

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 Карпач 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 Семенцов 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. Rzata 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. Стешок, О. О. Роспопа
Електронна верстка
Б. С. Незамай, О. С. Царева

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 МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА
ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ПРОТЯЖНИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВІДІВ 5

Д. О. Паневник ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ КОНФОРМНИХ
ВІДОБРАЖЕНЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ КАВІТАЦІЙНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМИННОГО НАСОСА..... 18

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

О. Г. Бондаренко ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОНДУЮЧИХ
ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОТЯЖНИХ
ТРУБОПРОВІДІВ 27

О. Г. Малько, А. О. Малько, Г. В. Григорчук АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ
ДИНАМІЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ
ПУЛЬСУЮЧОГО МЕНІСКА..... 36

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Т. О. Ваврик, О. С. Царева, А. В. Семенчук, В. Д. Царев, Л. М. Гобир, Б. С.
Незамай МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ КІНЕМАТИЧНОЇ
В'ЯЗКОСТІ РОЗПЛАВІВ (РІДИН) 44

Т. П. Гут, М. М. Микийчук АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РИЗИКІВ
ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В МЕТРОЛОГІЧНІЙ СФЕРІ..... 50

Є. В. Походило, Ю. А. Стасишин ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
ФАЛЬСИФІКОВАНОЇ ГОРІЛКИ ЗА РЕАКТИВНОЮ КОМПОНЕНТОЮ
АДМІТАНСУ 59

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В. А. Ровінський, О. В. Свчук, Ю. В. Ровінський ВИБІР ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ 66

О. В. Кучмистенко, Р. О. Олексин, М. В. Шавранський, О. І. Белей, О. Ю. Мірзоєва, Р. Б. Стасюк ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТРАНСПОРТУВАННЯ РІДКИХ ПРОДУКТІВ НА ЗАСАДАХ СИСТЕМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ 78

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О. Я. Кравець, Б. С. Незамай, В. І. Михайлів ГЕОМОРФОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОРФОДИНАМІЧНИХ ЗМІН РЕЛЬЄФУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 88

М. В. Крихівський, В. І. Михайлів, Л. В. Саманів ДІАГНОСТИКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СЛУЖБ 97

В. В. Лопатін РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАПАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КІЛ 103

М. І. Козутяк, В. М. Гарасимів, Д. М. Магас ПРОГНОЗУВАННЯ ОБ'ЄМНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ НАГНІТАЧА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ 109

М. І. Горбійчук, Д. Р. Кропивницький ЧИСЛОВИЙ МЕТОД ОБЧИСЛЕННЯ КРИТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОЛОТО ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН 115

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ 127

METHODS AND DEVICES №1 (48) 2022 OF QUALITY CONTROL 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. Gorbichuk, Dr. of Technical Sc.
R. M. Dzhala, Dr. of Technical Sc.
V. V. Drevetskyi, Dr. of Technical Sc.
D. A. Domin, Dr. of Technical Sc.
L. M. Zamichvskyi, Dr. of Technical Sc.
O. M. Karpash, Dr. of Technical Sc.
N. I. Kosach, Dr. of Technical Sc.
Y. M. Kuchirka, PhD.
P. D. Legnyuk, Dr. of Technical Sc.
V. V. Lopatin, Dr. of Technical Sc.
V. A. Luzhetskij, Dr. of Technical Sc.
O. R. Nykyforchyn, Dr. of Phys.-math Sc.
S. I. Osadchy, Dr. of Technical Sc.
M. S. Pasyeka, Dr. of Technical Sc.
A. V. Rudakhova, Dr. of Technical Sc.
G. N. Sementsov, Dr. of Technical Sc.
A. A. Sytnik, Dr. of Technical Sc.
H. M. Suchkov, Dr. of Technical Sc.
V. M. Uchanin, Dr. of Technical Sc.
V. I. Sheketa, Dr. of Technical Sc.
V. A. Yatsuk, 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, O. S. Tsareva

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.
№ 1643

CONTENT

METHODS AND EQUIPMENT OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

- O. G. Bondarenko METHODS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL AND TECHNICAL DIAGNOSIS OF THE STATE OF LONG-TERM TECHNOLOGICAL PIPELINES 5
- D. O. Panevnyk USE OF CONFORMAL REPRESENTATION METHOD FOR JET PUMP CAVITATION CHARACTERISTICS CONTROL 18

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

- O. G. Bondarenko FEATURES OF FORMATION OF PROBING PULSE SIGNALS IN SYSTEMS OF LOW-FREQUENCY ULTRASOUND DIAGNOSIS OF LONG PIPES..... 27
- O. G. Malko, A. O. Malko, H. V. Hrygorchuk ALGORITHM FOR DETERMINATION OF DYNAMIC SURFACE TENSION BY PULSING MENISK METHOD..... 36

METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

- T. O. Vavruk, O. S. Tsareva, A. V. Semenchuk, V. D. Tsarev, L. M. Hobur, B. S. Nezamai MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE KINEMATIC VISCOSITY OF MELTS (LIQUIDS) 44
- T. P. Hut, M. M. Mykyychuk ANALYSIS AND GENERALIZATION OF RISKS OF INNOVATIVE ACTIVITY IN THE METROLOGICAL FIELD 50
- Ye. V. Pohodulo, Yu. A. Stasushun, MEANS OF IDENTIFICATION OF COUNTERFEIT VODKA BY ADMITANTS REACTIVE COMPONENT 59

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

<i>V. A. Rovinskyi, O. V. Yevchyk, V. A. Rovinskyi</i> SELECTION OF REAL-TIME OPERATING SYSTEMS IN THE DEVELOPMENT OF DEVICES FOR TECHNICAL DIAGNOSTICS	66
<i>O. V. Kuchmystenko, R. O. Oleksyn, M. V. Shavrandkyi, O. I. Belei, O. Yu. Mirzoeva, R. B. Stasyuk</i> DESIGN OF SYSTEMS OF MONITORING AND MANAGEMENT OF FACILITY PRODUCTS OF LIQUID PRODUCTS ON THE BASIS OF COMPUTER INTELLIGENCE SYSTEMS	78

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE UNDESTROYED CONTROL PROBLEMS

