економічно ефективним шляхом з дотриманням постійно зростаючих вимог по підвищенню надійності і безпеки поставок. Він транспортується по магістральних газопроводах під високим тиском (від 50 до 75 кг/см²). Для цього на відстані 100-150 км встановлюються проміжні компресорні станції, які відновлюють тиск газу на ділянці газопроводу до розрахункового значення. При цьому пропускна спроможність газопроводу зростає у декілька разів, а капітальні витрати збільшуються лише на 25-30% [1].

Ефективна експлуатація цього комплексу можлива при безвідмовному функціонуванні автоматизованої системи управління технологічними процесами компресорної станції, до складу якої входить і система автоматичного управління газоперекачувальним агрегатом (ГПА) [1]. Питання аналізу надійності газотранспортних систем, зокрема ГПА детально опрацьовано авторами [2]. На практиці широко застосовуються два підходи до визначення технічного стану складових ГПА [2-3]: параметричні методи (ґрунтуються на аналізі робочих параметрів системи, таких як температура, тиск на різних вузлах, частота обертання турбін, хімічний склад продуктів згорання) та віброакустичні (ґрунтуються на аналізі віброакустичних сигналів, що генерують функціональні складові ГПА).

Віброакустичний метод діагностування полягає у встановленні взаємозв'язку між зміною структурного параметру механізму (величиною зносу, зміною геометричних розмірів, тощо) і зміною характеристик віброакустичного сигналу, що генерується структурними елементами механізму в процесі його роботи. Так, при зносі механізмів чи виникненні в них дефектів порушуються кінематичні зв'язки між деталями, внаслідок чого змінюються і характеристики вібраційного сигналу.

Незважаючи на високий рівень розвитку вібраційної діагностики, існує ряд невирішених наукових проблем, пов'язаних із створенням технічних засобів і методів віброконтролю, зокрема, вібродіагностики ГПА і його окремих елементів. Одним із силових елементів ГПА є підшипники, стан яких визначає вібраційний стан агрегату в цілому. На даний час існує велика кількість методів для обробки і представлення діагностичної інформації стану підшипників агрегатів, проте не завжди ці методи забезпечують необхідну роздільну здатність, точність і необхідну швидкодію отримання необхідних даних.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Іноді в процесі діагностування з використанням віброакустичних методів все ще застосовуються стандартні методи, зокрема побудова спектру вібросигналу за допомогою швидкого перетворення Фур'є [4]. Традиційний частотний аналіз не підходить для спостереження властивостей нестационарних сигналів. Це пов'язано з тим, що роздільна здатність за часом не визначена в перетворенні Фур'є [5]. Таким чином, існує потреба в методах, що реалізують спільні часо-частотні алгоритми аналізу.

У роботі [3] розглянуто сучасний стан методів обробки віброакустичних сигналів, таких як перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення, штучні нейронні мережі, дискретне косинусне перетворення та автокореляційні функції. Авторами зроблено висновок, що жоден з розглянутих методів не дозволяє самотужки зробити висновок про технічний стан ГПА, що вимагає розробки системи діагностування, в якій буде використано декілька методів обробки віброакустичної інформації.

У роботі [5] обґрунтовано можливість застосування частотно-часових розподілів енергії вібросигналу для детального аналізу вібраційних процесів у відцентрових насосних агрегатах при наявності складних коливань в частотних спектрах вібросигналів. Зазначено, що застосування віброакустичних методів є

найбільш оптимальним варіантом з точки зору ефективності та простоти процедури проведення контролю, оскільки буде використовуватися лише один інформативний параметр – вібрація об'єкту дослідження, за зміною якої можна визначати практично усі поширені дефекти.

Практичні аспекти деяких репрезентативних частотно-часових методів аналізу описані в статтях [6-8]. Зокрема, вказано на використання перетворення Чої-Вільямса, яке дозволяє зменшити інтерферентне накладання, зберігаючи багато корисних функцій перетворення Вігнера-Віля. Це перетворення може значно пригнічувати накладання між компонентами сигналу в різні моменти часу та на різних частотах. Проте накладання між компонентами сигналу, що виникають в один і той же момент або мають однакову частотну складову залишаються на тому ж рівні, що і для перетворення Вігнера-Віля. При цьому швидкість перетворення Чої-Вільямса є відносно невеликою. Аналізуючи різні варіанти часо-частотних перетворень автори вказують на важливу роль даного класу перетворень для дослідження вібрації технічних об'єктів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Розглянемо декілька методів обробки віброакустичної інформації, а саме:

- спектральний аналіз [4];
- частотно-часове віконне перетворення [5-6];
- перетворення Вігнера-Вілля [5, 7];
- перетворення Чої-Вільямса [7, 8].

Діагностичною ознакою у всіх вище перерахованих перетвореннях є вібрація.

Спектральний аналіз – це метод обробки сигналів, що дозволяє виявити частотний склад сигналу. Виявлення підвищених амплітуд вібрації на частотах, які співпадають з частотами можливих пошкоджень елементів, резонансними частотами деталей, на частотах протікання робочого процесу допомагає виявити та ідентифікувати несправність на ранніх стадіях зародження і розвитку [7].

Частотно-часове віконне перетворення (ЧЧВП) представляє собою суму трьох послідовних радіоімпульсів з різними частотами без пауз, зі співвідношенням сигнал/шум, близьким до 1. Проте, недоліки ЧЧВП полягають у появі інтерференційного фону і помилкових піків енергії в умовах багатосигнальної дії та при дії шумів і перешкод, що приводять до значних спотворень реальної картини розподілу сигнальної енергії в координатах частота-час.

Перетворення Вігнера-Вілля – один з методів спектрально-часового аналізу нестационарних сигналів [5]. Цей розподіл є інструментом для частотного аналізу часових сигналів, він може інтерпретуватися як розподіл енергії сигналу як в частотному, так і часовому інтервалах.

Неспроможність існуючих методів здійснювати часову локалізацію сингулярностей сигналів може бути частково видалена введенням у перетворення так званої пересувної віконної функції, що має компактний носій. Тому, як альтернативне перетворення, було використано перетворення Чої-Вільямса (рис. 1), що дозволить добитись кращих результатів обробки діагностичної інформації про стан підшипників.

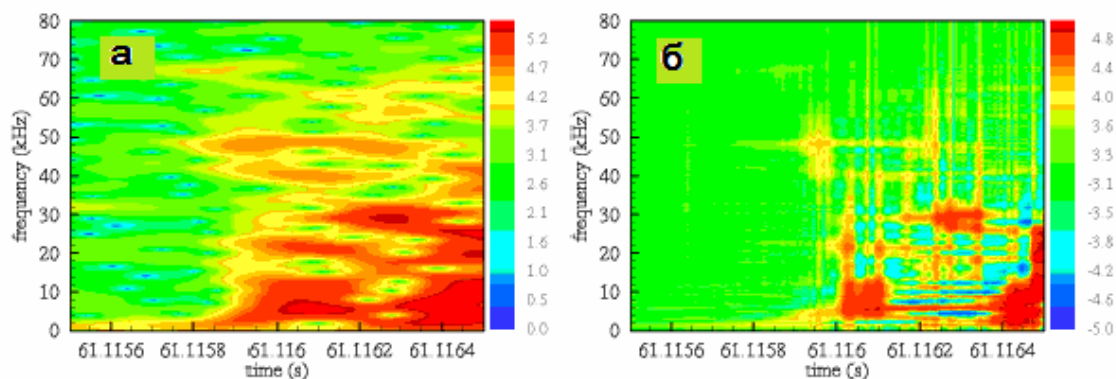


Рисунок 1 – Спектрограма (а) і перетворення Чої-Вільямса (б)

Спектрограма сигналу (рис. 1, а) містить значні горизонтальні і вертикальні хвилі в частотно-часовому спектрі. Горизонтальні хвилі викликані авто-умовами, які мають такий же частотний центр, вертикальні брижі відповідають авто-умовам, які мають такий же центр часу. Перетворення Чої-Вільямса зберігає властивості перетворення Вігнера-Вілля, зменшуючи при цьому вплив перехресної інтерференції [5,6]. Даний факт добре помітно на рис. 1, б.

За частотою відмов елементів і ГПА підшипники посідають друге місце після робочих лопаток, направляючих лопаток, ротора і діафрагми турбіни. У відсотковому представленні можливі несправності ГПА, що стосуються підшипників – це колодки підшипників (15,7 %), вкладиші підшипників (32,3 %). Для підшипників ГПА характерні несправності зносу та руйнування бабітової заливки. Найчастіше причинами несправностей є механічні домішки та підвищена температура масла, вібрація ротора, зменшення натягів вкладишів, осьові зрушення роторів [2].

На завершення слід зазначити, що існуючі методи діагностування не містять системного підходу до розробки методу діагностування підшипників ГПА, як окремої складової агрегату, і не завжди є ефективними з точки зору діагностики.

Виклад основного матеріалу дослідження

У результаті вивчення методів дослідження стану підшипників було вирішено на основі перетворення Чої-Вільямса розробити інформаційний модуль у програмному пакеті C++ Builder для обробки і представлення інформації про віброакустичний стан підшипника.

Інформаційний модуль вібраційного контролю стану підшипників дозволяє:

- введення і реєстрацію вібраційних сигналів на підшипниках ГПА;
- підсилення сигналів;
- неперервний контроль загального рівня віброшвидкості в діапазоні до 1000 Гц з метою формування аварійних і попереджувальних сигналів для системи керування агрегатом;
- обробку й аналіз з використанням комп'ютерної техніки вібраційних

характеристик підшипника ГПА і виведення графіків на монітор.

До складу системи вібраційного контролю стану підшипника входять:

- підпрограма введення вібросигналів у комп'ютер (драйвер);
- підпрограма візуального контролю вібраційного сигналу;
- підпрограма обчислення спектру;
- підпрограма для графічного відображення спектру на моніторі;
- підпрограма обчислення вібродіагностичних ознак;
- підпрограма аналізу вібродіагностичних ознак і визначення дефектних складових ГПА;
- підпрограма керування веденням бази даних вібродіагностичних параметрів і результатів діагностування.

Перетворення Чої-Вільямса є ефективним методом дослідження нелінійних хвильових процесів, фрактальних сигналів і сигналів з особливостями та визначається формулою 1:

$$\Phi(\vartheta, \tau) = \exp\left(-\frac{(\pi\vartheta\tau)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

де σ – параметр;

τ, ϑ – змінні функції.

Це ядро перетворення при $\Phi(0, \tau) = \Phi(\vartheta, 0) = 1$ показує, що обидві межі є справедливими. Показникове ядро пересікає перехресні умови і створене двома функціями, які мають як різний час, так і частотні центри. Параметр σ керує швидкістю розпаду і, якщо параметр зменшується, вплив зменшується. З іншого боку, коли σ прямує до безмежності, ми отримуємо перетворення Вігнера-Вілля, тобто маємо вибір із альтернативних варіантів при заданні параметру σ .

На графіку (рис. 2) у верхній його частині зображено спектрограму, а у нижній частині – перетворення Чої-Вільямса, таке поєднання дозволяє оцінити переваги і недоліки обох перетворень в порівнянні. Як бачимо перетворення Чої-Вільямса забезпечує кращу роздільність, тим самим забезпечується краща інформативність. Окрім того усуваються височастотні шуми, що і забезпечує додаткове підвищення інформативності.

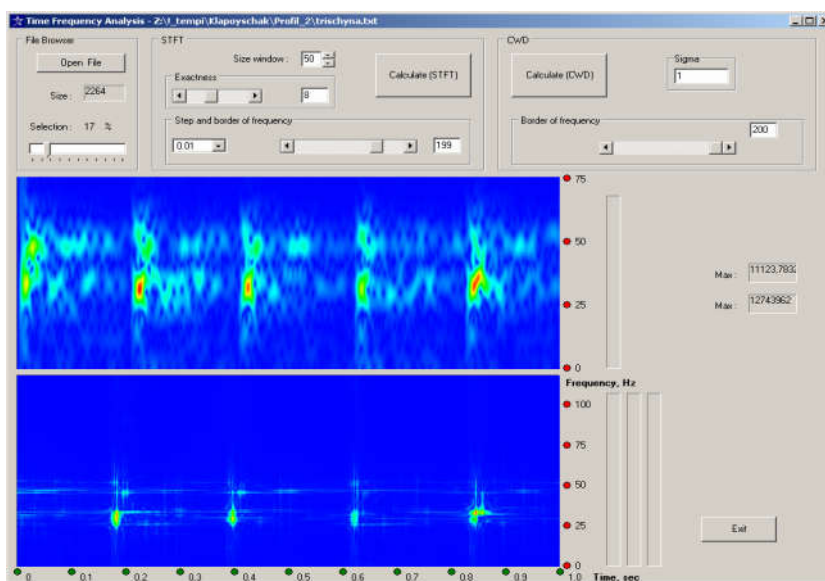


Рисунок 2 – Вікно програми для перетворення Чої-Вільямса

Як результат, написана програма для перетворення Чої-Вільямса містить широкий спектр параметрів налаштування, що дозволяє провести точне налаштування, забезпечити при цьому певну точність і швидкодню, а також відтворити окремий фрагмент сигналу.

Для проведення експерименту спочатку було проведено дослідження нормальної роботи підшипника при різних частотах дослідження. У результаті обробки вимірювальної інформації було отримано наступні результати, показані на рис. 3-4. Оскільки вимірювальна інформація в деяких точках і в деяких напрямках є ідентичною, то зображаються лише ті результати обробки, що відрізняються один від одного. Це пояснюється відповідно корельованістю сигналів.

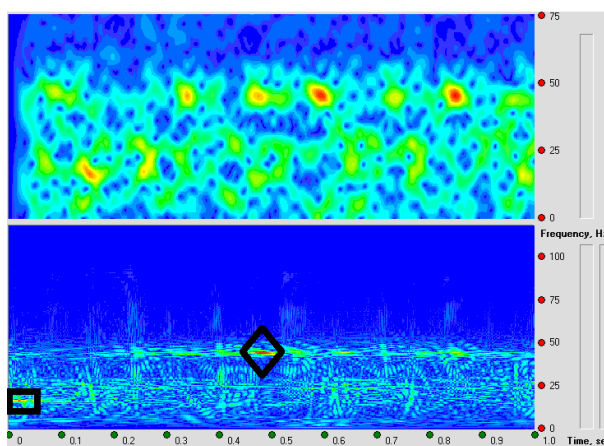


Рисунок 4 – Дослідження нормальної роботи силових підшипників при частоті 140 Гц

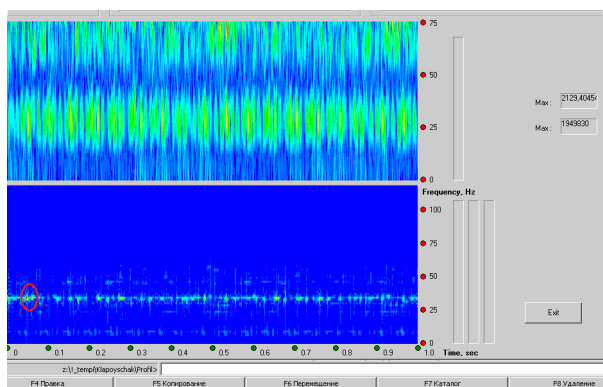


Рисунок 3 – Дослідження нормальної роботи силових підшипників при частоті 80 Гц

У результаті дослідження (рис. 3-4) можна зробити висновок, що чим більша частота дослідження, тим краще дослідити вплив вібрації. Графік (рис. 3) стає більш насиченим і краще можна прослідкувати інтенсивність прояву частоти в певний проміжок часу, на графіку інтенсивність прояву частоти проявляється у вигляді крапки (позначено колом на рис. 3). Також можна прослідкувати появу гармонік сигналу – основна гармоніка і першої складової основної гармоніки прояву інтенсивності частоти.

Присутність основної гармоніка – це частота роботи нагнітача (24 Гц, чорний прямокутник на рис. 4), а також перша складова основної гармоніки (≈ 48 Гц, чорний ромб на

рис. 4), присутні незначні шуми в частотах, що лежать між основною і першою складовою основної гармоніки. Максимуми в цих перетвореннях є невеликі. Вібраційна навантаженість підшипника є незначною в усталеному режимі. Всі ці факти свідчать про нормальну роботу підшипників ГПА.

На наступному етапі проведено дослідження підшипника з тріщиною на поверхні (рис. 5-6). Даний дефект виникає внаслідок виробничого або експлуатаційного факторів, ерозійного зношення та механічного пошкодження [8].

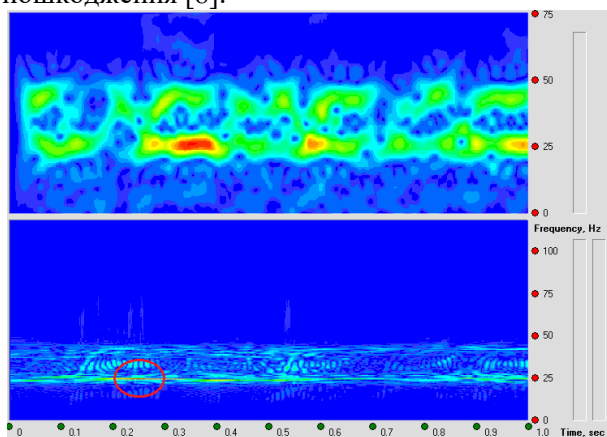


Рисунок 5 – Дослідження тріщини силових підшипників при частоті 60 Гц

Графіки рис. 6-7 містять специфічний прояв вказаного дефекту і засвідчують достатньо високу спроможність методу Чої-Вільямса до розпізнавання специфічних дефектів і їх наслідків. Також можна зробити висновки, що наведені результати на рис. 5-6 демонструють кращу можливість дослідження впливу вібрації зі зменшення частоти [8].

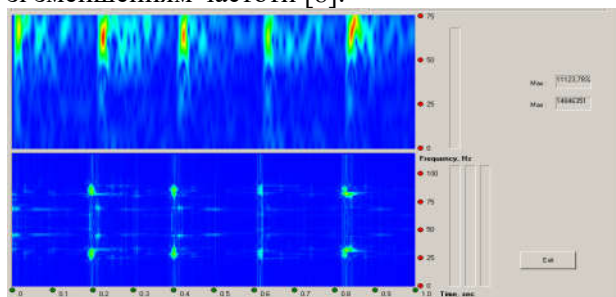


Рисунок 6 – Дослідження тріщини силових підшипників при частоті 100 Гц

Наступний етап – проведення дослідження роботи підшипника під час середнього розбалансу при різних частотах. Причинами

виникнення даного дефекту є ослаблення кріплень та несвоєчасна заміна фільтрів [8]. У результаті проведених вимірювань і обробки даних, було отримано результати, які зображені на рис. 7-8.

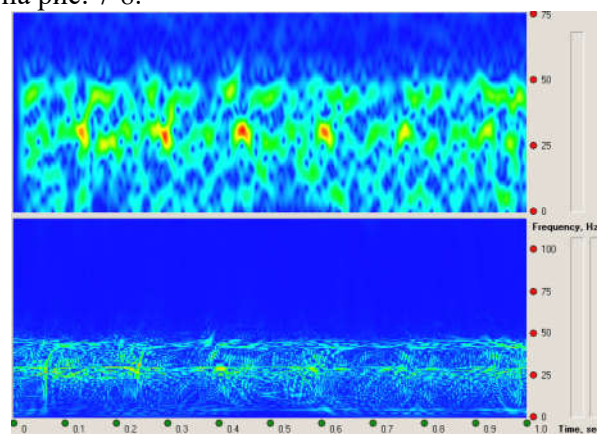


Рисунок 7 – Дослідження роботи силових підшипників під час середнього розбалансу при частоті 80 Гц

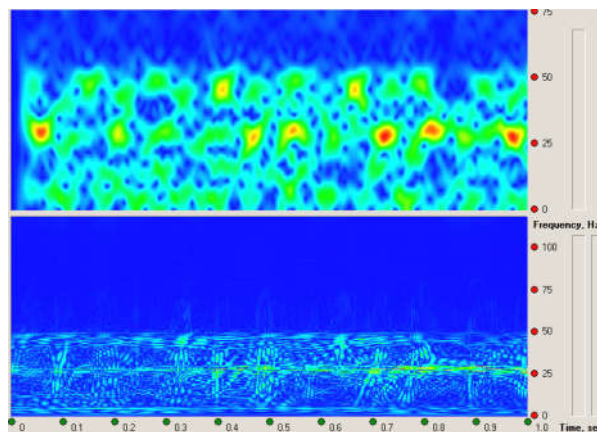


Рисунок 8 – Дослідження роботи силових підшипників під час середнього розбалансу при частоті 100 Гц

На графіках домінує основна гармоніка, а також присутня із значно меншою інтенсивністю перша складова основної гармоніки. Максимум перетворення є значним, що свідчить про необхідність проведення балансування заміни підшипників, якщо б це мало місце в реальних умовах [8].

Також було проведено досліді при зміні параметра σ для нормальної роботи і під час середнього розбалансу підшипників. У результаті досліді можна зробити висновки, що при збільшенні σ графік стає більш розпливчастим і нечітко проявляються

гармоніки, які показують стан досліджуваного об'єкта. Результати дослідження показані нижче (рис. 9-10).

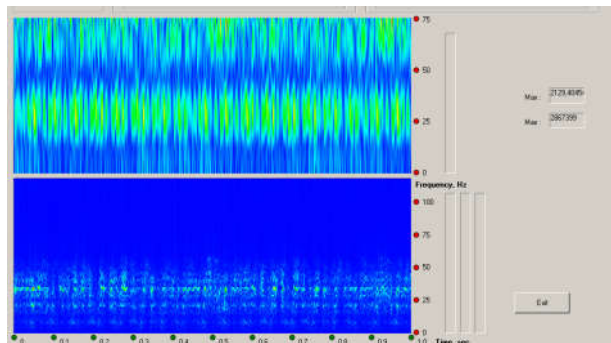


Рисунок 9 – Дослідження нормальної роботи силових підшипників при частоті 80 Гц і $\sigma = 1000$

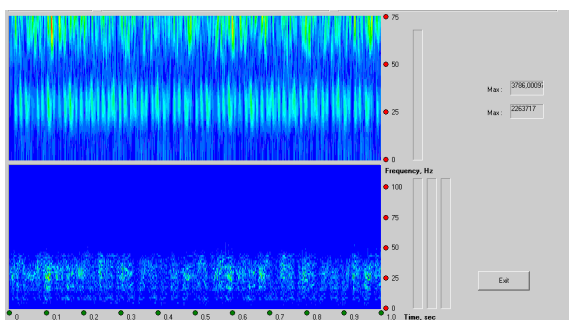


Рисунок 10 – Дослідження роботи силових підшипників під час середнього розбалансу при частоті 80 Гц і $\sigma = 1500$

Дослідження нормальної роботи силових підшипників при частоті 100 Гц і $\sigma = 1000$ приведено на рис. 11.

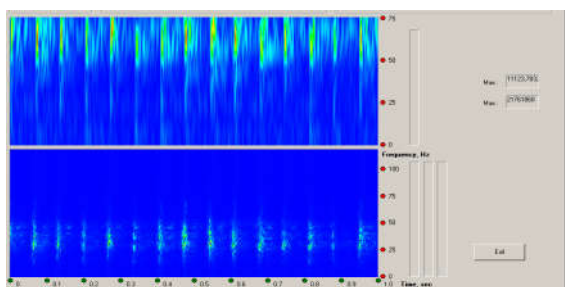


Рисунок 11 – Дослідження тріщини силових підшипників при частоті 100 Гц і $\sigma = 1000$

Отже, за результатами дослідження віброакустичної картини прояву дефектів силових підшипників типу тріщина і розбалансу за результатами застосування обраного часо-частотного перетворення Чої-Вільямса вдається однозначно ідентифікувати змодельовані

дефекти в порівнянні з нормальним станом функціонування вказаного підшипника.

Висновки

Основні результати роботи полягають в наступному:

- проведений аналіз сучасних досліджень і публікацій діагностування технічного стану підшипника ГПА показав відсутність системного підходу до розробки методу діагностування окремих його складових;
- методологічні передумови використання перетворення Чої-Вільямса дозволили розробити інформаційний модуль у програмному пакеті C++ Builder для вібраційного контролю стану підшипника;
- розроблено алгоритм роботи програми віброконтролю підшипникових елементів ГПА;
- у результаті проведених досліджень були отримані такі результати: перетворення Чої-Вільямса (рис. 1-3) несе більше інформації про технічний стан підшипників, ніж спектограми (рис. 2-3, 6, 10-11). Це пояснюється тим, що перетворення Чої-Вільямса містить в собі функціональне ядро, яке зменшує вплив шуму на дослідження вібрації, відсутній вплив похибки (рис. 3-12); встановлено, що чим менша частота і σ дослідження, тим краще дослідити вплив вібрації (рис. 3-121).

Наукова новизна отриманих результатів полягає у доведенні ефективності використання перетворення Чої-Вільямса для дослідження стану підшипників ГПА на прикладі розглянутих модельних станів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці інформаційного модуля контролю технічного стану підшипників ГПА, яка дає можливість виявити діагностичні ознаки його стану.

Подальші наукові дослідження будуть спрямовані на вивчення можливості використання вказаного підходу до обробки сигналів в режимі реального часу, а також формування бази даних образів різного роду дефектів функціональних елементів ГПА.

Список використаних джерел

1. Ільченко Б. С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів: монографія. – Харків: ХНАМГ, 2011. 228 с.

2. Підвищення надійності газотранспортних систем: монографія / Б. В. Копей, А. Бенмуна, В. І. Слободян, А. Беллауар, С. І. Галій, Д. Халімі, А. М. Найда. – Серія «Нафтогазове обладнання», том 8 – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012.– 300 с. URL: <https://core.ac.uk/download/73907232.pdf>

3. Ольховський А. О., Заміховський Л. М., Мірзоєва О. Ю., Шатан М. В. Проектування системи діагностування технічного стану газоперекачувального агрегату на основі аналізу існуючих методів обробки віброакустичних сигналів. *Таврійський науковий вісник*. Серія: Технічні науки, 2022 (4), 11-19. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.4.2> URL: <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/265/244>

4. Паньків Ю. В. Дослідження вібраційних процесів у відцентрових насосних агрегатах з метою контролю динаміки розвитку дефектів їх робочих коліс та між ступінчатих ущільнень. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. №4(49). С. 74-80.

5. Choi-Williams distribution in linear canonical domains and its application in noisy LFM signals detection. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1007570419303442>.

6. Вишнівецький О. В. Аналіз сигналів на базі перетворень Вігнера та Чої-Вільямса в методах дистанційного радіозондування геокосмосу : автореф. дис. канд. Харків, 2012. 24 с.

7. Majkowski Andrzej, Kołodziej Marcin, Rak Remigiusz Joint Time-Frequency And Wavelet Analysis-An Introduction. *Metrology and Measurement Systems*. 2014. Volume 21. PP. 741-758. DOI: 10.2478/mms-2014-0054. URL: https://www.researchgate.net/publication/269463091_Joint_Time-Frequency_And_Wavelet_Analysis-An_Introduction

8. Ковалів Є. О. Оптимізація роботи газоперекачувальних агрегатів з різними типами приводів. *Нафтогазова енергетика*. 2007. №2 (3). С. 80-86.

References

1. Il'chenko B. S. Diagnostuvannya funktsional'no texnichnogo stanu gazoperekachuval'ny'x agregativ: monografiya. Kharkiv: XNAMG, 2011. – 228 s. [in Ukrainian]

2. Pidvyshchennya nadiynosti hazotransportnykh system: monohrafiya / B. V. Kopey, A. Benmuna, V. I. Slobodyan, A. Bellauar, S. I. Haliy, D. Khalimi, A. M. Nayda. – Seriya «Naftohazove obladnannya», tom 8 – Ivano-Frankivs'k: IFNTUNH, 2012.– 300 s. URL: <https://core.ac.uk/download/73907232.pdf> [in Ukrainian]

3. Ol'khovs'kyy A. O., Zamikhovs'kyy L. M., Mirzoyeva O. YU., Shatan M. V. Proektuvannya systemy diahnostuvannya tekhnichnogo stanu hazoperekachuval'noho ahrehatu na osnovi analizu isnuuyuchykh metodiv obrobky vibroakustychnykh syhnaliv. *Tavriys'kyu naukovyy visnyk*. Seriya: Tekhnichni nauky, 2022 (4), 11-19. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.4.2> URL: <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/265/244> [in Ukrainian]

4. Pan'kiv YU. V. Doslidzhennya vibratsiynykh protsesiv u vidtsentrovyykh nasosnykh ahrehatakh z metoyu kontrolyu dynamiky rozvytku defektiv yikh robochykh kolis ta mizh stupinchatykh ushchil'nen'. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2013. №4(49). S. 74-80. [in Ukrainian]

5. Choi-Williams distribution in linear canonical domains and its application in noisy LFM signals detection. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1007570419303442>.

6. Vyshnievetskyi O. V. Analysis of signals based on Wigner and Choi-Williams transformations in the methods of remote radio sensing of the geospace: autoref. thesis Ph.D. Kharkiv, 2012. 24 p.

7. Majkowski Andrzej, Kołodziej Marcin, Rak Remigiusz Joint Time-Frequency And Wavelet Analysis-An Introduction. *Metrology and Measurement Systems*. 2014. Volume 21. PP. 741-758. DOI: 10.2478/mms-2014-0054. URL: https://www.researchgate.net/publication/269463091_Joint_Time-Frequency_And_Wavelet_Analysis-An_Introduction

8. Kovaliv YE. O. Optyimizatsiya roboty hazoperekachuval'nykh ahrehativ z riznymy typamy pryvodiv. *Naftohazova enerhetyka*. 2007. №2 (3). S. 80-86. [in Ukrainian]

УДК 681.51

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-74-88

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПЕНСАТОРА ПЕРЕХРЕСНИХ ЗВ'ЯЗКІВ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

М. І. Горбійчук, Н. Т. Лазорів, М. І. Козутяк, А. М. Лазорів

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м.Івано-Франківськ, Україна, 76019, e-mail: gorb@nung.edu.ua*

Сучасні муфельні печі - універсальні нагрівальні пристрої, які використовують як для лабораторних досліджень, так і для нагрівання невеликих виробів. Конструктивною особливістю муфельних печей є наявність муфеля, який виготовляється з термостійкого матеріалу і розмежує робочий простір печі та зразок, що нагрівається.

Муфельна піч агрегат періодичної дії. Процеси нагріву в муфельній печі протікають в три стадії – нагрів печі до певної температури, робочий режим і охолодження. Перші дві стадії повинні виконуватись в автоматичному режимі і забезпечувати необхідну точність підтримування температури при реалізації другої стадії.

У даній роботі розглядається муфельна піч з двома нагрівниками (тенами), які мають два незалежні джерела живлення, що зумовлює два канали передачі впливів «потужність тена-температура в печі». Дослідження показали, що між входами і виходами об'єкта (муфельної печі) існують не тільки прямі, але й перехресні зв'язки, наявність яких значно ускладнює процес керування температурним режимом у муфельній печі. Для усунення негативної дії перехресних зв'язків у роботі синтезовано компенсатор та досліджено його динамічні властивості.

Отримана матрична передавальна функція компенсатора та знайдені її елементи у вигляді відношення двох поліномів, порядок яких визначається порядком передавальних функцій об'єкта.

Оскільки передавальні функції муфельної печі мають високий порядок, то розроблений метод декомпозиції, який дає змогу подати відповідні передавальні функції у вигляді паралельного з'єднання типових ланок першого і другого порядку. Зроблена декомпозиція значно спрощує перехід від неперервної моделі до дискретного її представлення в термінах z-перетворення.

Ключові слова: муфельна піч, перехресні зв'язки, компенсатор, передавальні функції, декомпозиція, z-перетворення, оцінка, точність.

Muffle furnaces are used to heat various small products to a given temperature. A design feature of muffle furnaces is the presence of a muffle, which is made of heat-resistant material and delimits the working space of the furnace and the heated sample.

Modern muffle furnaces are universal heating devices that are used both for laboratory research and for heating small products.

Muffle furnace unit of periodic action. Heating processes in a muffle furnace proceed in three stages - heating the furnace to a certain temperature, operating mode and cooling. The first two stages must be performed in automatic mode and ensure the necessary accuracy of temperature maintenance during the implementation of the second stage.

This work considers a muffle furnace with two heaters (thena), which have two independent power sources, which causes two channels of transmission of influences "thena power-temperature in the furnace". Studies have shown that between the inputs and outputs of the object (muffle furnace) there are not only direct, but also cross connections, the presence of which greatly complicates the process of controlling the temperature regime in the muffle furnace. In order to eliminate the negative effect of cross-connections, a compensator was synthesized in the work and its dynamic properties were investigated.

The matrix transfer function of the compensator was obtained and its elements were found in the form of a ratio of two polynomials, the order of which is determined by the order of the transfer functions of the object.

Since the transfer functions of the muffle furnace have a high order, a decomposition method has been developed, which makes it possible to present the corresponding transfer functions in the form of a parallel connection of typical links of the first and second order. The decomposition made greatly simplifies the transition from the continuous model to its discrete representation in terms of the z-transformation.

Key words: muffle furnace, cross couplings, compensator, transfer functions, decomposition, z-transform, evaluation, accuracy.

Вступ. У роботі [1] досліджені властивості муфельної печі, яка має два незалежних джерела живлення, та встановлено, що вона відноситься до класу багатомірних об'єктів. Характерною особливістю таких об'єктів є взаємовплив між вхідними і вихідними величинами, що значно ускладнює процес керування. При проектуванні систем автоматичного керування багатомірними об'єктами стараються в той чи інший спосіб ліквідувати або ослабити дію перехресних зв'язків. Цього можна добитись різними способами: за допомогою модального керування, з використанням методу динамічного програмування та за допомогою автономного керування. При використанні методу автономного керування багатомірним об'єктом основною задачею є синтез компенсатора, який покликаний «ліквідувати» перехресні зв'язки або значно зменшити їх вплив на якість процесу керування.

Аналіз літературних джерел. Проблема керування багатомірними об'єктами виникає в таких галузях промисловості як хімічна, нафтопереробна, харчова, енергетична, газова та в ін. Для керування такими об'єктами використовувались одноконтурні системи автоматичного регулювання методи синтезу проектування, яких ґрунтувались [2] на добре розробленому методі логарифмічних частотних характеристиках. При цьому важко було добитись задовільних показників якості процесу керування через внутрішні зв'язки між технологічними параметрами об'єкта. Виниклі труднощі були поштовхом до розвитку таких напрямків теорії керування як аналітичне конструювання регуляторів [3], модальне керування [4], H^∞ оптимізація [5] та аналітичні методи синтезу систем автоматичного керування [6, 7].

Методи аналітичного конструювання регуляторів та модального керування дають змогу синтезувати оптимальні керуючі дії, якщо модель об'єкта задана у просторі станів.

Метод аналітичного конструювання регуляторів та метод модального управління дають можливість синтезувати тільки пропорціональні регулятори.

У роботі [8] запропонований метод, названий авторами, керуванням по виходам і впливам, який реалізує розімкнену стратегію керування на відміну від принципу керування за відхиленням (за зворотним зв'язком).

Метод керування по виходам і впливам дає змогу за заданим розподілом нулів і полюсів системи отримати бажані показники якості процесу керування.

З іншої сторони неточності у математичному описі об'єкта та невраховані зовнішні впливи, які компенсуються в системах зі зворотним зв'язком, можуть значно погіршити кількісні показники якості процесу керування.

Майже в усіх методах синтезу систем керування багатомірними об'єктами вирішується задача знаходження так званої матриці узгодженості, призначення якої компенсація перехресних зв'язків, що дає змогу покращити якісні та кількісні показники процесу керування.

Метою роботи є синтез компенсатора перехресних зв'язків та обчислення параметрів матричної передавальної функції компенсатора.

Поставлена мета досягнута внаслідок розв'язання таких задач:

– за допомогою розробленого програмного забезпечення обчислити параметри матричної передавальної функції компенсатора;

– розробити спосіб декомпозиції передавальних функцій високого порядку та розробити методику представлення динамічних властивостей компенсатора в термінах z-перетворення;

– оцінити похибки, які виникають, при переході від аналогової до дискретної моделі компенсатора.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі розглядається тип муфельних печей, які мають два роздільних джерела живлення, що зумовлює наявність двох каналів передачі керуючих впливів, які породжують додаткові зв'язки, що значно погіршує якість керування такими об'єктами. Одним із способів зменшення взаємовпливу вхідних величин на регульовані вихідні величини є введення у контур системи керування компенсатора перехресних зв'язків,

призначення яких повністю ліквідувати або значно зменшити такі взаємовпливи.