<i>O. Ya. Kravets, B. S. Nezamai, V. I. Mukhailiv</i> GEOMORPHOLOGICAL MODELING TO DETERMINE MORPHODYNAMIC RELIEF CHANGES USING GEOINFORMATION TECHNOLOGIES	88
<i>M. V. Krykhivskyi, V. I. Mukhailiv, L. V. Samaniv</i> DIAGNOSTICS OF INFORMATION SUPPORT OF ENVIRONMENTAL SERVICES	97
<i>V. V. Lopatin</i> DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF INFLAMMATORY ABILITY OF LOW VOLTAGE MEASURING CIRCLES	103
<i>M. I. Kohutyak, V. M. Garasymiv, D. M. Magas</i> FORECASTING THE VOLUME PRODUCTIVITY OF A SUPPLIER USING CLUSTERIZATION METHODS	109
<i>M. I. Gorbijchyk, D. R. Kropyvnytskyi</i> NUMERICAL METHOD OF CALCULATING THE CRITICAL LOAD ON THE CHILLEL DURING DRILLS	115
REQUIREMENTS FOR THE ARTICLE.....	127

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 621.691.4

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-5-17

МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ПРОТЯЖНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

О. Г. Бондаренко

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

Показано, що серед великої кількості трубопровідних систем (трубопроводів) в різних галузях вітчизняної промисловості одними з найпоширеніших є технологічні трубопроводи, виготовлені з труб середнього діаметру з умовними проходами від 50 до 300 мм. Вони призначені для транспортування рідких, газоподібних і сипучих речовин (продуктів) за різних тисків і температур. Наведена спрощена класифікація технологічних трубопроводів із труб середнього діаметру, які широко застосовуються у нафтовій, газовій, хімічній, металургійній, енергетичній та інших важливих галузях вітчизняної промисловості. Виконано аналіз методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів, які розділено на дві групи – пасивні та активні.

Наведено спрощені класифікації пасивного й активного методів неруйнівного контролю, які за розміром контрольованої зони розділені на локальні та регіональні. Виконано аналіз застосування пасивних методів неруйнівного контролю для виявлення зон концентрації напружень, а активних – для виявлення дефектів корозії, потоншення стінки труби та стрес корозійного розтріскування технологічних трубопроводів. Показано, що серед активних методів неруйнівного контролю протяжних технологічних трубопроводів найбільше поширення отримав метод низькочастотного УЗК спрямованими хвилями. Розроблена класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі в структурі протяжного технологічного трубопроводу.

Ключові слова: технологічний трубопровід, методи неруйнівного контролю, пасивні та активні, відбивачі.

It is shown that among the large number of pipeline systems (pipelines) in various branches of domestic industry the technological pipelines made of medium diameter pipes with conditional passages from 50 to 300 mm are one of the most common. They are designed to transport liquid, gaseous and bulk substances (products) at different pressures and temperatures. A simplified classification of technological pipelines from medium diameter pipes, which are widely used in oil, gas, chemical, metallurgical, energy and other important branches of domestic industry, is given. Analyzed non-destructive testing methods of technological pipelines divided into two groups - passive and active.

Simplified classifications of passive and active NDT methods are given, which are divided into local and regional according to the size of the controlled zone. The analysis of application of passive methods of non-destructive testing for detection of stresses concentration zones, and active - for detection of defects of corrosion, thinning of a wall of a pipe and stress of corrosion cracking of technological pipelines is executed. It is shown that among the active methods of non-destructive testing of long technological pipelines the method of low-frequency ultrasound with directional waves has become the most widespread. The classification of typical reflectors of low-frequency directional wave in the structure of a long technological pipeline is developed.

Key words: technological pipeline, methods of non-destructive testing, passive and active, reflectors.

Вступ. Трубопровідні системи (трубопроводи) є одним із найпоширеніших видів зварних конструкцій і знаходять широке застосування в різних галузях народного господарства України. Через різну пропускну здатність розміри (діаметри) трубопроводів коливаються у великому діапазоні. Для скорочення кількості розмірів труб, арматури та з'єднувальних елементів, забезпечення прохідних перерізів трубопроводів

введено поняття умовного проходу, під яким розуміють розрахунковий округлений діаметр трубопроводу. В різних галузях народного господарства при створенні трубопроводів застосовуються труби з умовними проходами від 6 до 2000 мм. Серед великого різноманіття протяжних трубопровідних систем одним із найпоширеніших є зварні технологічні трубопроводи із труб середнього діаметру з умовними проходами від 50 до 300 мм. Вони призначені для транспортування рідких, газоподібних і сипучих речовин (продуктів) при різних тисках та температурах. Такі трубопроводи виготовляються із металу, склопластику, пластмас та інших матеріалів, які все частіше застосовуються замість металу. Але найбільш проблемними ще тривалий час будуть залишатися металеві технологічні трубопроводи.

Класифікація протяжних технологічних трубопроводів середнього діаметра. Технологічні трубопроводи із труб середнього діаметра складають значну частину обладнання промислових установок підприємств нафтової, газової, хімічної, металургійної, енергетичної та інших важливих галузей народного господарства. Вони є одними із найбільш відповідальних та металомістнісних споруд любого промислового об'єкту, що здійснюють зв'язок між машинами, апаратами та виробництвами й забезпечують неперервність технологічних процесів.

На рис. 1 приведена спрощена класифікація протяжних трубопроводів із труб середнього діаметра, що застосовуються в різних галузях вітчизняної промисловості