Структурна схема компенсатора зображена [1] на рис. 1, а параметри передавальних функцій муфельної печі як об'єкта автоматичного керування вміщує табл. 1.

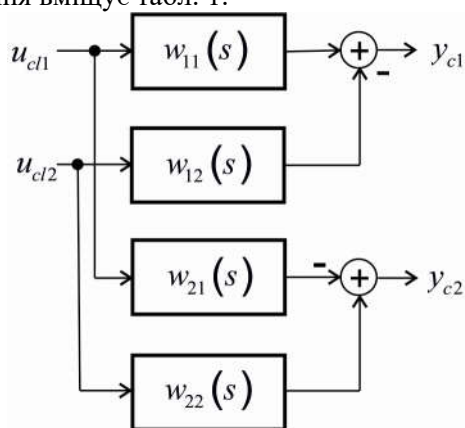


Рисунок 1 – Структурна схема компенсатора перехресних зв'язків

На рис. 1 u_{cl1} і u_{cl2} - вихідні сигнали регуляторів, а y_{c1} і y_{c2} - виходи компенсатора, які є командними сигналами, що поступають на об'єкт керування.

Передавальні функції компенсатора $w_{ij}(s)$, $i, j = 1, 2$ обчислюють [9] за такими формулами:

$$w_{11}(s) = \frac{W_{11}(s)W_{22}(s)}{\Delta(s)};$$

$$w_{12}(s) = -\frac{W_{12}(s)W_{22}(s)}{\Delta(s)};$$

$$w_{21}(s) = -\frac{W_{21}(s)W_{11}(s)}{\Delta(s)};$$

$$w_{22}(s) = \frac{W_{11}(s)W_{22}(s)}{\Delta(s)},$$

де $\Delta(s) = W_{11}(s)W_{22}(s) - W_{12}(s)W_{21}(s)$.

Можна показати [1], що порядки поліномів чисельників і знаменників передавальних функцій $w_{ij}(s)$, $i, j = 1, 2$ компенсатора мають однакові порядки і дорівнюють $2(3n-1)$, де n - порядок передавальних функцій $W_{ij}(s)$, $i, j = 1, 2$. Як випливає із табл. 1 всі передавальні функції об'єкта мають однакові порядки і $n = 3$.

Таблиця 1 – Параметри емпіричних моделей

Передавальні функції	k	Параметри чисельника ПФ			Параметри знаменника ПФ			
		b_0	b_1	b_2	a_0	a_1	a_2	a_3
$W_{11}(s)$	468.25	7828.23	97.77	1	559116.88	16854.16	206.53	1
$W_{12}(s)$	150.00	10401.34	136.80	1	1596016.46	34051.10	290.59	1
$W_{21}(s)$	459.25	7724.32	97.20	1	612374.61	17821.93	211.50	1
$W_{22}(s)$	172.88	9560.48	111.38	1	1133264.06	26531.02	254.91	1

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, отримані передавальні функції компенсатора перехресних зв'язків. Загальна структура передатної функції компенсатора має вигляд

$$w(s) = \frac{\sum_{i=1}^n b_i s^{n-i}}{\sum_{k=1}^n a_k s^{n-k}}. \quad (1)$$

Коефіцієнти у виразах (1) для відповідних каналних коректорів наведені у табл. 2 - табл.4.

Математичну модель компенсатора (рис. 1) запишемо у матрично-векторній формі

$$\begin{bmatrix} y_{c1}(s) \\ y_{c2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{cl1}(s) \\ u_{cl2}(s) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Із рівняння (1) знаходимо

$$y_{c1}(s) = w_{11}(s)u_{cl1}(s) + w_{12}(s)u_{cl2}(s),$$

$$y_{c2}(s) = w_{21}(s)u_{cl1}(s) + w_{22}(s)u_{cl2}(s).$$

Для лінійних систем справедливий принцип суперпозиції. Тому

$$y_{c1}(t) = y_{11}(t) + y_{12}(t), \quad (3)$$

$$y_{c2}(t) = y_{22}(t) + y_{21}(t), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{де } y_{11}(t) &= L^{-1} \left[w_{11}(s) u_{c1}(s) \right]; \\ y_{12}(t) &= L^{-1} \left[w_{12}(s) u_{c2}(s) \right]; \\ y_{22}(t) &= L^{-1} \left[w_{22}(s) u_{c2}(s) \right]; \\ y_{21}(t) &= L^{-1} \left[w_{21}(s) u_{c1}(s) \right]. \end{aligned}$$

Символом L^{-1} позначено зворотнє перетворення Лапласа.

На рис. 2 зображені графіки функцій $y_{c1}(t)$ і $y_{c2}(t)$, які побудовані за допомогою програмного забезпечення, створеного в середовищі MatLab. На всі входи компенсатора подавався одиничний стрибкоподібний сигнал. Тому $u_{c1}(s) = u_{c2}(s) = \frac{1}{s}$.

Таблиця 2 – Параметри коректора по каналу $w_{11}(s) = w_{22}(s)$

i,k	b_i	a_k	i,k	b_i	a_k
0	3.752e36	1.53e36	9	2.269e22	5.466e21
1	4.807e35	1.856e35	10	1.752e20	3.96e19
2	3.016e34	1.101e34	11	1.09e18	2.306e17
3	1.225e33	4.229e32	12	5.349e15	1.059e15
4	3.597e31	1.173e31	13	2.007e13	3.711e12
5	8.081e29	2.486e29	14	5.431e10	9.366e09
6	1.435e28	4.16e27	15	9.493e07	1.523e07
7	2.053e26	5.601e25	16	8.095e04	1.206e04
8	2.389e24	6.128e23			

Таблиця 3 – Параметри коректора по каналу $w_{12}(s)$

i,k	b_i	a_k	i,k	b_i	a_k
0	-1.597e36	4.367e36	9	- 8.863e21	8.489e21
1	- 2.057e35	4.912e35	10	- 6.688e19	5.778e19
2	- 1.291e34	2.711e34	11	- 4.055e17	3.163e17
3	- 5.224e32	9.704e32	12	- 1.938e15	1.365e15
4	- 1.523e31	2.514e31	13	- 7.064e12	4.492e12
5	-3.385e29	4.985e29	14	- 1.855e10	1.064e10
6	- 5.93e27	7.815e27	15	- 3.142e07	1.625e07
7	- 8.346e25	9.869e25	16	-25932	1.206e04
8	- 9.531e23	1.014e24			

Таблиця 4 – Параметри коректора по каналу $w_{21}(s)$

i,k	b_i	a_k	i,k	b_i	a_k
0	-8.053e36	8.267e35	9	- 5.447e22	4.262e21
1	- 1.039e36	1.05e35	10	- 4.273e20	3.203e19
2	- 6.58e34	6.511e33	11	- 2.699e18	1.934e17
3	- 2.702e33	2.609e32	12	- 1.346e16	9.205e14
4	- 8.03e31	7.541e30	13	- 5.123e13	3.341e12
5	-1.828e30	1.664e29	14	- 1.406e11	8.733e09
6	- 3.292e28	2.896e27	15	- 2.491e08	1.471e07
7	- 4.779e26	4.053e25	16	-2.15e05	1.206e04
8	- 5.647e24	4.605e23			

Компенсатори перехресних зв'язків з передавальними функціями $w_{ij}(s)$ можна реалізувати на цифрових спеціалізованих обчислювальних пристроях або промислових контролерах, але важливо при цьому,

забезпечити їхню адекватність аналоговому варіанту. Особливістю цифрових коректорів є представлення їх вхідних та вихідних сигналів у вигляді гратчастих функцій з постійним кроком дискретизації. З цією метою подамо

передавальні функції $w_{ij}(s)$ у термінах Z-перетворення.

Можливі декілька варіантів реалізації дискретних коректорів, які відрізняються структурами представлення передатних функцій для реалізації:

- пряма форма $w(z)$;
- каскадна (послідовна) структура

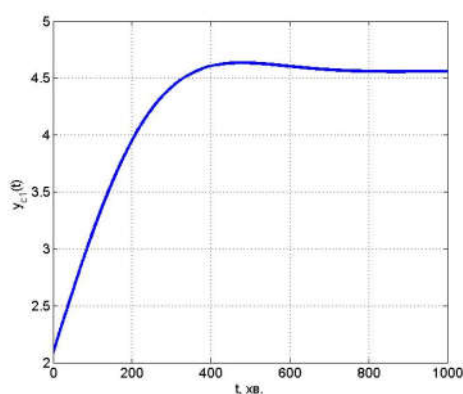
$w(z) = \prod_{k=1}^L H_k(z)$ з біквдратними секціями 2-го порядку $H_k(z)$. Секції утворюються після

попарного об'єднання за певними правилами полюсів та нулів $w(z)$;

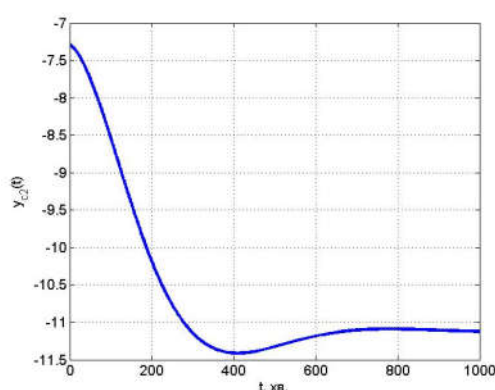
- паралельна структура

$w(z) = C + \sum_{k=1}^L H_k(z)$ з секціями $H_k(z)$ першого та другого порядку.

Секції утворюються після розкладу $w(s)$ на прості множники, з наступним переходом в Z-область та об'єднання комплексно-спряжених полюсів.



а)



б)

Рисунок 2 – Графіки залежностей $y_{c1}(t)$, а і $y_{c2}(t)$, б

Каскадна та паралельна структура представлення коректора (фільтра) мають практичне застосування при реальній реалізації на локальних контролерах в умовах обмеженої розрядності процесора. Вони забезпечують вищу точність при округленні коефіцієнтів, проміжних результатів обчислення та уникнення переповнення акумуляторів обчислення сум у порівнянні з прямою реалізацією. Розглянемо детальніше метод отримання паралельної структури передавальної функції дискретного коректора.

Оскільки передавальні функції компенсатора $w_{ij}(s)$, $i = j = 1, 2$ мають однакові структури, то в подальших викладках опускаємо індекси, які визначають належність відповідної передавальної функції до певного каналу передачі сигналу. Тому в подальшому будемо розглядати передавальну функцію $w(s)$ як відношення двох поліномів –

чисельника $R(s) = \sum_{j=0}^n b_j s^{n-j}$ і знаменника

$Q(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^{n-i}$, які мають однакові порядки n ($n=16$).

У тому випадку, коли передавальна функція – це відношення двох поліномів і $m=n$, де $m = \deg R(s)$ і $n = \deg Q(s)$, виділимо цілу частину відношення $\frac{R(s)}{Q(s)}$ і «залишок», який є

також відношенням двох поліномів. Отже,

$$w(s) = \left[\frac{R(s)}{Q(s)} \right] + \frac{\mathfrak{R}(s)}{Q(s)}, \quad (5)$$

де $\left[\frac{R(s)}{Q(s)} \right]$ - ціла частина відношення двох поліномів $\frac{R(s)}{Q(s)}$; $\mathfrak{R}(s)$ - поліном степені $n-1$, отриманий у результаті ділення.

Виконавши ділення полінома $R(s)$ на поліном $Q(s)$, прийшли до такого результату:

$$\left[\frac{R(s)}{Q(s)} \right] = \frac{b_0}{a_0}, \quad (6)$$

$$\mathfrak{R}(s) = \sum_{j=1}^n \left(b_j - \frac{b_0}{a_0} a_j \right) s^{n-j}. \quad (7)$$

Другий доданок у правій частині формули (5) розкладемо на прості множники, тобто

$$\frac{\mathfrak{R}(s)}{Q(s)} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{s-s_i}. \quad (8)$$

У формулі (8) r_i залишки, які для простих коренів s_i , $i = \overline{1, n}$ характеристичного полінома $Q(s)$, обчислюють за таким співвідношенням:

$$r_i = \lim_{s \rightarrow s_i} (s-s_i) \frac{\mathfrak{R}(s)}{Q(s)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Поліном $Q(s)$ запишемо як добуток простих множників

$$Q(s) = a_0 \prod_{k=1}^n (s-s_k),$$

де s_k - прості полюси передавальної функції, серед яких можуть бути комплексно-спряжені.

Отже, коефіцієнти r_i розкладу (8) можна обчислити за такою формулою:

$$r_i = \lim_{s \rightarrow s_i} (s-s_i) \frac{\mathfrak{R}(s)}{a_0 \prod_{k=1}^n (s-s_k)}, \quad i = \overline{1, n}.$$

$$\frac{b_0}{a_0} \sum_{j=1}^n a_j s_i^{n-j} = \frac{b_0}{a_0} \left(\sum_{j=1}^n a_j s_i^{n-j} + a_0 s_i^n - a_0 s_i^n \right) = \frac{b_0}{a_0} \left(\sum_{j=0}^n a_j s_i^{n-j} - a_0 s_i^n \right). \quad (13)$$

Поліном $Q(s)$ запишемо у такій формі:

$$Q(s) = a_0 (s-s_i) \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (s-s_k).$$

Тоді

$$r_i = \frac{\mathfrak{R}(s_i)}{a_0 \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (s_i-s_k)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Врахування формули (7) дає змогу вираз (10) подати у такому вигляді:

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left(b_j - \frac{b_0}{a_0} a_j \right) s_i^{n-j}}{a_0 \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (s_i-s_k)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Оскільки у виразах $w(s)$ і $\frac{\mathfrak{R}(s)}{Q(s)}$

одинакові знаменники, то формули для знаходження коефіцієнтів r_i від виразів $w(s)$ і $\frac{\mathfrak{R}(s)}{Q(s)}$ будуть відрізнятися лише чисельниками.

Тому візьмемо до уваги чисельник у формулі (5), який будемо обчислювати при значенні $s = s_i$

$$\mathfrak{R}(s) = \sum_{j=1}^n \left(b_j - \frac{b_0}{a_0} a_j \right) s_i^{n-j}.$$

Враховуючи те, що операція взяття суми - лінійна операція, будемо мати

$$\mathfrak{R}(s) = \sum_{j=1}^n b_j s_i^{n-j} - \frac{b_0}{a_0} \sum_{j=1}^n a_j s_i^{n-j}. \quad (12)$$

Другий доданок, у правій частині формули (12), подамо у такому вигляді:

Оскільки s_i – корінь рівняння $Q(s) = 0$, то $Q(s_i) = \sum_{j=0}^n a_j s_i^{n-j} = 0$. Враховуючи останню обставину, вираз (13) набуде такого значення:

$$\frac{b_0}{a_0} \sum_{j=1}^n a_j s_i^{n-j} = -b_0 s_i^n.$$

Підстановка отриманого значення для виразу $\frac{b_0}{a_0} \sum_{j=1}^n a_j s_i^{n-j}$ у формулу (12), дає такий результат:

$$\Re(s) = \sum_{j=1}^n b_j s_i^{n-j} + b_0 s_i^n = \sum_{j=0}^n b_j s_i^{n-j}.$$

Отримане значення $\Re(s)$ підставимо у вираз (10). У результаті отримаємо

$$r_i = \frac{\sum_{j=0}^n b_j s_i^{n-j}}{a_0 \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (s_i - s_k)}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Таким чином, отримуємо таку формулу для розкладу передавальної функції $w(s)$ для випадку, коли $\deg R(s) = \deg Q(s) = n$:

$$w(s) = r_0 + \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{s - s_i}, \quad (15)$$

де $r_0 = \frac{b_0}{a_0}$; r_i обчислюється за формулою (14).

На відміну від MatLab residue-функції, яка заснована на діленні полінома чисельника на поліном знаменника з наступним виділенням залишку $\frac{\Re(s)}{Q(s)}$, до якого застосовують процедуру обчислень r_i за формулою (9), розроблений алгоритм не вміщує операції ділення полінома $R(s)$ на $Q(s)$.

Формулу (15) запишемо у такому еквівалентному вигляді:

$$r_i = \lim_{s \rightarrow s_i} (s - s_i) w(s), \quad i = \overline{1, n}. \quad (16)$$

Як впливає із рис. 2 функції $y_{c1}(t)$ і $y_{c2}(t)$ мають коливний згасаючий характер.

Це означає, що серед полюсів передавальної функції $w(s)$ є комплексно-спряжені.

Допустимо, що серед полюсів передавальної функції $w(s)$ є n_r дійсних коренів, а $n - n_r$ - це комплексно-спряжені корені.

Як показує рис. 2 сигнали на виході компенсатора з плином часу прямують до постійного значення. Це означає, дійсні частин полюсів передавальної функції $w(s)$ є від'ємними числами (полюси функції $w(s)$ є лівими).

У випадку комплексно-спряжених полюсів, як це впливає із формули (14), коефіцієнти розкладу r_i , $i = \overline{1, n - n_r}$ також будуть комплексно-спряженими.

Позначимо дійсні корені полінома $Q(s)$ через $s_j = -\sigma_j$, $j = \overline{1, n_r}$, а для комплексно-спряжених введемо такі позначення: $s_i = -\alpha_i \pm j\beta_i$, $i = \overline{1, (n - n_r)/2}$. Тоді $r_i = \eta_i \pm j\mu_i$, $i = \overline{1, (n - n_r)/2}$.

З врахуванням значень полюсів s_k і s_i та формули (16), отримаємо

$$r_j = \lim_{s \rightarrow -\sigma_j} (s - s_j) w(s), \quad j = \overline{1, n_r}, \quad (17)$$

$$r_i = \lim_{s \rightarrow -\alpha_i + j\beta_i} (s - s_i) w(s) + \lim_{s \rightarrow -\alpha_i - j\beta_i} (s - s_i) w(s), \quad i = \overline{1, (n - n_r)/2}. \quad (18)$$

Якщо прийняти до уваги формули (17) і (18), то вираз (15) набуде такого значення:

$$w(s) = r_0 + \sum_{j=1}^{n_r} \frac{r_j}{s + \sigma_j} + \sum_{i=1}^{(n-n_r)/2} \frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i}. \quad (19)$$

У формулі (19) кожний доданок слід розглядати як деяку передавальну функцію, для яких знайдемо Z – перетворення за умови, що на вході кожного із елементів, як описуються передавальними функціями $w_j(s)$, $k = \overline{1, n_r}$ і $w_i(s)$, $i = \overline{1, (n - n_r)/2}$, розміщений фіксатор нульового порядку.