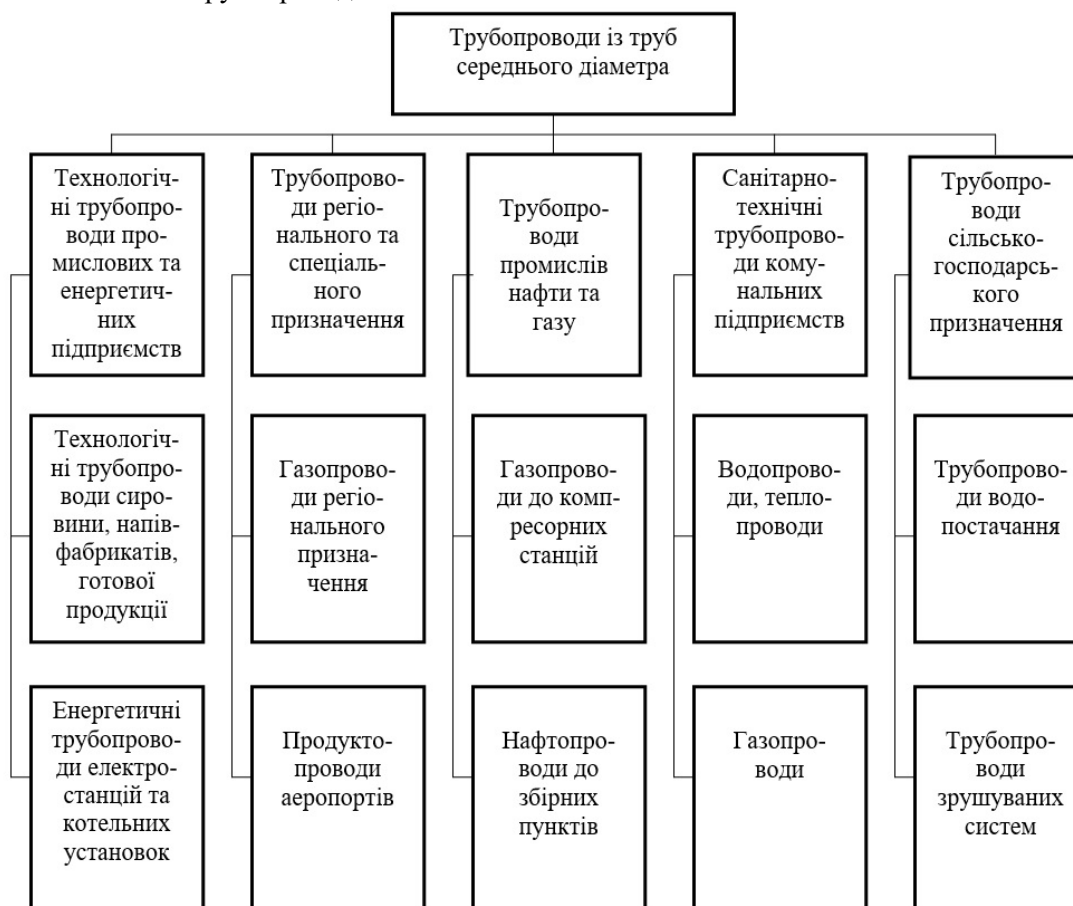


Рисунок 1 – Спрощена класифікація технологічних трубопроводів із труб середнього діаметра

У залежності від галузі народного господарства протяжні трубопроводи із труб середнього діаметра розділені нами на: технологічні трубопроводи промислових та

енергетичних підприємств; трубопроводи регіонального та спеціального призначення; трубопроводи промислів нафти та газу; санітарно-технічні трубопроводи комунальних

підприємств; трубопроводи сільськогосподарського призначення.

До більшості технологічних трубопроводів різного призначення пред'являються підвищені вимоги, які пов'язані з додержанням визначених правил при їх проектуванні, виготовленні та монтажі. Це пов'язано з тим, що від якості трубопроводів, їх міцності та працездатності залежить надійність та довговічність різних промислових об'єктів, будинків і споруд. Ці вимоги в рівній мірі відносяться як до технологічних трубопроводів виробничих підприємств, де аварія трубопроводу може призвести до втрат продуктів транспортуванням, вибухам і катастрофам, так і до трубопроводів водо-, тепло- і газопостачання комунального господарства, коли аварії в цих трубопроводах також призводять до важких наслідків. Особливо це стосується експлуатації фізично застарілих трубопроводів з величезними запасами потенційної енергії вибухонебезпечних і отрутних продуктів, тому що ймовірність і небезпека аварійних ситуацій у цих випадках транспортування призводить до локальних і загальних забруднень навколишнього середовища, величезним матеріальним втратам і створює підвищений ризик з погляду персоналу й населення.

На даний час в Україні спостерігається суттєве зношування значної кількості технологічних трубопроводів, що практично стає проблемою гарантування їх надійності та роботопридатності. В цих умовах задача контролю та діагностування технічного стану технологічних трубопроводів переростає в одну із головних виробничих проблем. Велика кількість різноманітних технологічних трубопроводів, старіння, різноманітність умов експлуатації, велика небезпека аварійних відмов обумовлюють необхідність розвитку та розширення сфер застосування фізичних методів та засобів неруйнівного контролю як якості труб, так і методів та засобів діагностування технічного стану трубопроводів шляхом визначення параметрів дефектів несучільностей у тілі труб на основі даних, отриманих в процесі виконання процедури неруйнівного контролю (НК).

Методи неруйнівного контролю технологічних трубопроводів. Однією з головних причин всіх аварій та технологічних

трубопроводах різного призначення є несвоєчасне забезпечення відповідних служб підприємств необхідними сучасними засобами та методиками для проведення процедур неруйнівного контролю з метою отримання хоча б якоїсь оцінки поточного технічного стану трубопроводів.

Відомо, що протягом довгого часу існує стандартизована класифікація методів неруйнівного контролю, яка враховує декілька кваліфікованих критеріїв. Така класифікація методів НК носить формальний характер і швидше всього розділяє весь багатовид методів та засобів НК за способом виділення ефекту ніж з типом фізичного поля. На даний час у науково-технічній літературі розповсюджені усталені класифікації для окремих видів контролю, наприклад, акустичного неруйнівного контролю [1, 2]. Згідно з цими класифікаціями акустичні методи НК розділено на дві великі групи – пасивні та активні.

Пасивні методи ґрунтуються на прийманні акустичного сигналу чи коливання, джерелом яких служить сам об'єкт, а активні – на випромінюванні та прийманні акустичного сигналу чи коливання.

При проведенні процедур неруйнівного контролю та діагностування технічного стану протяжних технологічних трубопроводів важливим є виявлення дефектів та визначення їх розмірів для оцінки остаточного ресурсу трубопроводів. Але не менш важливим є виявлення локальних зон пошкоджень, що розвиваються, тобто зон концентрації напружень (ЗКН), виявлення найбільш небезпечних ЗКН, визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) у найбільш небезпечних ЗКН, а також визначення фактичних структурно-механічних характеристик матеріалу в ЗКН та оцінка швидкості і напрямку розвитку пошкоджень у експлуатуємому трубопроводі.

Звідси випливає, що основним призначенням неруйнівних методів контролю є отримання інформації в об'ємі, необхідним та достатнім для діагностування технічного стану трубопроводу й виконання розрахунків його залишкового ресурсу. При цьому бажано було б забезпечити стовідсотковий контроль та діагностування трубопроводу з метою гарантованого виявлення найбільш небезпечних ЗКН та пошкоджень, що розвиваються.