Нехай $w(s)$ передавальна функція, яка задана як відношення двох поліномів $R(s)$ і $Q(s)$, і має місце таке співвідношення: $\deg(R(s)) \leq \deg(Q(s))$. Тоді [10]

$$w(z) = (1 - z^{-1}) \sum_{k=1}^{n_p} \text{Res} \left[\frac{w(s)}{s} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1} e^{st_0}} \right]_{s=s_k}, \quad (20)$$

де n_p – кількість коренів рівняння $sQ(s) = 0$.

Співвідношення (19) показує, що рівняння $sQ(s) = 0$ має тільки один простий корінь $s_1 = 0$. Знайдемо лишок для значення $s_1 = 0$. Отже,

$$\text{Res} \left[\frac{w(s)}{s} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1} e^{st_0}} \right]_{s=0} = \lim_{s \rightarrow 0} w(s) \cdot \frac{1}{1 - z^{-1} e^{st_0}} = \frac{w(0)}{1 - z^{-1}}$$

З врахуванням отриманого результату формула (20) набуде такого вигляду:

$$w(z) = w(0) + (1 - z^{-1}) \sum_{k=1}^{n_p-1} \text{Res} \left[\frac{w(s)}{s} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1} e^{st_0}} \right]_{s=s_k}. \quad (21)$$

Використовуючи формулу (21), знайдемо

$$Z \left[\frac{r_j}{s + \sigma_j} \right] = \frac{r_j (1 - \theta_j) z^{-1}}{\sigma_j (1 - \theta_j z^{-1})}, \quad (22)$$

$$Z \left[\frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i} \right] = \frac{\eta_i - j\mu_i}{\alpha_i + j\beta_i} + \frac{\eta_i + j\mu_i}{\alpha_i - j\beta_i} + (1 - z^{-1}) \left[\frac{\eta_i + j\mu_i}{(-\alpha_i + j\beta_i)(1 - (\varphi_{i,1} + j\varphi_{i,2})z^{-1})} + \frac{\eta_i - j\mu_i}{(-\alpha_i - j\beta_i)(1 - (\varphi_{i,1} - j\varphi_{i,2})z^{-1})} \right]. \quad (24)$$

Після виконання необхідних арифметичних операцій над правою частиною рівності (24), отримаємо такий результат:

$$Z \left[\frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i} \right] = 2\eta_i \left[\frac{\pi_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2} + (1 - z^{-1}) \frac{-\pi_i + \left(a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} + a_{1,i} \right) z^{-1}}{(-\alpha_i + a_{1,i} z^{-1})^2 + (\beta_i + a_{2,i} z^{-1})^2} \right], \quad (25)$$

$$i = 1, (n - n_r)/2,$$

де $a_{1,i} = \alpha_i \varphi_{i,1} + \beta_i \varphi_{i,2}$; $a_{2,i} = \alpha_i \varphi_{i,2} - \beta_i \varphi_{i,1}$,
 $\pi_i = \alpha_i - \frac{\mu_i}{\eta_i} \beta_i$.

де $\theta_j = e^{-\sigma_j t_0}$; t_0 – час дискретності.

У відповідності з формулою (19) та, враховуючи значення $r_i = \eta_i \pm j\mu_i$, $i = 1, (n - n_r)/2$, $s_1 = -\alpha_i + j\beta_i$ і $s_2 = -\alpha_i - j\beta_i$, де $\alpha_i \geq 0$, $\beta_i > 0$, маємо

$$\frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i} = \frac{\eta_i + j\mu_i}{s - (-\alpha_i + j\beta_i)} + \frac{\eta_i - j\mu_i}{s - (-\alpha_i - j\beta_i)}, \quad i = 1, (n - n_r)/2. \quad (23)$$

У формулі (22) знайдемо Z – перетворення від кожного доданку. За формулою (21) знаходимо Z – перетворення від першого

$$Z \left[\frac{\eta_i + j\mu_i}{s - (-\alpha_i + j\beta_i)} \right] = \left[\frac{\eta_i + j\mu_i}{\alpha_i - j\beta_i} + (1 - z^{-1}) \frac{\eta_i + j\mu_i}{(-\alpha_i + j\beta_i)(1 - (\varphi_{i,1} + j\varphi_{i,2})z^{-1})} \right]$$

і від другого доданків

$$Z \left[\frac{\eta_i - j\mu_i}{s + \alpha_i + j\beta_i} \right] = \left[\frac{\eta_i - j\mu_i}{\alpha_i + j\beta_i} + (1 - z^{-1}) \frac{\eta_i - j\mu_i}{(-\alpha_i - j\beta_i)(1 - (\varphi_{i,1} - j\varphi_{i,2})z^{-1})} \right],$$

де $\varphi_{i,1} = \theta_{i,1} \cos(\beta_i t_0)$; $\varphi_{i,2} = \theta_{i,1} \sin(\beta_i t_0)$;
 $\theta_{1,i} = e^{-\alpha_i t_0}$.

Враховуючи лінійність Z – оператора, маємо

Після виконання очевидних арифметичних дій над правою частиною формули (25) та враховуючи прийняті позначення, отримаємо

$$Z \left[\frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i} \right] = \frac{2\eta_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \cdot \frac{\left(a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} + a_{1,i} + (1 - 2\varphi_{i,1}) \pi_i \right) z^{-1} + \left(\theta_{1,i}^2 \pi_i - a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} - a_{1,i} \right) z^{-2}}{1 - 2\varphi_{i,1} z^{-1} + \theta_{1,i}^2 z^{-2}}. \quad (26)$$

З врахуванням формул (22) вираз (26) буде таким:

$$w(z) = r_0 + \sum_{k=1}^{n_r} \frac{r_k}{\sigma_k} \cdot \frac{(1 - \theta_k) z^{-1}}{1 - \theta_k z^{-1}} + 2 \sum_{i=1}^{(n-n_r)/2} \frac{\eta_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \cdot \frac{\left(a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} + a_{1,i} + (1 - 2\varphi_{i,1}) \pi_i \right) z^{-1} + \left(\theta_{1,i}^2 \pi_i - a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} - a_{1,i} \right) z^{-2}}{1 - 2\varphi_{i,1} z^{-1} + \theta_{1,i}^2 z^{-2}}. \quad (27)$$

Тоді передавальна функція (27) буде такою:

$$w(z) = V_1(z) + \sum_{j=1}^{n_r} V_j^{(2)} + \sum_{i=n_r+1}^{(n+n_r)/2} V_i^{(3)}. \quad (28)$$

Формула (28) дає змогу створити структурну схему передачі сигналу по каналу з передавальною функцією $w(z)$ (рис.3).

Для передавальної функції $w(z)$ можна записати таку рівність:

$$y(z) = w(z) u_{cl}(z),$$

де $u_{cl}(z)$ – вхідний сигнал структури, зображеної на рис. 3.

Аналогічні співвідношення можна записати для кожного елемента структури (рис. 3). Отже,

$$y_1(z) = V_1(z) u_{cl}(z),$$

$$y_3(z) = 2u_{cl}(z) \sum_{i=1}^{(n-n_r)/2} \frac{\eta_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \cdot \frac{\left(a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} + a_{1,i} + (1 - 2\varphi_{i,1}) \pi_i \right) z^{-1} + \left(\theta_{1,i}^2 \pi_i - a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} - a_{1,i} \right) z^{-2}}{1 - 2\varphi_{i,1} z^{-1} + \theta_{1,i}^2 z^{-2}}. \quad (31)$$

Оскільки на вході кожної передавальної функції $w_j(z)$ і $w_i(z)$ (рис. 3) діє сигнал $u_{cl}(z)$, то на виході отримуємо реакцію

$$y_i(z) = \frac{\eta_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \cdot \frac{\left(a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} + a_{1,i} + (1 - 2\varphi_{i,1}) \pi_i \right) z^{-1} + \left(\theta_{1,i}^2 \pi_i - a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} - a_{1,i} \right) z^{-2}}{1 - 2\varphi_{i,1} z^{-1} + \theta_{1,i}^2 z^{-2}} u_{cl}(z), \quad i = \overline{1, (n-n_r)/2}. \quad (33)$$

Для цифрових систем керування є справедливим принцип суперпозиції [10]. Тому мають місце такі співвідношення (рис. 3):

$$y_2(z) = u_{cl}(z) \sum_{j=1}^{n_r} V_j^{(2)}(z),$$

$$y_3(z) = u_{cl}(z) \sum_{i=n_r+1}^{(n+n_r)/2} V_i^{(3)}(z).$$

Якщо врахувати значення $V_1(z)$, $V_k^{(2)}(z)$ і $V_i^{(3)}(z)$, то отримуємо:

$$y_1(z) = r_0 u_{cl}(z), \quad (29)$$

$$y_2(z) = u_{cl}(z) \sum_{j=1}^{n_r} \frac{r_j}{\sigma_j} \frac{(1 - \theta_j) z^{-1}}{1 - \theta_j z^{-1}}, \quad (30)$$

$y_j(z)$ і $y_i(z)$ відповідного елемента. Тому можемо записати

$$y_j(z) = \frac{r_j}{\sigma_j} \cdot \frac{(1 - \theta_j) z^{-1}}{1 - \theta_j z^{-1}} u_{cl}(z), \quad j = \overline{1, n_r}, \quad (32)$$

$$y_2(z) = \sum_{j=1}^{n_r} y_j(z), \quad (34)$$

$$y_3(z) = \sum_{i=1}^{(n-n_r)/2} y_i(z). \quad (35)$$

Для співвідношення (33) введемо такі позначення:

$$K_{\eta_i} = \frac{\eta_i}{\alpha_i^2 + \beta_i^2},$$

$$b_{1,i} = a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} + a_{1,i} + (1 - 2\varphi_{i,1})\pi_i,$$

$$b_{2,i} = \theta_{1,i}^2 \pi_i - a_{2,i} \frac{\mu_i}{\eta_i} - a_{1,i}.$$

Тоді (33) набуде такого вигляду:

$$y_i(z) = K_{\eta_i} \cdot \frac{b_{1,i}z^{-1} + b_{2,i}z^{-2}}{1 - 2\varphi_{i,1}z^{-1} + \theta_{1,i}^2z^{-2}} u_{cl}(z), \quad i = \overline{1, (n - n_r) / 2}. \quad (36)$$

Формулу (35) подамо у такому вигляді:

$$(1 - 2\varphi_{i,1}z^{-1} + \theta_{1,i}^2z^{-2})y_i(z) = K_{\eta_i}(b_{1,i}z^{-1} + b_{2,i}z^{-2})u_{cl}(z) \quad (37)$$

Подібний вираз запишемо і для формули (32)

$$\sigma_j(1 - \theta_jz^{-1})y_j(z) = r_j(1 - \theta_j)z^{-1}u_{cl}(z). \quad (38)$$

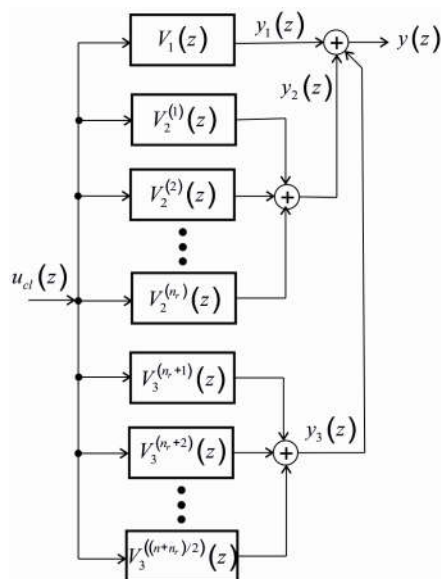


Рисунок 3 – Структурна схема передавальної функції $w(z)$

Якщо прийняти до уваги теорему про зсув за часом вправо [9, 11], то рівняння (37) і (38) трансформуються у такі вирази:

$$\sigma_j y_j(kt_0) - \sigma_j \theta_j y_j((k-1)t_0) = r_j(1 - \theta_j)u_{cl}((k-1)t_0), \quad j = \overline{1, n_r}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (39)$$

$$y_i(kt_0) - 2\varphi_{i,1}y_i((k-1)t_0) + \theta_{1,i}^2y_i((k-2)t_0) = K_{\eta_i}(b_{1,i}u_{cl}((k-1)t_0) + b_{2,i}u_{cl}((k-2)t_0)), \quad i = \overline{1, (n - n_r) / 2}, \quad k = 2, 3, 4, \dots \quad (40)$$

Початкові умови для рівнянь (39) і (40) будуть такими:

$$y_j(0) = 0, \quad j = \overline{1, n_r},$$

$$y_i(0) = 0, \quad y_i(t_0) = 0.$$

Рівняння (39) і (40) дають змогу отримати рекурентну процедуру для обчислення ординат функцій $y_j(kt_0)$ і $y_i(kt_0)$ в дискретні моменти часу kt_0 , $k = 0, 1, 2, \dots$. Для отримання такої процедури, рівняння (39) і (40) розв'яжемо відносно функцій $y_j(kt_0)$ і $y_i(kt_0)$, тобто

$$y_j(kt_0) = \frac{r_j}{\sigma_j}(1 - \theta_j)u_{cl}((k-1)t_0) + \theta_j y_j((k-1)t_0), \quad j = \overline{1, n_r}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (41)$$

$$y_i(kt_0) = K_{\eta_i}(b_{1,i}u_{cl}((k-1)t_0) + b_{2,i}u_{cl}((k-2)t_0)) + 2\varphi_{i,1}y_i((k-1)t_0) - \theta_{1,i}^2y_i((k-2)t_0), \quad i = \overline{1, (n - n_r) / 2}, \quad k = 2, 3, 4, \dots \quad (42)$$

Таким чином, сигнал на виході структури (рис. 3) буде таким:

$$y(kt_0) = y_1(kt_0) + \sum_{j=1}^{n_r} y_j(kt_0) + 2 \sum_{i=1}^{(n-n_r)/2} y_i(kt_0), \quad (43)$$

де $y_j(kt_0)$ і $y_i(kt_0)$ обчислюють за допомогою рекурентних процедур (36) і (37).

Реалізацію рекурентних процедур (39) і (40) розглянемо на прикладі передавальної функції $w_{12}(s) \cdot (t_0 = 10c)$.

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, обчислені значення ординат $y_j(kt_0)$ і $y_i(kt_0)$ в дискретні моменти часу kt_0 , $k = 0, 1, 2, \dots$ з використанням рекурентних процедур (41) і (42) при одиничному стрибкоподібному значенні $u_{cl}(kt_0)$. Значення $y(kt_0)$, яке відповідає дискретній передавальній функції $w_{11}(z)$, обчислені за формулою (43) (рис. 4).

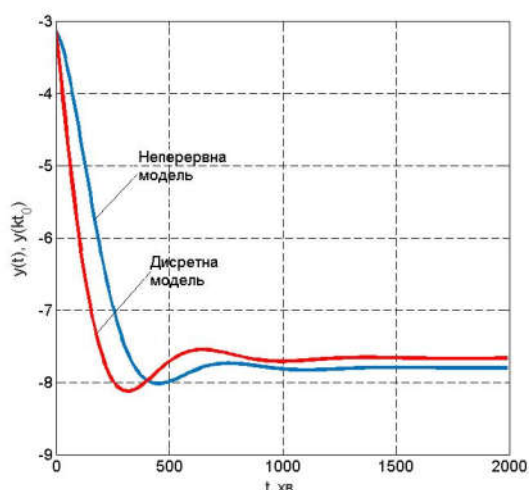


Рисунок 4 – Графіки залежностей $y(t)$ і $y(kt_0)$, побудовані для передавальної функції

$w_{11}(s)$ компенсатора

На рис. 4 також зображений графік залежності $y(t) = L^{-1}\left[\frac{w_{11}(s)}{s}\right]$, який отриманий

як зворотне перетворення Лапласа від функції $Y(s) = w_{11}(s)U_{cl}(s)$, де $U_{cl}(s) = \frac{1}{s}$.

$$a_{0,i} \frac{d^2 y_{3,i}(t)}{dt^2} + a_{1,i} \frac{dy_{3,i}(t)}{dt} + a_{2,i} y_{3,i}(t) = b_{i,0} \frac{du_{cl}(t)}{dt} + b_{i,1} u_{cl}(t). \quad (45)$$

Будемо обчислювати наближено першу і другу похідні. Маємо

$$\frac{dy_{3,i}(t)}{dt} \approx \frac{1}{t_0} (y_{3,i}(t) - y_{3,i}(t - t_0)). \quad (46)$$

За визначенням другої похідної

$$\frac{d^2 y_{3,i}(t)}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy_{3,i}(t)}{dt} \right).$$

Якщо врахувати (4.44), то

$$\frac{d^2 y_{3,i}(t)}{dt^2} \approx \frac{1}{t_0} \left(\frac{dy_{3,i}(t)}{dt} - \frac{dy_{3,i}(t - t_0)}{dt} \right).$$

Наближене значення $\frac{dy_{3,i}(t)}{dt}$ знаходиться

за формулою (46), а для обчислення $\frac{dy_{3,i}(t - t_0)}{dt}$ у виразу (46) t слід замінити на t_0 .

У результаті отримаємо

Аналіз отриманих результатів показує, що функції $y(t)$ і $y(kt_0)$ не співпадають в точках kt_0 . Для виявлення природи такої розбіжності розглянемо передавальну функцію

$$V_i^{(3)}(s) = \frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i}.$$

Оскільки $r_i = \mu_i \pm j\eta_i$, то

$$V_i^{(3)}(s) = \frac{r_i}{s + \alpha_i \mp j\beta_i} = 2\eta_i \frac{s + \pi_i}{(s + \alpha_i)^2 + \beta_i^2}.$$

Передавальну функцію подамо у такому вигляді:

$$V_i^{(3)}(s) = \frac{b_{i,0}s + b_{i,1}}{a_{0,i}s^2 + a_{1,i}s + a_{2,i}}, \quad (44)$$

де $b_{i,0} = 2\eta_i$; $b_{i,1} = 2\eta_i\pi_i$; $a_{0,i} = 1$; $a_{1,i} = 2\alpha_i$; $a_{2,i} = \alpha_i^2 + \beta_i^2$.