Для цього необхідно використовувати різноманітні методи НК, які базуються на різних фізичних полях. Тому класифікувати ці методи треба за типом фізичного поля, який можна віднести до наведених вище двох груп [3]:

- пасивні – які використовують власні фізичні поля, що відображують внутрішню енергію матеріалу трубопроводу;
- активні – з створення в матеріалі труби «примусового» фізичного поля заданої орієнтації.

Класифікація методів НК як пасивних та активних створює передумови для об'єктивної класифікації виявляємих дефектів на небезпечний, що розвивається, та на безпечний, що не розвивається.

На рис. 2 наведена спрощена класифікація пасивних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів.

Призначенням пасивних методів НК є проведення раннього діагностування технологічних трубопроводів шляхом

виявлення ЗКН як основних джерел пошкоджень, що розвиваються у трубопроводі.

За величиною контрольованої зони пасивні методи контролю розділено на локальні та регіональні. До локальних методів неруйнівного контролю за видами, що використовують вимірювання власних фізичних полів матеріалу трубопроводу, можна віднести магнітні та теплові методи. Серед пасивних магнітних видів контролю на даний час найбільше розповсюдження отримали метод магнітної пам'яті металу (МПМ) та метод магнітопружного ефекту (МПЕ). Серед теплового виду контролю все більше розповсюдження отримує тепловізійний метод контролю. За допомогою наведених пасивних методів контролю можна контролювати зону трубопроводу, яка знаходиться під давачем технічного засобу. Локальні пасивні методи контролю використовуються для виявлення зон концентрації напружень (ЗКН) у протяжних технологічних трубопроводах.

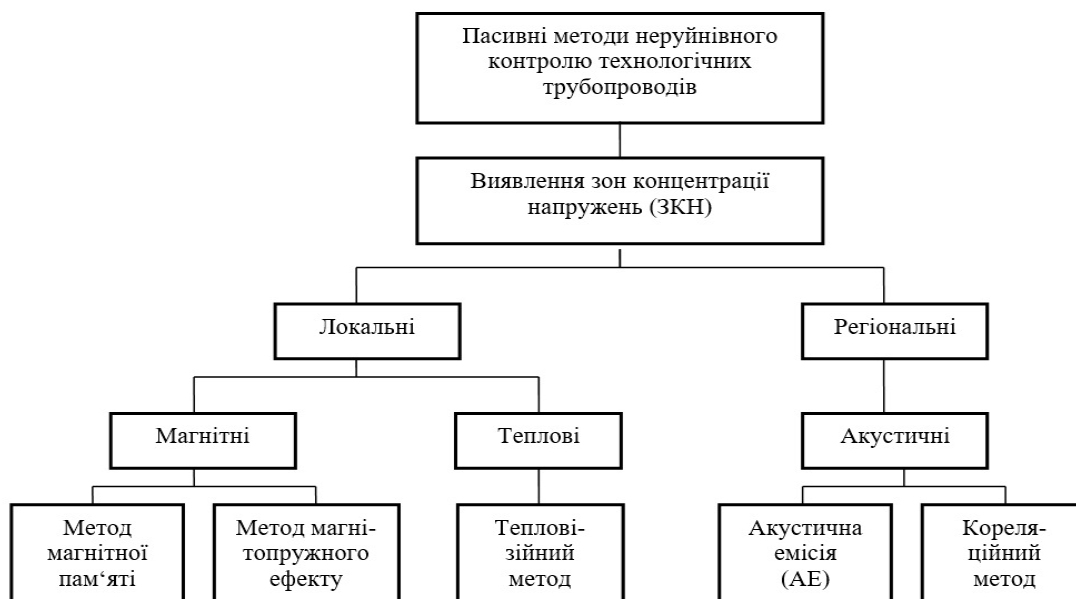


Рисунок 2 – Спрощена класифікація пасивних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів

Серед акустичного виду контролю найбільше розповсюдження отримали метод акустичної емісії (АЕ) та кореляційний метод, які віднесені до регіональних за величиною контрольованої зони. За допомогою цих методів можна фіксувати інформацію про технічний

стан трубопроводу на значній його ділянці за довжиною.

Метод МПМ отримав значне поширення для визначення напружено-деформованого стану (НДС) на окремих ділянках технологічного трубопроводу, що приводить до появи ЗКН та розвитку ушкоджень у металі стінки труби.

Перебуваючи в експлуатації протягом досить тривалого часу, піддаючись температурним і механічним впливам, обумовленим коливанням земної кори, труби в магнітному полі землі намагнічуються. Це значить, що труба буде мати своє власне постійне магнітне поле, що замикається усередині тіла труби. Якщо в перетині труби має місце порушення несучильності (дефект, корозійне ураження), що приводить до зміни намагніченості, то в цих місцях труби магнітне поле спотворюється, виникають магнітні полюси, утворюється магнітне поле розсіювання, тобто виникає, так звана, магнітна аномалія [4]. Магнітне поле розсіювання від дефекту тим більше, чим більше дефект і чим він ближче до поверхні, над якою проводиться вимір. При цьому маленькі тріщини створюють різкі й вузько локалізовані градієнти поля. Дефекти типу корозійних уражень, що представляють більші ушкодження поверхні й положень країв, не створюють різких градієнтів поля.

При діагностуванні любых об'єктів з використанням МПМ основною ознакою (якісним критерієм) зон концентрації напружень є наявність в контрольованій зоні ліній, які характеризуються зміною знаку нормальної складової магнітного поля розсіювання. Для кількісної оцінки рівня концентрації напружень визначається градієнт (інтенсивність зміни) нормальної складової поля. В якості зразка (еталона) для порівняння в методі МПМ використовується магнітограма, яка вимірюється у зонах із задовільним станом методу, тобто поза зоною ЗКН. На основі порівняння магнітограм в ЗКН і поза нею робиться оцінка НДС технологічного трубопроводу.

В останні роки велику зацікавленість проявляють до пасивного методу контролю напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, який ґрунтується на кореляції магнітних та механічних параметрів металів [5]. У технологічних трубопроводах напружено-деформований стан частіше всього виникає в місцях згину труби внаслідок перевантажень, що пов'язані з приростом стискальних та розтягуючих напруг на діаметрально протилежних сторонах труби. В цьому випадку можна очікувати, що при згині труби, в умовах

неоднорідності напруженого стану, порівняльна оцінка магнітних властивостей труби по її периметру може виявитися достатньо інформативною. Це пов'язано з тим, що оскільки кругове направлення у розподіленні напруг співпадає з профілем труби, то за картою зміни магнітних властивостей можна вказати величину та напрямок силового діяння по периметру труби.