Перейдемо від передавальної функції (44) до диференціального рівняння (при нульових початкових умовах). Отже,

$$\frac{d^2 y_{3,i}(t)}{dt^2} \approx \frac{1}{t_0^2} (y_{3,i}(t) - 2y_{3,i}(t - t_0) + y_{3,i}(t - 2t_0)).$$

За аналогією (45) маємо

$$\frac{du_{cl}(t)}{dt} \approx \frac{1}{t_0} (u_{cl}(t) - u_{cl}(t - t_0)).$$

При переході до дискретного часу $t = kt_0$ отримаємо такі співвідношення:

$$\frac{dy_{3,i}(t)}{dt} \approx \frac{1}{t_0} (y_{3,i}(kt_0) - y_{3,i}((k-1)t_0)), \quad (47)$$

$$\frac{d^2 y_{3,i}(t)}{dt^2} \approx \frac{1}{t_0^2} (y_{3,i}(kt_0) - 2y_{3,i}((k-1)t_0) + y_{3,i}((k-2)t_0)), \quad (48)$$

$$\frac{du_{cl}(t)}{dt} \approx \frac{1}{t_0} (u_{cl}(kt_0) - u_{cl}((k-1)t_0)). \quad (49)$$

Нехай E оператор зміщення вліво [13]. Тоді $y((k-1)t_0) = Ey(kt_0)$, $y((k-2)t_0) = E^2 y(kt_0)$ і

$u_{cl}((k-1)t_0) = E_r u_{cl}(kt_0)$. Застосуємо оператор зміщення вліво E (E_r) до виразів (46) – (18). У результаті отримаємо

$$\frac{dy_{3,i}(t)}{dt} \approx \frac{1}{t_0}(1-E)y_{3,i}(kt_0), \quad (50)$$

$$\left(\frac{a_{0,i}}{t_0^2}(1-E)^2 + \frac{a_{1,i}}{t_0}(1-E) + a_{2,i} \right) y_{3,i}(kt_0) = \left(\frac{b_{i,0}}{t_0}(1-E_r) + b_{i,1} \right) u_{cl}(kt_0). \quad (53)$$

При стрибкоподібній вхідній величині $u_{cl}((k-j_1)t_0) = 1(kt_0)$, $j_1 = 0, 1$
 $u_{cl}(kt_0) = u_{cl}((k-1)t_0)$, $\forall k$. Із (4.48) випливає, що $u_{cl}(kt_0) - u_{cl}((k-1)t_0) = 0$ і відповідно $(1-E_r)u_{cl}(kt_0) = 0$, тобто $E_r = 1$, $\forall k$.

Отже, при постійному значенні $u_{cl}(kt_0)$, всі значення $(1-E_r)u_{cl}(kt_0)$, в рівнянні (53) набудуть нульових значень.

Таким чином, наявність у правій рівняння (40) лівого зсуву, який визначається оператором E_r , при використанні рекурентного співвідношення (42) для обчислення ординат функції $y_i(kt_0)$ за умови, що $u_{cl}(kt_0) = 1(kt_0)$, приводить до втрати частини інформації. Як і раніше, у подальших викладках будемо опускаєти індекси, які ідентифікують канали передачі сигналів. Отже, передавальній функції $w(s)$ поставимо у відповідність диференціальне рівняння n -го порядку

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_n \frac{d^n u(t)}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} u(t)}{dt^{n-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t),$$

яке замінимо еквівалентною системою диференціальних рівнянь першого порядку [13], тобто

$$\begin{aligned} \frac{dx_i(t)}{dt} &= x_{i+1}(t) + \beta_i u(t), \quad i = \overline{1, n-1}, \\ \frac{dx_n(t)}{dt} &= -\frac{1}{a_n} \sum_{j=1}^n a_{j-1} x_j(t) + \beta_n u(t), \quad (54) \\ y(t) &= x_1(t) + \beta_0 u(t). \end{aligned}$$

$$\frac{d^2 y_{3,i}(t)}{dt^2} \approx \frac{1}{t_0^2} (1-E)^2 y_{3,i}(kt_0), \quad (51)$$

$$\frac{du_{cl}(t)}{dt} \approx \frac{1}{t_0} (1-E_r) u_{cl}(kt_0). \quad (52)$$

Після підстановки (50) – (52) в (45), будемо мати

$$\left(\frac{a_{0,i}}{t_0^2}(1-E)^2 + \frac{a_{1,i}}{t_0}(1-E) + a_{2,i} \right) y_{3,i}(kt_0) = \left(\frac{b_{i,0}}{t_0}(1-E_r) + b_{i,1} \right) u_{cl}(kt_0). \quad (53)$$

Система рівнянь (54) вміщує невідомі коефіцієнти β_i , $i = \overline{0, n}$, які знаходять як розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{j=i}^n a_j \beta_{j-i} = b_i, \quad i = \overline{0, n}. \quad (55)$$

Для компактного запису системи рівнянь (31) використаємо матрично-векторну форму. Тоді

$$A_\beta \bar{\beta} = \bar{b}, \quad (56)$$

де

$$A_\beta = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & a_n \\ a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n & 0 \\ a_2 & a_3 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n-1} & a_n & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_n & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}.$$

Очевидно, що матриця A_β є квадратною матрицею розміром $n \times n$. Тому із рівняння (54) визначимо

$$\bar{\beta} = A_\beta^{-1} \bar{b}.$$

У матрично-векторній формі система рівнянь (54) буде такою:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}(t)}{dt} &= A\bar{x}(t) + \bar{\beta}_r u(t), \quad (57) \\ y(t) &= \bar{c}^T \bar{x}(t) + \beta_0 u(t), \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_0}{a_n} & \frac{a_1}{a_n} & \frac{a_2}{a_n} & \dots & \frac{a_{n-1}}{a_n} \end{bmatrix}, \bar{\beta}_r = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \dots \\ \beta_n \end{bmatrix},$$

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}, \bar{c} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Якщо використати оператор зсуву назад, то

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = \frac{\bar{x}(kt_0) - \bar{x}((k-1)t_0)}{t_0}. \quad (58)$$

Наближення (56) дає змогу рівняння (55) записати у такому вигляді:

$$\frac{\bar{x}(kt_0) - \bar{x}((k-1)t_0)}{t_0} = A\bar{x}((k-1)t_0) + \bar{\beta}_r u((k-1)t_0), \quad (59)$$

$$y(kt_0) = x_1(kt_0) + \beta_0 u(kt_0). \quad (60)$$

Співвідношення (59) і (60) дають змогу отримати рекурентну процедуру обчислення ординат різницевого рівняння

$$\bar{x}(kt_0) = \bar{x}((k-1)t_0) + t_0 (A\bar{x}((k-1)t_0) + \bar{\beta}_r u((k-1)t_0)) \quad (61)$$

$$y(kt_0) = x_1(kt_0) + \beta_0 u(kt_0), \quad (62)$$

де $\bar{x}(0) = 0$, $k = 1, 2, \dots$.

Співвідношення (61) і (62) утворюють ітераційний процес, за допомогою якого можна обчислити ординати вихідної величини

компенсатора за відповідним каналом передачі сигналу.

Слід відмітити, що точність обчислення ординат функції $y(kt_0)$ залежить від кроку дискретності t_0 , який повинен бути значно меншим від ніж тривалість перехідного процесу.

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, за формулами (61) і (62) були обчислені значення ординат компенсатора за кожним каналом передачі сигналів при одиничних вхідних величинах. Крок дискретності був таким: $t_0 = 0,5$ с. Крім того обчислені значення $y_{c1}(t)$ і $y_{c2}(t)$ за формулами (2) і (3). Результат таких обчислень ілюструє рис. 5.

Для оцінки похибки дискретизації за рекурентними співвідношеннями (61) і (62) обчислювались максимальні різниці між величинами $y_{c1}(t)$ і $y_{c1}(kt_0)$ та $y_{c2}(t)$ і $y_{c2}(kt_0)$ за такими формулами:

$$Er_i = \max |y_{ci}(t) - y_{ci}(kt_0)|, \quad i = 1, 2. \quad (63)$$

У результаті обчислень за формулами (63) отримали такі результати:

Максимальна похибка по каналу ус1
 $Er1 = 3.7201e-03$

Максимальна похибка по каналу ус2
 $Er2 = 6.6569e-03$

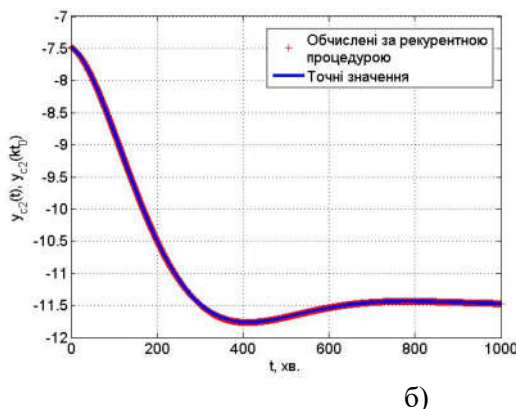
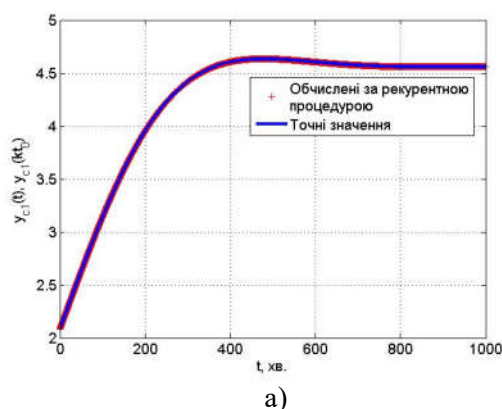


Рисунок 5 – Порівняння точних і дискретних значень вихідних величин компенсатора

Слід зазначити, що похибки Er_i , $i = 1, 2$ залежать від кроку дискретності t_0 : зі збільшення значення t_0 збільшуються і похибки Er_i дискретизації. Як показує аналіз отриманих результатів похибка дискретизації залежить не тільки від значення t_0 , але й від характеру зміни залежностей $y_{c1}(t)$ і $y_{c2}(t)$. Чим ближче такі залежності до аперіодичного процесу, тим менша похибка дискретизації. З рис. 5 видно, що $y_{c1}(t)$ (рис. 5,а) має значно менше виражений коливний характер ніж залежність $y_{c2}(t)$ (рис. 5,б). Тому $Er_2/Er_1 = 1,79$.

Висновки. 1. Для синтезованого компенсатора перехресних зв'язків обчислені параметри матричної передавальної функції компенсатора. Показано, що для багатовимірного об'єкта керування, у якого порядок чисельника на одиницю менший від знаменника передавальна функція відповідного каналу «вхід-вихід», передавальні функції компенсатора мають порядок $2(3n - 1)$.

2. Методом декомпозиції передавальної функції високого порядку отримана структурна схема, яка вміщує елементи, які визначеним способом з'єднані між собою. Кожний із елементів структури має нижчий порядок ніж початкова передавальна функція, що дає змогу реалізувати компенсатор перехресних зв'язків за допомогою контролерів.

3. Визначені похибки апроксимації при переході від неперервної передавальної функції до дискретного її аналогу. Встановлено, що похибка апроксимації залежить від характеру перехідного процесу. Чим ближче перехідний процес за своїми властивостями до аперіодичного, тим менша похибка апроксимації.

Список використаних джерел

1. Горбійчук М. І., Лазорів Н. Т., Лазорів А. М. Автономна система автоматичного керування температурним режимом муфельної печі. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: матеріали наук.-практ. конф., (м. Івано-Франківськ, 13 жовт., 2022). Івано-Франківськ, 2022. С. 42 – 44.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1WqQ2msGllAbwQ4WsE-Yruxd1keUxCTad/view> (дата звернення: 19.11.2022).

2. Штіфзон О. Й., Новіков В. П., Бунь В. П. Теорія автоматичного управління: навчальний посібник. К.: КПІ ім. І. Сікорського. 2020. 144 с.

3. Levin J. J. On the matrix Riccati equation. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 10. 1959. Pp. 519–524.

4. Ray W. *Advanced Process Control*. New York: McGraw-Hill Book, Company, 1981. 368 p

5. Kuster George E. H-infinity Norm Calculation via a State Space Formulation. URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49544/Kuster_GE_T_2013.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (Дата звернення 26.09.2022)

6. Gaiduk A.R. Synthesis of control systems of multivariable objects. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 1998. Vol. 37, № 1. P. 5–13.

7. Gaiduk A.R., Vershinin Y.A., Jawaid A. A method of synthesis of a multivariable system with decoupled and interconnected channels // *Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Houston, TX, 2003. Pp. 548–552.

8. Gorbiychuk M. I., Povarchuk D. D., Humeniuk T. V., Lazoriv N. T. Development of the imitation model of the two-stage separation process of oil. *Earsten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № ½ (92). P. 20 – 27.

9. Isermann R. *Digital Control Systems*. Berlin: Springer-Vtrlag, 1980. 541 p.

10. Goodwin G. C., Graebe S. F., Saldago M. E. *Control Systems Design*. Prentice Hall, 2000. 944 p.

11. Tou Julius T. *Digital and Sampled-data Control Systems*. New York: McGraw-Hill Book Company, INC, 1960. 694 p.

12. Горбійчук М. І., Лазорів Н. Т. Дискретизація математичних моделей лінійних об'єктів керування. *Journal Věda a perspektivy* 2022. № 1. P. 241-254.

13. Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ: навч. посібник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 409 с.

References

1. Horbiychuk M. I., Lazoriv N. T., Lazoriv A. M. Avtonomna systema avtomatychnoho keruvannya temperaturnym rezhymom mufel'noyi pechi. Informatsiyni tekhnolohiyi v osviti, tekhnitsi ta promyslovosti: materialy nauk.-prakt. konf., (m. Ivano-Frankivsk, 13 zhovt., 2022). Ivano-Frankivsk, 2022. S. 42 – 44.

Ivano-Frankivs'k, 13 zhovt., 2022.) Ivano-Frankivs'k, 2022. S. 42 – 44.

URL: <https://drive.google.com/file/d/1WqQ2msGllAbwQ4WsE-Yruxd1keUxCTad/view>
[in Ukrainian]

2 Shtifzon O. Y., Novikov V. P., Bun' V. P. Teoriya avtomatychnoho upravlinnya: navchal'nyy posibnyk. K.: KPI im. I. Sikors'koho. 2020. 144 s. [in Ukrainian]

3. Levin J. J. On the matrix Riccati equation. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 10. 1959. Pp. 519–524.

4. Ray W. Advanced Process Control. New York: McGraw-Hill Book, Company, 1981. 368 p

5. Kuster George E. H-infinity Norm Calculation via a State Space Formulation. URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49544/Kuster_GE_T_2013.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (Дата звернення 26.09.2022)

6. Gaiduk A.R. Synthesis of control systems of multivariable objects. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 1998. Vol. 37, N 1. P. 5–13.

7. Gaiduk A.R., Vershinin Y.A., Jawaid A. A method of synthesis of a multivariable system with decoupled and interconnected channels // Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Houston, TX, 2003. P. 548–552.

8. Gorbiychuk M. I., Povarchuk D. D., Humeniuk T. V., Lazoriv N. T. Development of the imitation model of the two-stage separation process of oil. *Earsten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. -№ ½ (92). P. 20 – 27. [in Ukrainian]

9. Isermann R. Digital Control Systems. Berlin: Springer-Vtrlag, 1980. 541 p.

10. Goodwin G. C., Graebe S. F., Saldago M. E. Control Systems Design. Prentice Hall, 2000. 944 p.

11. Tou Julius T. Digital and Sampled-data Control Systems. New York: McGraw-Hill Book Company, INC, 1960. 694 p.

12. Horbiychuk M. I., Lazoriv N. T. Dyskretyzatsiya matematychnykh modeley liniynykh ob'yektiv keruvannya. *Journal Věda a perspektivy*. 2022. № 1: P. 241-254. [in Ukrainian]

13. Horbiychuk M. I., Pistun YE. P. Chyslovi metody i modelyuvannya na EOM: navch. posibnyk. Ivano-Frankivs'k: IFNTUNH, 2010. 409 s. [in Ukrainian]

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 514.862

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-89-94

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ТРУБОПРОВОДІВ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В ПІДЗЕМНОМУ ТА НАДЗЕМНОМУ РЕЖИМАХ

А. П. Олійник, Л. І. Фешанич, М. Ю. Чернишов

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ,
вул. Карпатська, 15; e-mail: pta@nung.edu.ua*

В процесі тривалої експлуатації деформації перерізів є характерним як для наземних, так і для підземних ділянок трубопроводів різного призначення. В статті розглянуто питання математичного моделювання процесу деформування трубопроводів, по яких здійснюється транспортування газорідних сумішей з агресивними компонентами. Побудовано моделі процесу деформування трубопроводу за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні. При побудові моделі процесу деформування не використовується інформація про характер та тривалість зусиль та навантажень, що діють на трубопровід. Побудовано закон руху трубопроводу з урахуванням деформації перерізів в трьох напрямках. Реалізовано математичну модель процесу обтікання деформованих перерізів трубопроводу з метою оцінки залежності аеродинамічних характеристик перерізів від їх просторової конфігурації. При цьому використовується апарат інтегральних рівнянь Фредгольма II роду. За створеними на основі вказаних моделей обчислювальними алгоритмами проведено розрахунки напруженого стану трубопроводів та аеродинамічних характеристик деформованих перерізів. Наведено аналіз результатів розрахунків – інтенсивності напружень та залежностей аеродинамічних характеристик від ступеня еліптичності перерізу та кута атаки деформованого перерізу. Виявлено, що при вивченні напружено-деформованого стану необхідно враховувати аеродинамічні сили та моменти, що виникають при деформуванні перерізів. Розглянуто випадок, коли внаслідок деформування переріз набуває еліптичної конфігурації, що характерно для діючих ділянок трубопроводів. Визначено напрямки подальших досліджень – моделювання течії в трубопроводі, що транспортує газорідні суміші з агресивними компонентами з наявності зон із потенційною втратою герметичності внаслідок зміни напружено-деформованого стану та виявлення поширення шкідливих речовин в зоні, що оточує трубопровід при його розгерметизації, вивчення процесу деформування нееліптичних профілів.