Отримання даних про напружений стан труби на окремих ділянках технологічного трубопроводу є достатньо важливою складовою частини їх діагностики. Цу дозволить вказати шляхи усунення перевантажень та проконтролювати їх зміну внаслідок проведення відновлювальних робіт.

Для контролю НДС труб в місцях їх згину запропоновано використовувати пасивний механічний метод, в основі якого лежить магнітопружний ефект (МПЕ) – фізичне явище, що базується на зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією механічних сил [6, 7]. Технологічні трубопроводи можуть випробовувати непроектні згинні навантаження, які пов'язані з опуклістю або осіданням опор, що характерно для місць з нестійкими ґрунтами, а також зазнавати дії навантажень, що виникають внаслідок помилок монтажу при будівництві. В цьому випадку з'явлення напружень згину може бути виявлено при контролі основних напруг, на основі яких в залежності від їх рівня оцінюють міцність та стійкість трубопроводів у повздовжньому напрямку. Високі повздовжні напруги небезпечні головним чином для ділянок з дефектами зварювання стиків, оскільки наявність дефектів знижують несучу можливість трубопроводу у основному напрямку та можуть привести до його руйнування.

Даний метод магнітопружного ефекту є одним із способів усунення згину та повернення трубопроводів у початковий розвантажувальний стан. Він може служити способом регулювання опорних елементів для досягнення симетричної однорідної картини напруженого стану труби в контролюємому перерізі. В результаті проведення дослідно-промислового випробування способу зниження напруг при виконанні ремонтних робіт на трубопроводах вдалося за картою неоднорідного

розподілення магнітних властивостей, що мали місце ознак перевантажень, шляхом регулювання опор добитись положення трубопроводів із симетрією магнітних властивостей труб, з мінімальним вигином та низьким рівнем напруг [7].

Відомо, що виникнення в об'єкті контролю НДС може супроводжуватися зміною температури у зоні концентрації напружень, в результаті чого відбувається теплове випромінювання, яке формує температурне поле. Це поле несе інформацію про внутрішню структуру об'єкта, яке може бути проконтрольоване за допомогою пасивного виду теплового неруйнівного контролю з застосуванням тепловізійного методу [8]. Цей метод можна успішно використовувати для виявлення НДС технологічних трубопроводів.

Серед пасивних регіональних методів НК технологічних трубопроводів найбільше розповсюдження отримали методи акустичної емісії (АЕ) і кореляційний метод.

У пасивному методі акустичної емісії (АЕ) реєструють параметри пружних коливань, що виникають в об'єкті контролю під час його функціонування або під впливом стимулюючих (сторонніх) дій. Цей метод базується на аналізі параметрів біжучих пружних хвиль акустичної емісії, які випромінюються самим матеріалом внаслідок внутрішньої динамічної локальної перебудови його структури. Така перебудова викликана рухом груп дислокацій, зародженням і розвитком тріщин, алотропічними перетвореннями в кристалічній ґратці. Відслідковуючи такі параметри, як кількість імпульсів за одиницю часу, частоту випромінювання, амплітудний і спектральний розподіл, діаграму розсіювання тощо, отримають інформацію про стан матеріалу трубопроводу, зміни в ньому, виникнення та розвиток дефектів типу тріщин і т.п. Особливості застосування методу акустичної емісії можна знайти у науково-технічній літературі [9 – 11].

Для визначення місць пошкоджень стінки труби, які визиваються корозією і ерозійним зношенням стінки, а особливо для пошуку витоків продуктів із протяжних трубопроводів в різних країнах світу одержав поширення пасивний кореляційний метод [12]. Особливо це стосується протяжних технологічних

трубопроводів систем газо-, нафто-, тепло-, водопостачання, а також трубопроводів на недоступних ділянках їхньої прокладки типу переходів під дорогами, залізничними коліями й ін. На таких ділянках трубопроводи прокладаються в захисні труби – гільзи, тому відсутня можливість доступу або істотно утруднений доступ до діагностуємої труби.

Сутність методу полягає в тому, що з обох боків ділянки трубопроводу, що діагностується, встановлені два датчики для перетворення в електричний сигнал гідравлічних хвиль, які створює середовище, що витікає під тиском з отвору в стінці труби. Сигнали від датчиків передаються з вхідних електронних блоків в обчислювальний блок, що визначає різницю часу приходу хвиль від витоків до датчиків, яка знаходиться обчисленням й обробкою кореляційної функції. Часова затримка між сигналами, що відповідає максимуму кореляційної функції, характеризує місце розташування витоків. Аналогічним чином визначаються дефекти стоншення стінки труби, що визиваються корозією та ерозійним зношенням.

Призначенням активних методів є виявлення дефектів корозії, стрес-корозійного розтріскування й уточнень стінки труби (втрат металу в перетині труби), які можуть виникати за рахунок корозії або ерозійного зношення, а також місць розташування дефектів по довжині технологічного трубопроводу.

За величиною контрольованої зони активні методи неруйнівного контролю також можна розділити на локальні та регіональні. До локальних методів неруйнівного контролю за видами, що створюють в матеріалі труби «примусове» фізичне поле заданої орієнтації, можна віднести акустичні, магнітні та рентгенографічні. Серед активних локальних методів для визначення дефектів найчастіше використовуються ультразвукова та магнітна товщинометрія. Ці методи дозволяють за допомогою давачів технічного засобу вимірювати втрати металу труби в місті дефекту у локальних зонах.

Серед регіональних активних методів найбільш поширеним є акустичний вид контролю, до якого на даний час можна віднести кореляційний метод та метод низькочастотного ультразвукового контролю

спрямованими хвилями. Ці методи дозволяють виявляти наявність дефектів стінки труби на значній відстані від установки датчиків.

На рис. 3 наведена спрощена класифікація активних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів.

Локальні ультразвуковий та магнітний методи контролю дозволяють проводити обстеження технічного стану технологічних трубопроводів при односторонньому доступі до їх поверхні.

За допомогою цих методів із застосуванням ультразвукової та магнітної товщинометрії вимірюється зменшення стінки труби, що виникає в процесі експлуатації трубопроводів різного призначення. Контроль таких трубопроводів може виконуватися під час планових ремонтів та засвідчувати про кородування внутрішньої поверхні труб та погіршення їх міцнісних характеристик.



Рисунок 3 – Спрощена класифікація активних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів

В роботі [13] розглянуто засоби та розроблені методики контролю технологічних трубопроводів засобами ультразвукової товщинометрії, які дозволяють виявляти корозійні ураження на внутрішній поверхні труби, характер та стадії корозії, визначати ступінь виразковості та глибину окремих

виразкових уражень. Для досліджень було підготовлено набір зразків труб із різною глибиною та характером корозійного ураження поверхні. Для досліджень використовувалися зразки труб, вирізані із ділянок трубопроводів зовнішнім діаметром 102 мм, що знаходилися в

експлуатації. Внутрішня поверхня зразків відрізнялась ступенем та характером корозії.

Треба відмітити, що виникнення корозійних уражень, як виразкової корозії, є випадковою функцією як параметрів металу (структури, текстури, товщини тощо), так і параметрів агресивного середовища (хімічного складу, температури, тиску, швидкості потоку, часу дії тощо). Всі ці параметри діють незалежно й, додаючись, формують закон розподілення корозійних уражень трубопроводів.

Враховуючи, що на виробництві під час зупинки трубопроводів необхідно проводити 100%-ний контроль поверхні труби, то при дослідженні металу зразків труб ультразвуковими товщино мірами треба проводити вимірювання через 10 – 20 мм. Загальна кількість вимірювань на кільці труби шириною 150 – 180 мм складала менше 30 – 40 точок. Тому провести неруйнівний контроль протяжних технологічних трубопроводів засобами ультразвукової та магнітної дефектоскопії за час виведення із експлуатації практично неможливо.

Тому на даний час почали інтенсивно розвиватися активні регіональні методи неруйнівного контролю протяжних трубопроводів із труб середнього діаметра. До таких методів можна віднести:

- кореляційний метод визначення показника усередненого утонення стінок трубопроводів шляхом генерування шумоподібних поперечних гідравлічних хвиль типу гідроудару антеною-передавачем і прийому відбитих від дефектів луно-сигналів двома датчиками, установленими на кінцях діагностуємої ділянки;

- метод низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями шляхом генерування поздовжніх або крутильних хвиль із однієї точки установки перетворювачів акустичної антени на діагностуемій ділянці трубопроводу й прийому відбитих від дефектів луно-сигналів тими ж перетворювачами.

За допомогою регіональних методів контролю здійснюється виявлення місць розміщення корозійних уражень та ерозійного зносу стінок труби на окремих ділянках протяжних трубопроводів. Для уточнення розмірів та глибини цих уражень стінки труби застосовуються локальні методи ультразвукової та магнітної товщинометрії, тощо.

Кореляційний активний метод контролю параметрів стоншення стінки труби та координат витоків продуктів із трубопроводу відрізняється від пасивного тим, що швидкість поширення гідравлічних хвиль для кожного конкретного

трубопроводу визначається експериментальним шляхом. Для цього система контролю у своєму складі має додатковий синтезатор зондувальних сигналів і нову модифіковану програму обробки сигналів [12].

Активний кореляційний метод не тільки дає можливість проводити визначення реальних значень швидкості поширення гідравлічних хвиль у трубопроводі, який діагностується, для забезпечення необхідної точності визначення місць витоків продуктів із трубопроводу, але й відкриває додаткові можливості порівняння з пасивним методом контролю. Так, активний кореляційний метод дозволяє визначати усереднене потоншення стінки труби на діагностуемій ділянці трубопроводу, визване її корозією або ерозійним зношенням, що дозволяє проводити оцінку загального технічного стану протяжного трубопроводу.

Істотним прогресом у розвитку регіональних активних методів контролю технічного стану протяжних трубопроводів стала розробка технології й систем дистанційної дефектоскопії протяжних трубопроводів з використанням методу далекодіючого низькочастотного ультразвукового контролю (НЧ УЗК) спрямованими хвилями. Найбільший розвиток така технологія контролю трубопроводів різного призначення одержала в середині 1990 років в Англії [14], США [15], а потім у Японії [16]. Аналіз основних характеристик та особливостей низькочастотного ультразвукового хвильового процесу в тілі середовища протяжного трубопроводу при контролі його технічного стану наведені в роботі [17].

Значною перевагою цього методу перед традиційними методами УЗК є те, що він може бути використаний як при експрес-контролі технічного стану трубопроводів різного призначення після їхнього монтажу шляхом формування первісної дефектограми трубопроводу, так і при здійсненні поточних процедур контролю в процесі їх експлуатації.

Сучасні системи низькочастотного УЗК у своїй більшості оснащені відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє на основі отриманих даних контролю проводити процедуру діагностування технічного стану протяжних трубопроводів. Узагалі процес визначення технічного стану любих промислових об'єктів характеризується комплексністю підходів, яка полягає у використанні різних науково-технічних дисциплін технічної діагностики, методів і засобів неруйнівного контролю та технічного

діагностування й носить назву контрольно-діагностичного процесу [12]. В основі контрольно-діагностичних процесів лежать відповідні контрольно-діагностичні технології, за допомогою яких забезпечується мінімізація методів і засобів неруйнівного контролю та технічного діагностування і достовірність визначення технічного стану промислового об'єкта на всіх етапах його функціонування з видачею науково-обґрунтованого прогнозу щодо тривалості та ресурсу його експлуатації

Структура контрольно-діагностичного процесу залежить від виду промислового об'єкта. Тому можна вважати, що об'єкт, методи і засоби, що застосовуються для визначення його технічного стану, в своїй сукупності утворюють систему визначення технічного стану любого промислового об'єкта. Розробка структури контрольно-діагностичного процесу на основі системи низькочастотного УЗК протяжних трубопроводів надає можливість створення інформаційної бази про їх технічний стан та розрахунку експлуатаційного ресурсу трубопроводів.