Ключові слова: напружений стан, трубопровід, аеродинамічні характеристики, деформація перерізів, еліптичність.

In the process of long-term exploitation the section's deformations are inherent both for evaluated and underground sections different purposes pipelines. The article deals with the problems of pipelines deformation process mathematical modeling through which the transport of gas-liquid mixtures with aggressive components is carried out. Models of the pipeline deformation process by known displacements of a certain set of points of a surface are constructed. The construction of the deformation process model does not use information about the nature and duration of the forces and loads acting on the pipeline. The law of pipeline motion was constructed taking into account the deformation of sections in three directions. A mathematical model of the process of flow around deformed sections of the pipeline is implemented in order to evaluate the dependence of the aerodynamic characteristics of the sections on their spatial configuration. The apparatus of Fredholm integral equations of the second kind is used. According to the computational algorithms created on the basis of the mentioned models, the stresses of the pipelines and the aerodynamic characteristics of the deformed sections were calculated. The analysis of the results of calculations - the intensity of stresses and dependencies of aerodynamic characteristics on the degree of ellipticity of the section and the angle of attack of the deformed section is presented. It was discovered that during over-ground section's stress-strained state control it is very important take into attention the value of aerodynamics loadings and momentums. It was considered the situation when after deformation the section has received the elliptical configurations, which are inherent for the real pipelines. Directions for further research are identified- modeling of

flow in a pipeline that transports gas-liquid mixtures with aggressive components due to the presence of zones with a potential loss of tightness due to a change in the stress-strain state and detection of the spread of harmful substances in the zone surrounding the pipeline when it is depressurized, studying deformed cross-sections of a non-elliptical configuration.

Key words: stress state, pipeline, aerodynamic characteristics, section deformation, ellipticity.

Вступ

Дослідження технічного стану трубопроводів, по яких транспортуються газорідні суміші з агресивними компонентами є важливою науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволяє проводити ідентифікацію потенційно небезпечних ділянок. Зокрема, вивчення напружено-деформованого стану дозволяє виявити ті зони, в яких можливим є втрата суцільності матеріалу трубопроводу, і, як наслідок, викиди хімічно агресивних речовин, що транспортуються. При цьому необхідно враховувати весь комплекс факторів силового впливу, що діють на трубопровід. Вказана проблема досліджувалась багатьма авторами [1,3,4], проте в цих роботах приймається та чи інша модель процесу деформування та напруженого стану без

урахування особливостей продукту, що транспортується. При вивченні технічного стану трубопроводів, по яких транспортуються газорідні суміші з агресивними компонентами необхідно враховувати реальну просторову конфігурацію реальних трубопровідних систем як в надземному [3], так і в підземному положенні [4], причому для надземних ділянок можна використовувати як інтегральний підхід до оцінювання напруженого стану [3], так і вивчати окремі види силових впливів більш детально (наприклад, вітрові навантаження).

Математичні моделі процесів.

1. Оцінка напружено-деформованого стану трубопроводів.

На основі відомого підходу [3] записується радіус-вектор довільної точки трубопроводу:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_l(s, \varphi, r, t) + \rho(s, \varphi, r, t) \times (\cos \omega(s, \varphi, r, t) \vec{b}_l + \sin \omega(s, \varphi, r, t) \vec{n}_l + \psi(s, \varphi, r, t) \vec{t}_l - \frac{D}{2} \vec{n}_l), \quad (1)$$

де S, φ, r - компоненти пов'язаної з трубопроводом криволінійної квазіциліндричної системи координат, зокрема, S - координати вздовж вісі, $0 \leq s \leq L$, L - довжина досліджуваного фрагменту, φ - полярний кут, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, r - полярний радіус даного перерізу $R_{\text{вн}} \leq r \leq R_{\text{зовн}}$, вектори $\vec{r}_l, \vec{b}_l, \vec{n}_l, \vec{t}_l$ - відповідно радіус-вектор точки на поверхні твірної трубопроводу, \vec{b}_l - вектор бінормалі до цієї лінії, \vec{n}_l - вектор нормалі до неї, \vec{t}_l - вектор дотичний до верхньої твірної [3], функція $\rho(s, \varphi, r, t)$ характеризує деформацію перерізів в радіальному напрямку, з її допомогою моделюється зміна форми перерізу (еліптичність, грушевидність тощо), $\omega(s, \varphi, r, t)$ - поворот перерізів по напрямку полярного кута (кручення перерізів), $\psi(s, \varphi, r, t)$ - повздовжні деформації перерізів (в прийнятій в багатьох монографіях гіпотезі

про плоскі перерізи $\psi(s, \varphi, r, t) \equiv 0$). При відокремленні \vec{r}_l за відомими переміщеннями точок поверхні використовується апарат сплайн - функцій із згладжуванням третього степеня [8,9], згладжування проводиться з урахуванням точності вимірювання координат точок поверхні за відомими методиками [8]. Після побудови радіус-вектора (1) здійснюється розрахунок компонентів тензорів деформації та напружень [3] з використанням метричного тензора відповідної системи координат $s, \varphi, r, x_1 = s; x_2 = \varphi; x_3 = r$:

$$g_{ij} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_i} \frac{\partial \vec{r}}{\partial x_j}. \quad (2)$$

Визначені компоненти тензорів деформації та напружень дозволяють виділити зони трубопроводу, які зазнають максимальних змін в напруженому стані, причому дослідження проводиться для надземних та підземних ділянок трубопроводів, причому оцінка

компонентів тензора напружень δ_{ij} для підземних ділянок є особливо важливою, оскільки трубопроводи, по яких транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами, як правило розташовуються на більшій глибині, ніж звичайні магістральні трубопроводи, а тому на них діє більше ґрунтове навантаження.

Для надземних ділянок важливим фактором силового впливу є дія вітрових навантажень. Для оцінки аеродинамічних впливів використовується підхід, що базується на

$$K(\theta, \theta_0) = \frac{(y(\theta) - y(\theta_0))x'(\theta_0) - [x(\theta) - x(\theta_0)]y'(\theta_0)}{[x(\theta) - x(\theta_0)]^2 + [y(\theta) - y(\theta_0)]^2}, \quad (4)$$

де $x(\theta), y(\theta), x(\theta_0), y(\theta_0)$ - координати точок перерізу в контрольній θ_0 та в кожній з точок θ на поверхні профілю (рис.1)

$$\begin{cases} x(\theta) = \cos^2 \frac{\theta}{2} \\ y(\theta) = f(\theta) \end{cases}$$

використанні розв'язку інтегрального рівняння Фредгольма другого роду відносно дотичної до поверхні перерізу трубопроводу компоненти швидкості вітрового потоку [6] V_θ :

$$V_\theta(\theta_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_\theta(\theta) K(\theta, \theta_0) d\theta + \frac{\partial \phi}{\partial \theta}(\theta_0), \quad (3)$$

$V_\theta = \frac{\partial \phi}{\partial \theta}$, ϕ - потенціал потоку [6], $K(\theta, \theta_0)$ - ядро інтегрального оператора:

$f(\theta)$ - функція, що описує еліптичність перерізу.

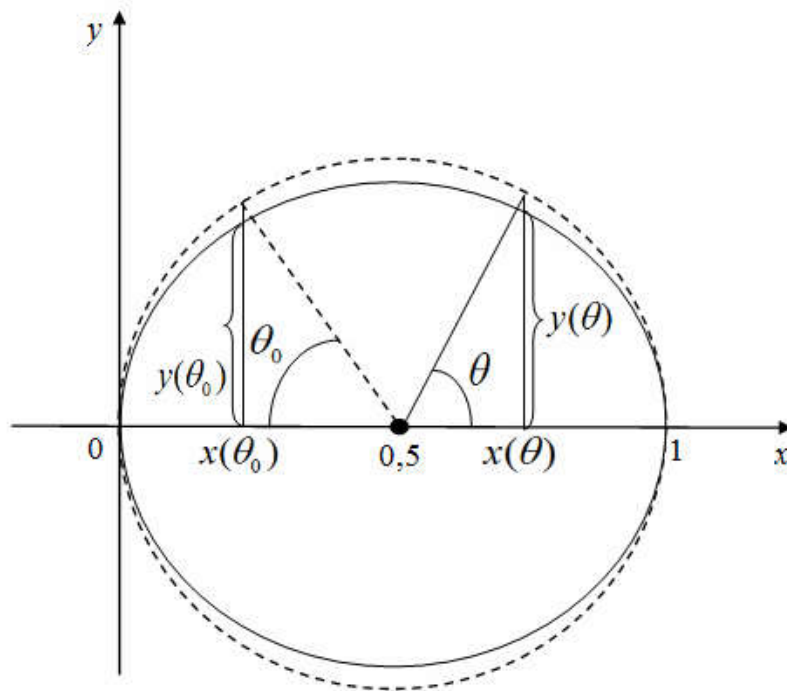


Рисунок 1 – Геометрія профілю трубопроводу з певною еліптичністю

Очевидно, вимагає особливого дослідження випадок $\theta = \theta_0$ - в такому випадку до (4) застосовується правило Лопітала [1], після чого

$$K(\theta, \theta_0) = \frac{1}{2} \frac{y(\theta_0)'' x'(\theta_0) - x''(\theta_0) y'(\theta_0)}{x'(\theta_0)^2 + y'(\theta_0)^2}. \quad (5)$$

Величина $\frac{\partial \phi}{\partial \theta}(\theta_0)$ визначається за формулою:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = V_{\infty} (x(\theta_0) \cos \alpha + y(\theta_0) \sin \alpha), \quad (6)$$

де V_{∞} - швидкість незбуреного потоку на достатній відстані від досліджуваного перерізу; α - кут атаки профілю - кут між напрямком вітрового потоку та горизонтальною лінією перпендикулярною до осі трубопроводу. Розв'язок рівняння (3) проводиться в допущенні про виконання постулату Чаплигіна-Жуковського про скінченне значення швидкості на лінії сходу потоку з профілю з використанням чисельних методів [9] шляхом переходу від інтегрального рівняння (3) до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно $U_{\theta}(\theta_i) i = 1, \dots, N$. При цьому приймається, що $V_{\infty} = 1$ - тобто всі швидкості масштабуються по швидкості потоку, що набігає.

Визначення розподілу компонент $V_{\theta}(\theta)$ є достатнім для оцінки всіх аеродинамічних

$$C_m = \int_0^{2\pi} C_p(\theta) x(\theta) x'(\theta) d\theta + \int_0^{2\pi} C_p(\theta) y(\theta) y'(\theta) d\theta. \quad (11)$$

Результати тестових розрахунків модельної ділянки трубопроводу.

1. Для модельної ділянки трубопроводу проведено розрахунок напруженого стану за інформацією про переміщення певної множини точок поверхні (рис.2.), що дозволило виявити потенційно небезпечні з точки зору можливої втрати суцільності матеріалу трубопроводу зони. Вдається

характеристик профілю, оскільки ортогональна до V_{θ} компонента швидкості V_n дорівнює нулю через умову непротікання рідини або газу через поверхню профілю трубопроводу. Після знаходження $V_{\theta}(\theta)$ обчислюється фізична компонента швидкості

$$U_{\theta} = \frac{V_{\theta}(\theta)}{\sqrt{x'(\theta_0)^2 + y'(\theta_0)^2}}, \quad (7)$$

після чого встановлюються наступні аеродинамічні характеристики профілю: коефіцієнт тиску:

$$C_p(\theta) = 1 - U_{\theta}^2 \quad (8)$$

коефіцієнт підйимальної сили:

$$C_y = \int_0^{2\pi} C_p(\theta) x'(\theta) d\theta, \quad (9)$$

коефіцієнт індуктивного опору:

$$C_x = \int_0^{2\pi} C_p(\theta) y(\theta) d\theta, \quad (10)$$

коефіцієнт моменту відносно передньої кромки профілю (точки розгалуження потоку):

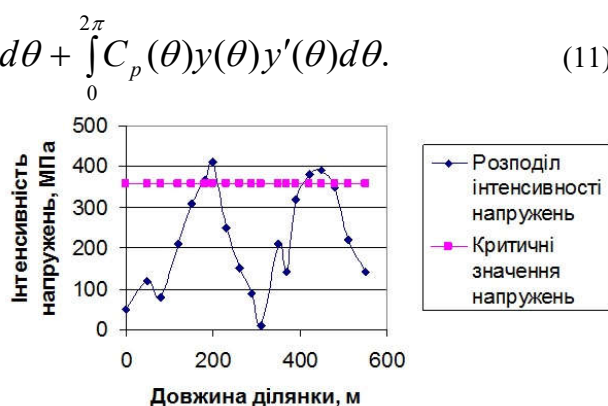


Рисунок 2 – Розподіл інтенсивності напружень по довжині підземної ділянки трубопроводу.

встановити просторову конфігурацію цих зон, проте аналіз проводиться для інтенсивності напружень [3]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 \sigma_{ij}^2} \quad (12)$$

2. Проведено дослідження впливу вітрових навантажень на трубопровід, встановлено, що підймальна сила, що діє на трубопровід, лінійно залежить від кута атаки α (рис.3.).

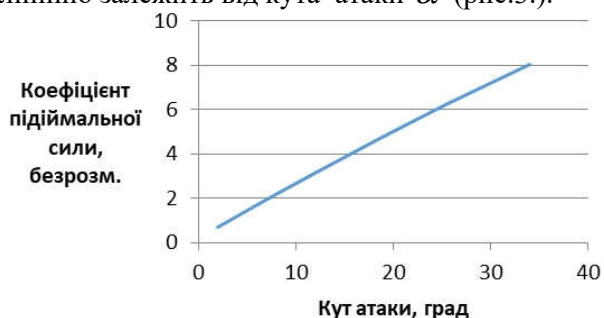
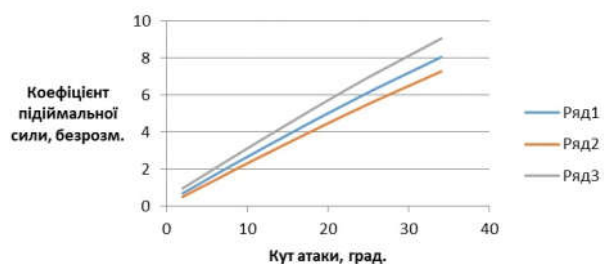


Рисунок 3 – Розподіл коефіцієнта підймальної сили від кута атаки

3. При дослідженні впливу еліптичності перерізу на підймальну силу, встановлено, що остання залежить від еліптичності профіля: якщо круглий профіль має великі півосі $a = b = 0,5$, то при еліптичності $a = 0,5; b = 0,45$ підймальна сила збільшується на 2,1% (рис.4).



Ряд 1 – $a=0.5, b=0.445$, Ряд 2 - $a=0.5, b=0.485$, Ряд 3 - $a=0.5, b=0.405$.

Рисунок 4 – Розподіл коефіцієнта підймальної сили від кута атаки.

4. Розроблений програмний комплекс дозволяє моделювати широкий клас профілів перерізів труби, а саме враховувати:

- еліптичність профілю;
- односторонню еліптичність, коли профіль складається з двох півеліпсів з різними ексцентриситетами;
- різні кути атаки профілю.

Напрямок подальших досліджень може бути моделювання течії в трубопроводі, що транспортує газорідинні суміші з агресивними компонентами через наявність зон із потенційною втратою герметичності внаслідок зміни напружено-деформованого стану та виявлення поширення шкідливих речовин в зоні, що оточує трубопровід при його розгерметизації.

Список використаних джерел

1. Дубовой В.М., Кветний Р.Н, Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця: ПП «Едельвейс», 2017. 804 с.
2. Mandryk O., Oliynyk A., Mykhailyuk R., Feshanych L. Flood development process forecasting based on water resources statistical data. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 2021 4(2). P. 65 – 76.
3. Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопроводних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 320с.
4. Олійник А. П., Жовтуля Л. Я., Яворський А. В., Карпаш М. О. Розроблення методики оцінки напружено-деформованого стану лінійних ділянок магістральних трубопроводів. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. №1(38), ст.57 -63.
5. Диференціальні рівняння / Ю.Д. Головатий, В.М. Кирлич, С.П. Лавренюк. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2011. 470 с.
6. С.А.І. Fletcher Computational Galerkin methods. *Springer Verlag*. 1984, 352 p.
7. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel / [L. Clapham, C. Heald, T. Krause at al]. *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 36. P. 1574–1580.
8. A.K. Cline, Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. 1978. v.17, № 4, p. 218-228.

References

1. Dubovoy V.M., Kvyetnyy R.N, Mykhal'ov O.I., Usov A.V. Modelyuvannya ta optymizatsiya system: pidruchnyk. Vinnytsya: PP «Edel'veys», 2017. 804 st. [in Ukrainian]
2. Mandryk O., Oliynyk A., Mykhailyuk R., Feshanych L. Flood development process forecasting based on water resources statistical data. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 2021 4(2). P. 65 – 76.
3. Oliynyk A.P. Matematychni modeli protsesu kvazistatsionarnoho deformuvannya truboprovodnykh ta promyslovykh system pry zmini yikh prostorovoyi konfihuratsiyi: Naukove vydannya. Ivano-Frankivs'k: IFNTUNH, 2010. 320s. [in Ukrainian]
4. Oliynyk A. P., Zhovtulya L. YA., Yavors'kyy A. V., Karpash M. O. Rozroblennya metodyky otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu liniynykh dilyanok mahistral'nykh truboprovodiv. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2017. №1(38), st.57 -63. [in Ukrainian]
5. Dyferentsial'ni rivnyannya / YU.D. Holovatyy, V.M. Kyrlych, S.P. Lavrenyuk. – L'viv: LNU im. Ivana Franka, 2011. 470 s. [in Ukrainian]
6. C.A.J. Fletcher Computational Galerkin methods. *Springer Verlag*. 1984, 352 p.
7. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel / [L. Clapham, C. Heald, T. Krause at al]. *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 36. P. 1574–1580.
8. A.K. Cline, Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. 1978. v.17, № 4, p. 218-228.