Багато проблем неруйнівного контролю та технічного діагностування різноманітних технологічних трубопроводів можуть бути вирішені шляхом застосування систем низькочастотного УЗК спрямованими хвилями. На відміну від протяжних магістральних трубопроводів технологічні трубопроводи складаються із значної кількості різноманітних щільно з'єднаних між собою структурних трубопровідних елементів: відрізків труб необхідної довжини та різних видів трубних відводів від них, з'єднаних за допомогою зварювання, запірно-регулюючої арматури, контрольно-вимірювальних приладів, засобів автоматизації, опор і ущільнених, інших різноманітних конструктивних елементів, необхідних для забезпечення роботоздатності технологічного трубопроводу.

Саме структурні трубопровідні елементи, зварні з'єднання, а також так звані експлуатаційні несучільності, що виникають у металі труб – корозійні ураження зварних з'єднань, стінки труби та її ерозійний знос, є потенційними відбивачами низькочастотних спрямованих хвиль в процесі проведення процедур неруйнівного контролю та технічного діагностування стану трубопроводів різного призначення. Тому першим етапом з розробки

контрольно-діагностичного процесу технологічних трубопроводів можна вважати класифікацію типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі у структурі технологічного трубопроводу.

Класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі у структурі технологічного трубопроводу.

На основі аналізу структур технологічних трубопроводів розроблена класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі, яка наведена на рис. 4. Усі відбивачі технологічного трубопроводу розділено на три типи: технологічні, конструктивні та експлуатаційні. Така кваліфікація обумовлена перш за все тими особливостями низькочастотного хвильового руху в середовищі стінки труби, коли в ній збуджуються й розповсюджуються вісьосиметричні (поздовжня та крутильна) низькочастотні спрямовані хвилі. Але в залежності від типу відбивачів відбита від них низькочастотна хвиля може бути або симетричною або асиметричною. Тому в подальшому в класифікації типові відбивачі розбиваються на два типи: симетричні та асиметричні, або тільки асиметричні, якими є експлуатаційні відбивачі.

До технологічного типу симетричних відбивачів відносяться зварні з'єднання трубопроводу, які формуються по усьому діаметру труби та товщині стінки труби в процесі стикування між собою труб і патрубків, а також стикування з трубою відводів трубопроводу, переходів, фланців, заглушок, компенсаторів. Зварні з'єднання таких елементів у структурі трубопроводу проводять до симетричного збільшення товщини стінки труби, тобто мають необхідну добавку, яка симетрично змінює геометричну форму поперечного перерізу труби. В той же час при приєднанні до тіла труби трійників за допомогою процесу зварювання їх зварні з'єднання віднесені до асиметричних відбивачів у зв'язку з стикуванням до тіла труби тільки на частині труби по її діаметру, що приводить до асиметричної зміни її поперечного перерізу. До конструктивного типу симетричних відбивачів відносяться фланці, відводи, заглушки та компенсатори, які стикуються з трубою по усьому її поперечному перерізу. Різного роду опори та підвіски труб віднесені до асиметричних конструктивних елементів трубопроводів.

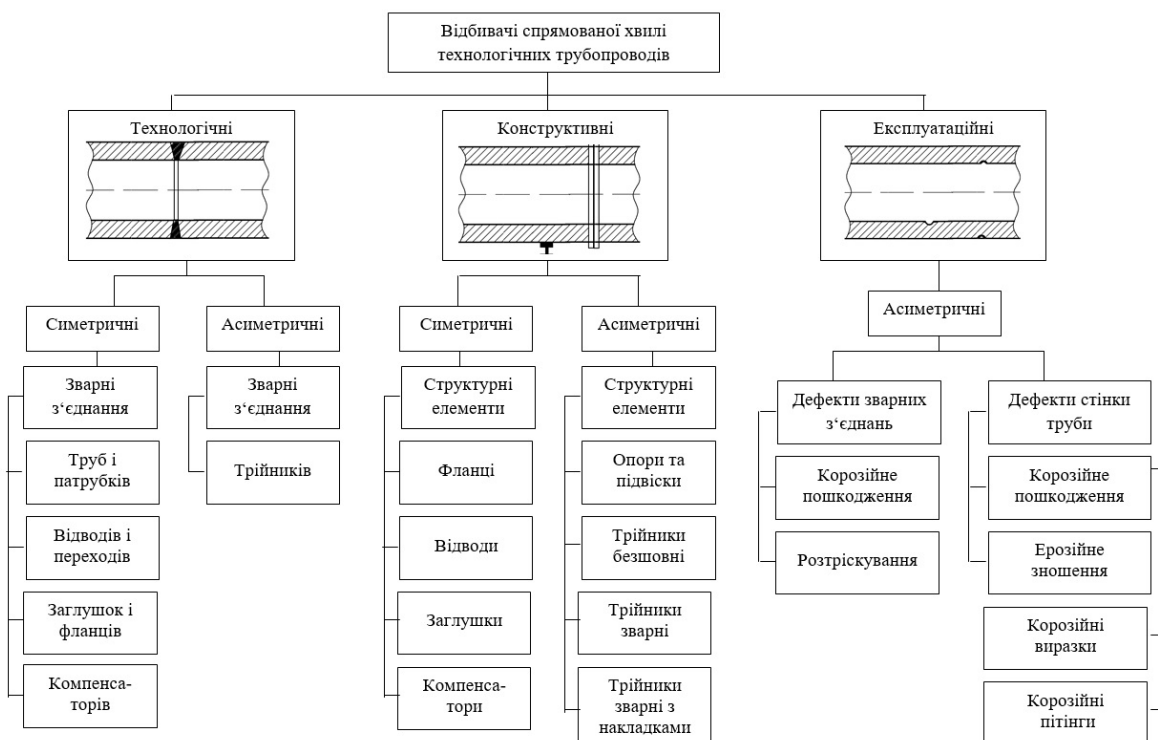


Рисунок 4 – Класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі у структурі технологічних трубопроводів

Вони приводять до збільшення товщини стінки труби в окремих місцях, тобто в місцях кріплення труби. До асиметричних конструктивних відбивачів відносяться також безшовні та зварні трійники, які зменшують поперечний переріз труби, та зварні трійники з накладками. Останні є добавками до стінки труби і тому зменшують її товщину та зменшують геометричну форму поперечного перерізу труби.

Місце розміщення конструктивних елементів у структурі протяжного трубопроводу відомі згідно з технічною документацією на трубопровід, тому відбиті луно-сигнали від технологічних та конструктивних відбивачів будуть створювати цілу систему таких сигналів збуджуваної в трубопроводі низькочастотної спрямованої хвилі. Відбиті сигнали від цих відбивачів є важливими мітками для визначення місця розташування експлуатаційних відбивачів, які відносяться до асиметричного виду відбивачів.