УДК 622.24 + 621.694.2

DOI 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-95-101

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЮ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗМІШУВАНИХ ПОТОКІВ ПРИ ОБЕРТАННІ СВЕРДЛОВИННОЇ ЕЖЕКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Д. О. Паневник

*ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул.Карпатська, 15, тел.(0342) 727101,
e-mail: den.panevnik@gmail.com*

Проаналізовано основні методи контролю характеристик свердловинних струминних насосів. Встановлено, що сучасний рівень розвитку непрямих методів контролю режиму роботи наддолотних ежекційних систем не враховує можливість обертання струминного насоса в свердловині, внаслідок чого знижується ефективність прогнозування технологічних процесів буріння експлуатаційних свердловин. Зважаючи на необхідність підвищення ефективності віддаленого моніторингу робочих характеристик наддолотних ежекційних систем розроблена математична модель контролю кінематичних параметрів змішуваних потоків в проточній частині струминного насоса та встановлено закономірності трансформації епюри швидкостей, викликані відносним обертанням робочого середовища. В процесі математичного моделювання характеру розподілу кінематичних параметрів диференціальне рівняння руху осесиметричного гвинтового вихрового потоку доповнене емпіричним співвідношенням між обертовою швидкістю та радіусом потоку. Після інтегрування рівняння руху робочого середовища отримано теоретичний профіль швидкостей для випадку симетричного та асиметричного розміщення струминного насоса в свердловині. Теоретичні епюри поздовжніх швидкостей характеризуються значеннями осьової та обертової швидкості змішуваних потоків. На основі аналізу характеру трансформації розподілу кінематичних параметрів визначений коефіцієнт нерівномірності епюри швидкостей у вигляді співвідношення їх фактичних та теоретичних значень. Значення коефіцієнта нерівномірності розподілу швидкостей зростає при збільшенні швидкості обертання струминного насоса та кута закручування потоку направляючими елементами. Прогнозування величини коефіцієнта нерівномірності розподілу швидкостей дозволяє здійснювати віддалений контроль режимних параметрів при обертанні струминного насоса в свердловині.

Ключові слова: *контроль параметрів, віддалений моніторинг, струминний насос, ежекційна система, епюра швидкостей.*

The main methods of controlling the characteristics of well jet pumps are analyzed. It was established that the current level of development of indirect methods of controlling the mode of operation of above-bit ejection systems does not take into account the possibility of rotation of the jet pump in the well, as a result of which the effectiveness of forecasting technological processes of drilling production wells is reduced. Taking into account the need to improve the efficiency of remote monitoring of the operating characteristics of above-bit ejection systems, a mathematical model for controlling the kinematic parameters of mixed flows in the flow part of a jet pump was developed and the regularities of the transformation of the velocity profile caused by the relative rotation of the working medium were established. In the process of mathematical modeling of the nature of the distribution of kinematic parameters, the differential equation of motion of an axisymmetric helical vortex flow is supplemented with an empirical relationship between the rotational speed and the radius of the flow. After integrating the equation of motion of the working medium, a theoretical velocity profile was obtained for the case of symmetrical and asymmetrical placement of the jet pump in the well. Theoretical plots of longitudinal velocities are characterized by values of axial and rotational velocity of mixed flows. Based on the analysis of the nature of the transformation of the distribution of kinematic parameters, the coefficient of unevenness of the speed plot was determined in the form of a ratio of their actual and theoretical values. The value of the coefficient of unevenness of the distribution of speeds increases with an increase in the speed of rotation of the jet pump and the angle of rotation of the flow by the guide elements. Forecasting the value of the coefficient of unevenness of the speed distribution allows for remote control of operating parameters during rotation of the jet pump in the well.

Key words: *parameter control, remote monitoring, jet pump, ejection system, speed chart.*

Вступ

В процесі розвитку нафтогазових ежекційних технологій, промислове застосування яких розпочате в середині минулого століття, сформувались такі області використання струминних насосів для інтенсифікації процесів розробки родовищ вуглеводнів: створення зворотного та прямого місцевого промивання, зниження диференціального тиску на вибої, ліквідація аварій під час буріння [1], нафтогазовидобуток в складних умовах та на пізніх стадіях експлуатації [2], очищення підземного обладнання та видалення піскових пробок [3], утилізація низьконапірного газу в системах збору та підготовки продукції свердловин [4]. В процесі розвитку нафтогазових ежекційних технологій періодично з'являються нові нетрадиційні сфери їх застосування. Зокрема, компанія Petrobras розпочала використовувати свердловинні струминні насоси для ліквідації відкладів гідратів на робочих поверхнях підземного обладнання [5]. Поширеність, широка географія застосування та універсальність нафтогазових ежекційних технологій свідчить про їх світове значення.

Ефективність управління свердловинними струминними насосами значною мірою визначає перспективність їх застосування в нафтогазовій промисловості. Періодична зміна гірсько-технічних умов під час будівництва нафтових і газових свердловин приводить до необхідності постійного моніторингу за техніко-економічними показниками процесу буріння і, зокрема, за режимом роботи свердловинних ежекційних систем. Переважна більшість ежекційних технологій, які використовують при розробці нафтових і газових родовищ, передбачає розміщення струминного насоса безпосередньо на вибої свердловини, або на значній глибині. Значна відстань між оператором та струминними насосами ускладнює діагностування їх роботи з наступним регулюванням режимних параметрів в разі виникнення такої необхідності. Це пов'язано, в першу чергу, із незадовільним вивченням теоретичних питань, які регламентують особливості віддаленого контролю робочого процесу ежекційних систем, що свідчить про актуальність проведення досліджень спрямованих на його удосконалення.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

В процесі аналізу досвіду застосування ежекційних технологій встановлено, що основною класифікаційною ознакою моніторингу характеристик свердловинних струминних насосів є характер контролю. За характером контролю можна виділити прямий та непрямий спосіб визначення характеристик струминного насоса [6]. Прямий спосіб може бути охарактеризований, як метод визначення прямих параметрів роботи струминного насоса, на основі яких в подальшому розраховуються його безрозмірні відносні характеристики. До прямих параметрів можна віднести тиск інжектваного потоку та витрату робочого, змішаного та інжектваного потоку. Непрямий метод контролю передбачає попередню фіксацію окремих проміжних показників, які в подальшому дозволяють визначити прямі параметри роботи насоса. Непрямі методи контролю параметрів передбачають визначення тиску потоку на вході в свердловину та густину потоку, що виходить з свердловини. Для визначення тиску інжектваного потоку в камеру інжекції може вмонтовуватись тензометричний давач, а сам струминний апарат разом з давачем з'єднують з наземною каротажною станцією. Процес зміни тисків фіксують фотореєстратором або самописцем каротажної станції, а тиск інжектваного потоку може визначатись за допомогою діаграм, отриманих при використанні глибинних манометрів [7] та давачів тиску [8]. Контроль параметрів може здійснюватись також за допомогою підвешеного на кабелі геофізичного приладу. Фізичні параметри інжектваного потоку можуть визначатись з використанням вибійних випромінювачів та електронних перетворювачів з кабелем дистанційного зв'язку. Витрата змішаного потоку визначається об'ємним способом за зміною рівня рідини в резервуарі, яка надходить з свердловини. При визначенні витрати робочого потоку використовують витратомір. Наближено витрата робочого потоку може визначатись також, якщо відомі діаметр, довжина і частота ходів плунжерів наземного насосного агрегата та паспортна величина коефіцієнта подачі.

Підвищенню ефективності експлуатації родовищ високов'язкої нафти сприяє визначення у режимі реального часу температури пластової рідини [9].

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

Існуючий рівень розвитку методів контролю режиму роботи свердловинних ежекційних систем є недостатнім для їх ефективного використання, особливо для струминних насосів з додатковим замкненим привибійним контуром циркуляції, дистанційний моніторинг експлуатаційних параметрів яких ускладнюється відсутністю виходу інжектваного потоку на поверхню. Ефективність віддаленого контролю кінематичних параметрів змішуваних потоків знижується внаслідок відносного обертання струминного насоса при роторному або турбінному бурінні. В цих умовах зростають вимоги до створення математичних моделей робочого процесу свердловинного струминного насоса та прогнозування характеру зміни його експлуатаційних параметрів. В роботі [10] запропонований механізм визначення впливу обертання струминного насоса на конфігурацію ліній течії змішуваних потоків за допомогою теорії плоских потенціальних потоків. Для побудови конфігурації ліній течії за заданим полем швидкостей застосовано метод конформного відображення області з відомим комплексним потенціалом на область течії з заданими границями. Запропонований механізм

$$y = b \left(1 + \frac{4}{\pi} \beta \left(\sin \frac{1,7889\beta b + x}{0,042\beta b} + \frac{1}{2} \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1,7889\beta b + x}{0,084\beta b} \right) \right| - 0,2664 \right) \right), \quad (1)$$

де b – радіус струменя;

β – нерівномірність розподілу швидкостей, викликана обертанням потоку;

x – поздовжня координата.

Конфігурація робочого потоку та траєкторія струменя для випадку нерухомої ежекційної системи відповідає випадку, коли коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей приймає значення $\beta=1$. Розглянемо можливість визначення коефіцієнта нерівномірності β у випадку обертання ежекційної системи, коли даний параметр приймає значення $\beta < 1$.

робочого процесу струминного насоса для умов його обертання в свердловині передбачає встановлення траєкторії струменя та визначення коефіцієнта швидкості для умов обертання потоку. В роботі [10] отримане рівняння траєкторії струменя робочого середовища, до складу якого входить величина коефіцієнта швидкості потоку на вході в камеру змішування струминного насоса. Прогнозування режиму роботи струминного насоса відповідно до отриманого рівняння траєкторії струменя робочого середовища передбачає моделювання характеру розподілу кінематичних параметрів по його перерізу та визначення коефіцієнта швидкості для умов відносного обертання потоку.

Формулювання цілей статті

Метою досліджень є обґрунтування методу контролю кінематичних параметрів змішуваних потоків в проточній частині струминного насоса на основі встановлення закономірностей нерівномірності розподілу поздовжніх швидкостей, викликані закручуванням робочого середовища в умовах обертання ежекційної системи в свердловині.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

В роботі [10] на основі використання методу конформних відображень отримано рівняння траєкторії струменя робочого потоку струминного насоса у вигляді

Для характеристики розподілу поздовжніх швидкостей V_z у випадку рівномірної циркуляційної течії нев'язкої рідини в прямій круглій трубі радіусом r використаємо диференціальне рівняння осесиметричного гвинтового вихрового потоку для випадку рівномірного розподілу енергії по перерізу

$$\frac{V_\theta}{r} \frac{d(V_\theta r)}{dr} + V_z \frac{dV_z}{dr} = 0, \quad (2)$$

де V_θ – колова швидкість, викликана закручуванням потоку направляючими елементами або обертанням струминного насоса.

Для інтегрування даного рівняння зробимо припущення про пропорційний зв'язок між обертовою швидкістю та радіусом потоку

$$V_{\theta} = ar, \quad (3)$$

де a – коефіцієнт пропорційності.

Після інтегрування рівняння (2) з врахуванням (3) та вважаючи, що абсолютне значення вектору швидкості по перерізу залишається незмінним отримаємо теоретичний профіль швидкостей $V_z = f(r)$ у вигляді

$$V_z = \sqrt{V_{\max}^2 - 2\omega^2 r_i^2}, \quad (4)$$

де V_{\max} – максимальна швидкість по осі трубопроводу;

r_i – поточний радіус потоку;

ω – кутова швидкість обертання потоку.

Перша складова рівняння (4) визначає залежність поздовжніх швидкостей від витрати потоку, а друга складова – від швидкості його обертання. В процесі виведення рівняння (4) додатково враховано прямопропорційний зв'язок між коловою і кутовою швидкістю руху частинок рідини.

У випадку зміщеного центру циркуляції рівняння профілю поздовжніх швидкостей можна записати у вигляді

$$V_z = \sqrt{V_{\max}^2 - 2\omega^2 (r_i \pm r_o)^2}, \quad (5)$$

де r_o – відстань між осями струминного насоса і свердловини.

Для симетричного профілю (рівняння (4)) максимальна поздовжня швидкість має місце на осі струминного насоса $r_i=0$, а для асиметричного (рівняння (5)) відповідає випадку $r_o=0$; $r_i=0$.

В процесі аналізу розподілу поздовжніх швидкостей використовуємо безрозмірні співвідношення

$$\bar{V}_z = \frac{V_z}{V_{\max}}; \quad \bar{r} = \frac{r_i}{r_{pn}}, \quad (6)$$

максимальні значення яких становлять $\bar{V}_z=1$; $\bar{r}=1$. В останньому рівнянні позначено: r_{pn} – радіус робочої насадки струминного насоса.

Незважаючи на використання безрозмірних координат різним співвідношенням витрати та лінійних розмірів відповідають окремі графічні характеристики (рисунок 1), тобто отримані профілі швидкостей не є подібними.

Зростання витрати потоку збільшує вплив на епюру поздовжньої швидкості і профіль стає більш наповненим (рисунок 1 а).

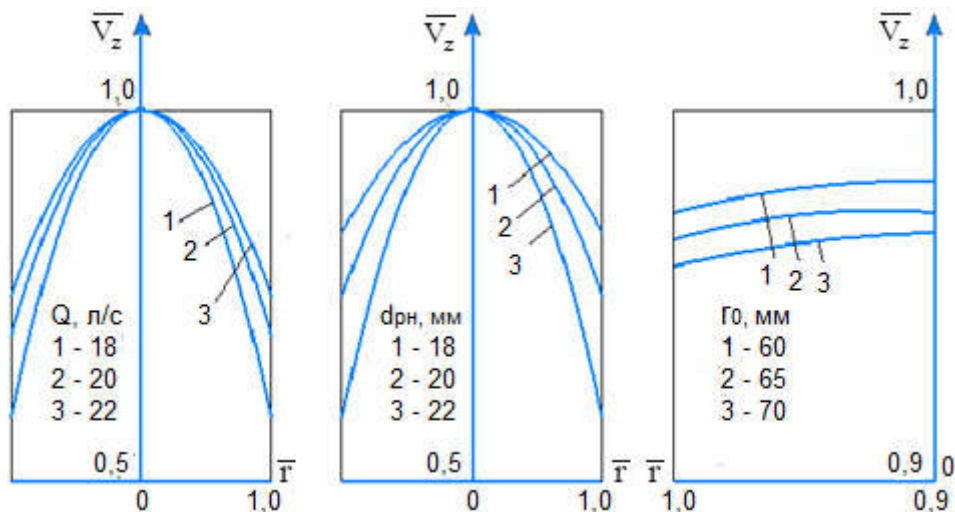


Рисунок 1 – Профілі поздовжніх швидкостей

а), б) – симетричне закручування потоку для різної витрати Q та діаметра робочої насадки d_{pn} ; в) – асиметричне обертання струминного насоса для різних відстаней до осі свердловини

Зростання діаметра робочої насадки навпаки зменшує вплив величини поздовжньої швидкості і профіль набуває більш видовженої форми (рисунок 1 б). Рисунки 1 а, б відповідають випадку закручування потоку направляючими елементами з кутом нахилу $\alpha = 30^\circ$. У випадку асиметричного обертання струминного насоса зростання відстані до осі обертання збільшує нерівномірність розподілу поздовжніх швидкостей (рисунок 1 в), тобто співвідношення \bar{V}_z зменшується. Знак «+» в рівнянні (5) відповідає тій половині профілю, яка більше віддалена від осі обертання струминного насоса (цей випадок приведений на рисунку 1 в). Права частина профілю відповідає знаку «-» в круглих дужках рівняння (5). Очевидно, що для випадку асиметричного обертання струминного насоса права частина епюри швидкостей не буде дзеркальним відображенням її лівої частини.

Співвідношення максимальної і мінімальної поздовжньої швидкості для закручування потоку знаходиться в діапазоні $V_{z\max}/V_{z\min} = 1,19-1,73$. Для асиметричного обертання струминного насоса дане співвідношення становить $V_{z\max}/V_{z\min} = 1,01$, а для симетричного обертання $V_{z\max}/V_{z\min} = 1,0002$. Зважаючи на значну розбіжність між максимальною і мінімальною поздовжньою швидкістю для випадку закручування рідини необхідно встановити аналітичну залежність між нерівномірністю розподілу швидкостей та гідродинамічними параметрами робочого потоку.

$$Q_\phi = 2\pi b \frac{(\sqrt{A^2 - r^2})^3}{3} \Big|_0^{r_{pH}} = \frac{2}{3} \sqrt{2} \pi \omega \left[\left(\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}\omega} \right)^3 - \left(\sqrt{\frac{V_{\max}^2}{2\omega^2} - r_{pH}^2} \right)^3 \right] \quad (10)$$

Фактична швидкість потоку може бути визначена шляхом ділення рівняння (10) на площу перерізу потоку. Враховуючи останнє рівняння коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей може бути визначений за формулою

$$\beta = \frac{2}{3} \sqrt{2} \frac{\pi \omega}{Q_T} \left[\left(\frac{V_{\max}}{\sqrt{2}\omega} \right)^3 - \left(\sqrt{\frac{V_{\max}^2}{2\omega^2} - r_{pH}^2} \right)^3 \right], \quad (11)$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей визначимо як співвідношення фактичної і теоретичної швидкості руху потоку. Теоретичну швидкість розраховуємо як співвідношення заданої витрати та площі перерізу каналу. Теоретична швидкість відповідає осі гідравлічного каналу, оскільки внаслідок дії сил в'язкості значення фактичної швидкості зменшується в напрямку стінок, що обмежують потік рідини. Фактичну швидкість визначаємо як співвідношення фактичної витрати і площі перерізу каналу. Фактичну витрату, у свою чергу, розраховуємо шляхом інтегрування рівняння прийнятого закону розподілу швидкостей $V(r)$ по перерізу каналу з врахуванням його граничних геометричних розмірів.

Елементарну фактичну витрату dQ_ϕ визначаємо як швидкість потоку V_z через елементарний кільцевий переріз довжиною (або периметром) $2\pi r$ та шириною d_r

$$dQ_\phi = V_z(r) 2\pi r dr \quad (7)$$

Для симетричного розподілу швидкостей фактичну витрату потоку визначаємо враховуючи рівняння (4)

$$Q_\phi = 2\pi \int_0^{r_{pH}} \sqrt{V_{\max}^2 - 2\omega^2 r^2} r dr \quad (8)$$

Після здійснення підстановок $a = V_{\max}$; $b = \sqrt{2}\omega$; $A = a/b$ запишемо

$$Q_\phi = 2\pi \int_0^{r_{pH}} \sqrt{a^2 - b^2 r^2} r dr = 2\pi b \int_0^{r_{pH}} \sqrt{A^2 - r^2} r dr \quad (9)$$

Останній вираз є табличним інтегралом. Після інтегрування та проведення зворотних підстановок отримаємо

де Q_T - теоретична витрата потоку.

Співвідношення значень першої і другої складової рівняння (11) показує, що коефіцієнт β і величина радіуса r_{pH} приймають однакові знаки. Оскільки радіус потоку завжди більше нуля коефіцієнт β приймає позитивні значення для будь яких величин складових рівняння (11). Відповідно до фізичного змісту коефіцієнт β повинен приймати нульові значення у випадку

відсутності обертання частинок рідини. Крім того, залежність $\beta = f(\omega)$ при $\omega=0$ повинна приймати значення $\beta=1$, бути низхідною при зростанні ω і не повинна містити екстремумів. Аналіз отриманого рівняння, однак, свідчить про порушення необхідних умов існування функції $\beta = f(\omega)$ в області малих значень кутової швидкості ω . Це пов'язано з прийнятим на основі експериментальних даних характером розподілу швидкостей по перерізу потоку в умовах його обертання в циліндричному каналі (рівняння (3), (4)). На практиці величина кутової швидкості закрутки потоку знаходиться в діапазоні від 0 до 10^5 . Таким чином, отримане рівняння задовольняє необхідним умовам використання струминного насоса. Область використання рівняння (11) визначаємо за умови позитивного підкореневого виразу другої складової формули, що забезпечується за виконання співвідношення $Q_T > 4,441\omega r_{pn}^3$.

У випадку закручування потоку частота обертання частинок рідини, її витрата та кут нахилу направляючих елементів зв'язані рівнянням

$$\omega = \frac{8}{\pi} \frac{Q}{d^3} \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

де α – кут нахилу направляючих елементів;
 d – діаметр гвинтової траєкторії.

Після підстановки рівняння (12) в формулу (11) отримаємо співвідношення для визначення коефіцієнта нерівномірності розподілу поздовжніх швидкостей, викликаного закручуванням потоку

$$\beta = \frac{0,3335}{\operatorname{tg}^2 \alpha} - 0,9428 \operatorname{tg} \alpha \left(\sqrt{\frac{1}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha} - 1} \right)^3 \quad (13)$$

Відповідно до отриманого рівняння коефіцієнт β зменшується при зростанні кута закручування потоку (рисунок 2) (тобто нерівномірність розподілу швидкостей зростає).

Нерівномірність розподілу швидкостей не залежить від діаметра робочої насадки і всі значення коефіцієнта β лягають на одну криву залежності $\beta = f(\alpha)$ (рисунок 2).

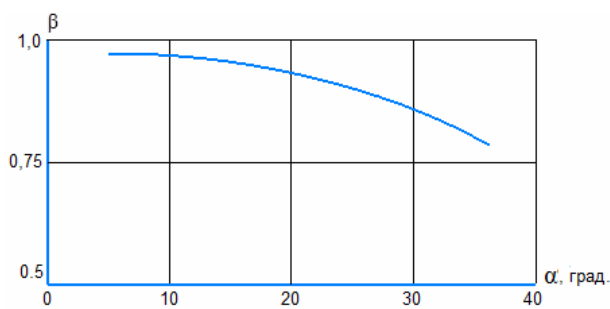


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта нерівномірності швидкостей робочого струменя від кута закручування потоку

Висновки

Розроблена математична модель контролю кінематичних параметрів змішуваних потоків в проточній частині струминного насоса та встановлені закономірності розподілу поздовжніх швидкостей в робочому середовищі в умовах відносного обертання наддолотної ежекційної системи в свердловині:

- на основі інтегрування диференціального рівняння осесиметричного гвинтового вихрового потоку отримано теоретичний профіль швидкостей із врахуванням закручування потоку направляючими елементами або обертанням струминного насоса;
- теоретична епюра поздовжніх швидкостей визначається величиною осевої швидкості та швидкістю обертання змішуваних потоків;
- у випадку зміщеного центру циркуляції робочого середовища профіль поздовжніх швидкостей додатково залежить від відстані між осями струминного насоса і свердловини;
- зростання витрати потоку та зменшення діаметра робочої насадки збільшує площу епюри поздовжніх швидкостей;
- у випадку асиметричного обертання струминного насоса зростання відстані до осі обертання збільшує нерівномірність розподілу поздовжніх швидкостей;
- коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкостей зростає при збільшенні швидкості обертання струминного насоса та зростанні кута закручування направляючими елементами.

Завдання подальших досліджень полягає у розробленні алгоритму автоматизованого контролю нерівномірності розподілу кінематичних параметрів в проточній частині наддолотного струминного насоса.

Список використаних джерел

1. Chen X.-Y., Cao T., Yu K.-A., Gao D.-L., Yang J., Wei H.-S. Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressure-dominated jet mill bit. *Petroleum Science*. 2020. Published online: 16 June 2020. 14 p. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00472-8>.
2. Anderson I., Freeman R., Pough T. Petroleum technology digest: Hydraulic jet pumps prove well suited for remote Canadian field. *World Oil*. 2006. № 8. P. 71–77.
3. Chen S., Yang D., Zhang Q., Wang I. An integrated Sand cleanout system by employing jet pumps. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2009. Vol.48. № 5. P.17–23.
4. Al-Khalifa H. H., Peeran S., Koleshwar V.S. Successful utilization of surface jet pumps at gas-oil separation plants. *Proceeding of the International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 9-12 November 2015*. SPE-177403-MS. 7 p.
5. Panevnik D.A., Panevnik A.V., Krehel R., Kočiško M. Determination of Jet Pump Performance when Eliminating Borehole Hydrates. *Innovative technologies of oil and gas. Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. (2022). Published: 26 March 2022 (Translated from *Khimiya i Tekhnologiya Topliv i Masel*. 2022. No. 1. January – February P. 73–76.). <https://doi.org/10.1007/s10553-022-01349-9>.
6. Паневник О.В., Онацко Р.Г. Контроль та регулювання режиму роботи свердловинних струминних насосів. Івано-Франківськ: Нова Зоря, 2007. 140 с.
7. Яремийчук Р.С., Качмар Ю.Д. Вскрытие продуктивных горизонтов и освоение скважин. Львов: Вища школа, 1982. 152 с.
8. Shlein G.A., Verisokin A.E., Gunkina T.A., Verisokina A.Yu. Development of a set of technical and technological solutions for oil well injection. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 990 (2022) 012076. 9 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012076>.
9. Dollar F.O. Drill Steam Testing with Jet Pump. *Proceeding of the SPE Latin American Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 14-19 October 1990*. SPE-21117. 4 p.
10. Паневник Д.О. Використання методу конформних відображень для контролю кавітаційних характеристик струминного насоса. *Методи та прилади контролю якості*. 2022. № 1 (48). С. 18–26.

References

1. Chen X.-Y., Cao T., Yu K.-A., Gao D.-L., Yang J., Wei H.-S. Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressure-dominated jet mill bit. *Petroleum Science*. 2020. Published online: 16 June 2020. 14 p. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00472-8>.
2. Anderson I., Freeman R., Pough T. Petroleum technology digest: Hydraulic jet pumps prove well suited for remote Canadian field. *World Oil*. 2006. No 8. P. 71–77.
3. Chen S., Yang D., Zhang Q., Wang I. An integrated Sand cleanout system by employing jet pumps. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2009. Vol.48. № 5. P.17–23.
4. Al-Khalifa H. H., Peeran S., Koleshwar V.S. Successful utilization of surface jet pumps at gas-oil separation plants. *Proceeding of the International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 9-12 November 2015*. SPE-177403-MS. 7 p.
5. Panevnik D.A., Panevnik A.V., Krehel R., Kočiško M. Determination of Jet Pump Performance when Eliminating Borehole Hydrates. *Innovative technologies of oil and gas. Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. (2022). Published: 26 March 2022 (Translated from *Khimiya i Tekhnologiya Topliv i Masel*. 2022. No. 1. January – February P. 73–76.). <https://doi.org/10.1007/s10553-022-01349-9>.
6. Panevnyk O.V., Onatsko R.H. Kontrol ta rehulivannia rezhymu roboty sverdlovynnykh strumynnykh nasosiv. Ivano-Frankivsk: Nova Zoria, 2007. 140 p. [in Ukrainian]
7. Yaremijchuk R.S., Kachmar YU.D. Vskrytie produktivnyh gorizontov i osvoenie skvazhin. L'vov: Vishcha shkola, 1982. 152 p.
8. Shlein G.A., Verisokin A.E., Gunkina T.A., Verisokina A.Yu. Development of a set of technical and technological solutions for oil well injection. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 990 (2022) 012076. 9 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/990/1/012076>.
9. Dollar F.O. Drill Steam Testing with Jet Pump. *Proceeding of the SPE Latin American Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 14-19 October 1990*. SPE-21117. 4 p.
10. Panevnyk D.O. Use of conformal representation method for jet pump cavitation characteristics control. *Methods and devices of quality control*. 2022. No 1(48). P. 18–26.

ВИМОГИ ДО ПОДАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рукописи статей, що подаються до університетських науково-технічних журналів, повинні бути актуальними, зрозумілими, повноцінними, виконаними на високому науково-технічному рівні і відповідати нафтогазовому профілю, містити наукову і практичну новизну, викликати інтерес у читачів наукової спільноти.

Рекомендації щодо написання статті:

Стаття не повинна містити елементів плагіату (включаючи перевидання статті або її частин, подання одночасно в декілька журналів, використання текстів та ілюстрацій без дозволу їх правовласника) і самоплагіату.

Стаття має бути написана грамотно без орфографічних і граматичних помилок.

Стаття повинна бути завершеною, не фрагментарною, логічною, спрямованою на вирішення конкретних цілей і задач нафтогазової проблематики.

Стаття повинна висвітлювати важливі регіональні дослідження, які не можуть бути проведені в іншій місцевості і відображають конкретні географічні, кліматичні, соціально-економічні проблеми.

Стаття здатна як доповнити і розширити бази Scopus і Web of Science, так і зробити новий внесок у нафтогазову галузь науки, сформувані нові дискусійні теми, відкрити нові перспективи співпраці в науковій галузі.

Авторам рекомендується перевіряти кінцеві варіанти статті на помилки, перш ніж повернути виправлений рукопис до редакції, оскільки врахування запізнених поправок не гарантоване.

Відповідальність за зміст статті і коректність викладеного матеріалу несе автор.

До редакції стаття подається он-лайн, після попереднього узгодження тематики статті з проблематикою журналу:

<https://nv.nung.edu.ua> – журнал: "Науковий вісник ІФНТУНГ",

<https://rrngr.nung.edu.ua> - "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ",

<https://nge.nung.edu.ua> - "Нафтогазова енергетика",

<https://mpky.nung.edu.ua> - журнал "Методи та прилади контролю якості",

<https://eung.nung.edu.ua> - журнал "Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості";

<https://ogpe.nung.edu.ua> – журнал «**Journal of Hydrocarbon Power Engineering**»;

<https://ebzr.nung.edu.ua> – журнал «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування».

Електронна пошта редакції: redntv@nung.edu.ua

Стаття повинна бути структурована за такими пунктами:

1. **Назва статті** відтворює її зміст та привертає увагу наукової спільноти, в тому числі міжнародної. Містить не більше 12 слів.
2. **Кількість авторів** – не більше 6 (причому не більше 4 з однієї організації).
3. **Анотація** викладена в одному абзаці (не поділяється на підрозділи), зрозуміла, містить короткий опис проведених досліджень, розкриває основні результати роботи; ціль статті сформульовано коректно.
Обсяг анотації разом із ключовими словами - не менш як 1800 знаків (українською та англійською).
4. **Ключові слова** конкретизують інформацію про дослідження, але не узагальнюють її. Складаються з 3-6 слів, словосполучень, відокремлених за допомогою крапки з комою, не повторюються в назві статті, відповідають змісту роботи.
5. **Вступ** дає змогу оцінити сучасний стан проблеми на світовому рівні. Завершується вступ формулюванням **мети роботи** – «виявити...», «охарактеризувати...», «з'ясувати...».
6. **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**, в яких започатковано вирішення проблеми і на які посилається автор.
7. **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**, якій присвячується стаття.
8. **Формулювання цілей статті** (постановка задачі і методів досліджень, що розглядаються).
9. **Висвітлення основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Розділ дає змогу побачити, що в дослідженнях виключені всі можливі джерела помилок, автор володіє інформацією про всі чинники, що впливають на результат.
Кількість дослідів повинна бути достатньою, об'єм вибірок має відповідати аналогічним дослідженням, опублікованим в міжнародних наукових виданнях. Дослідні дані обробляють коректними статистичними методами (перевагу надавати якомога сучаснішим багатомірним). Аналіз результатів містить достатнє статистичне обґрунтування і відповідає загально визнаним нормам нафтогазової галузі.
10. **Висновки** з проведеного дослідження (наукова новизна, теоретичне і практичне значення):
 - лаконічні, конкретні, відповідають меті і назві статті;
 - дослівно не дублюються у всіх мовних версіях анотацій;
 - не починаються «черговою фразою» (напр., «В результаті проведених досліджень були отримані такі...»);
 - міститься нова інформація, відсутнє перефразування будь яких розділів статті;
 - аргументи логічні і структуровані, дані статті підтверджують і обґрунтовують висновки;
 - висвітлюють перспективи подальшої роботи у даному напрямку;
 - відображають те, як результати корелюють з очікуваннями і більш ранніми дослідженнями. У висновках вказано чи стаття підтверджує чи спростовує вже існуючі теорії і як дослідження вплинуло на процес збагачення наукових знань.

11. Список використаних джерел слід оформити відповідно до правил для авторів, заснованих на ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Також **необхідно подати REFERENCES транслітерацію** літератури

Ресурс для транслітерації з української мови - <http://ukrlit.org/transliterationsia/>

Рекомендований обсяг рукопису статті - від 7 стор.

Електронний варіант статті повинен задовольняти таким вимогам:

1. Стаття набирається у редакторі Microsoft Word на аркуші формату 210x297 мм, поля (мм): верхнє – 20, нижнє – 25, лівє – 30, правє – 15.

2. Порядок набору:

УДК (Times New Roman (Cyr), кегль 11, без абзацного відступу, вирівнювання – зліва).

Назва статті (Arial (Cyr), кегль 14, bold, прописом, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 12 пт).

Ініціали, прізвище автора (співавторів) (Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру). Прізвище відповідального за подання статті автора повинно бути позначене зірочкою.

Назва організації, її повна поштова адреса, адреса електронної пошти (Times New Roman (Cyr), кегль 11, italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка знизу – 12 пт). Якщо автори статті представляють декілька організацій, то необхідно для кожної організації вказати її назву, повну поштову адресу і адресу електронної пошти.

Анотації українською та англійською мовами – кегль (менший від основного тексту статті) – 10, інтервал - 1,0. Об'єм анотації - 1800 знаків кожною мовою.

Основний текст набирається таким чином:

2.1. Стил "звичайний", гарнітура - Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

2.2. Відбивки по тексту не використовуються за винятком підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відокремлюються відбивками "перед" – 9, "після" – 6).

3. Для набирання формул використовується редактор формул **Math Type (версії не нижче 6.x або Equation v. 3.0)** **Стили:** **Text** – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** - Times New Roman (Cyr), italic, **L.C.Greek** – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** - Times New Roman (Cyr), **Number** - Times New Roman (Cyr). **Розміри:** **Full** – 11, **Subscript/Superscript** – 8, **Sub-Subscript/Superscript** – 8, **Symbol** – 14, **Sub-Symbol** – 10.

Забороняється використовувати вбудований у MS Office версій 10 і вище редактор формул!

Для наочності рекомендується формули відокремлювати відбивками зверху і знизу – 6 пт.

Формули komponуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм!!!

4. Таблиці повинні бути складені лаконічно, зрозуміло і містити мінімальні відомості, необхідні для ілюстрування суті статті. Таблиці не повинні дублювати результати, представлені в інших місцях рукопису (наприклад, у вигляді графіків).

Назва таблиці: Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 6 пт.

Таблиці komponуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм або 165 мм !!!

5. Ілюстрації до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані у растровому (векторному) форматах (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF, CDR) і додаватися окремим файлом.

Забороняється використовувати графічний редактор MS WORD!!!

Ілюстрації типу фотографій повинні бути відскановані з роздільною здатністю не менше 400 dpi і/або додаватися в оригіналі.

Усі рисунки, графіки і фотографії можуть бути чорнобілими, кольоровими або півтоновими.

Ілюстрації, перескановані з періодики та накреслені вручну, не приймаються!!!

Підписи до ілюстрацій: Times New Roman (Cyr), кегль 10, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. **Написи в ілюстраціях** виконуються гарнітурою Arial.

Забороняється використовувати аббревіатуру в назвах.

6. Використані автором літературні джерела, на які є посилання у тексті, наводяться у кінці статті загальним списком у порядку згадування. До нього слід включати лише джерела, на які є посилання у статті. У тексті порядковий номер (згідно списку) літературного джерела, на яке посилаються, подається у квадратних дужках, наприклад, [4]. **Обов'язково оформити REFERENCES.**

Додатково до тексту статті додається файл з довідкою про авторів (для присвоєння індексу DOI кожній публікації).

ДОВІДКА ПРО АВТОРА

1. Автор (укр. і англ.) _____
(Прізвище, ім'я, по батькові)
2. Науковий ступінь _____
3. Вчене звання, ID ORCID _____
4. Місце роботи (повна назва організації та адреса укр. і англ.) _____
5. Контактний номер телефону _____

6. Електронна пошта _____
7. Поштова адреса з індексом (на яку необхідно направити примірник збірника наукових праць)

8. Назва публікації (укр. і англ.) _____
9. Анотації двома мовами з ключовими словами (укр., англ.) _____
10. Дата подання статті до редакції _____

Якщо авторів декілька, довідку можна оформити одну з чітким вказанням прізвищ і місця роботи українською і англійською мовами.

Рукописи, які не враховують наведені вище вимоги, повертаються автору без розгляду по суті. Датою надходження рукопису статті в редакцію вважається дата надсилання її кінцевого варіанта.