Досвід тривалої експлуатації та технічного діагностування технологічних трубопроводів

засвідчують, що в таких трубопроводах зростає кількість експлуатаційних пошкоджень зварних з'єднань та стінки труби, які в основному мають корозійно-механічну природу і утворюються, в першу чергу, в місцях підвищеної концентрації напружень.

Аналіз експлуатаційних пошкоджень трубопроводів різного призначення показує, що основними характерними особливостями процесів їх розвитку є певна локалізація. Тому такі пошкодження, що виникають в трубопроводі, розділені нами на дефекти зварних з'єднань та дефекти стінки труби.

Дефекти зварних з'єднань можуть бути спричинені технологією виготовлення протяжного трубопроводу. Але найбільше дефектів зварних з'єднань, до яких відносяться корозійне пошкодження та розтріскування у зварному шві, виникають під час експлуатації трубопроводів. В процесі діагностування трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями вони будуть ідентифікуватися синхронно зі зварними швами.

Локалізація пошкоджень стінки труби залежить від особливостей стану металевої

поверхні труби, що спричинена існуванням на поверхні металу певних неоднорідностей чи включень, які приводять до утворення локальних корозійно-ерозійних втрат металу в стінці труби.

Такі ділянки експлуатаційних пошкоджень стінки труби відносяться до асиметричних відбивачів трубопроводу й будуть розташовуватися в різних місцях по траєкторії розповсюдження низькочастотної спрямованої хвилі по трубопроводу. Найбільш характерними ерозійними пошкодженнями стінки труби можуть бути корозійні виразки, пітинги тощо, що виникають в результаті довготривалої експлуатації технологічних трубопроводів, особливо в агресивних умовах. Із цих корозійних пошкоджень особливо небезпечними є пітинги, які можуть пронизувати всю товщину стінки труби. Корозійні пошкодження стінки труби є експлуатаційними концентраторами напружень, що можуть привести до руйнування трубопроводів.

Корозійні пошкодження стінки труби орієнтовані як уздовж окружності труби, так і уздовж поздовжньої вісі труби. Вони можуть перебувати на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труби, однак розпізнати, яка саме ця поверхня за допомогою низькочастотної спрямованої хвилі неможливо. Пошкодження стінки труби, обумовлені ерозійним зношенням, найчастіше орієнтовані уздовж поздовжньої вісі труби й розташовані з боку внутрішньої поверхні.

Для ідентифікації місця розміщення асиметричних експлуатаційних відбивачів у протяжному трубопроводі за відбитими луно-сигналами спрямованої хвилі служать луно-сигнали від технологічних та конструктивних відбивачів.

Крім розглянутих відбивачів низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль, у протяжних трубопроводах внаслідок тривалої експлуатації можуть проявлятися дефекти, зумовлені відхиленнями від вимог технології та стандартів під час заводського виробництва труб [18]. Це призводить до появи на їх поверхнях різноманітних подряпин, задирок та рисок, які надалі відіграють роль ефективних концентраторів напружень, закладених на етапі виготовлення труб. Якщо ці концентратори знаходяться в зоні термічного впливу зварного з'єднання, або біля неї, то в

подальшому вони можуть слугувати джерелом зародження та поширення в трубі тріщин, зумовлених корозійним розтріскуванням.

Якщо амплітуди відбитих сигналів спрямованої хвилі від подряпин, задирок та рисок будуть знаходитися на рівні завад, то дефекти корозійного розтріскування стінки труби (особливо поперечні) будуть виявлятися спрямованими хвилями. Окрім цього, після неякісного зварювання в зварних з'єднаннях труб можлива поява підрізів, непроварів та шлакових включень, які також є потенційними концентраторами напружень, біля яких можуть зароджуватись тріщино подібні дефекти.

Однак основними в протяжних трубопроводах слід вважати дефекти корозійної та корозійно-механічної природи, які становлять більше половини всіх пошкоджень стінки труби. Вони, в першу чергу, пов'язані із втратою з часом експлуатаційних властивостей захисних покриттів, що приводить до виникнення умов, які активізують корозію металу труб. У результаті цих процесів на поверхні металу починають розвиватися корозійно-механічні дефекти у вигляді пітингів, виразок та каверн. Слід відзначити, що не зважаючи на різну природу експлуатаційних дефектів, зумовлених відшаруваннями захисних концентраторів напружень, всі види є типовими прикладами постійних концентраторів напружень, тобто місцями зародження руйнувань труби.

Розроблена класифікація відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі технологічних трубопроводів дозволяє на її основі сформулювати контрольні та діагностичні образи експлуатаційних відбивачів з метою визначення технічного стану трубопроводів з використанням систем далекодуючого УЗК.

Висновки.

1. Показано, що технологічні трубопроводи із труб середнього діаметра складають значну частину обладнання підприємств нафтової, газової, хімічної, металургійної, енергетичної та інших важливих галузей народного господарства України.

2. Для оцінки технічного стану технологічних трубопроводів використовуються різноманітні методи неруйнівного контролю, які можна розділити на пасивні та активні.

3. Найбільш перспективним для визначення технічного стану технологічних трубопроводів

можна вважати розробку контрольно-діагностичного процесу на основі активних регіональних систем низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями.

Список використаних джерел

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филатов и др.; Под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.

2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика /Під ред. З.Т.Назарчука. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2001. 1134 с.

3. Дубов А.А., Власов В.Т. О Классификации методов НК. В мире неразрушающего контроля. 2007. № 3. С. 63-64.

4. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО «Тиссо», 2004. 424 с.

5. Кулаев В.Г. Распределение намагниченности в длинных ферромагнитных стальных трубах, помещенных в любое магнитное поле, при их упругом и пластическом изгибах. *Дефектоскопия*. 2002. № 6. С. 65-80.

6. Садртдинов Р.А., Гейцан В.Б., Рыбалко В.Г., Новгородцев Д.В. Исследование напряженного состояния стенки трубы с неоднородными остаточными напряжениями при изгибе. *Дефектоскопия*. 2012. № 1. С. 75-86.

7. Садртдинов Р.А., Рыбалко В.Г., Новгородцев Д.В. Специфика работ по снижению уровня напряжений трубопроводов с использованием магнитных методов контроля. *Дефектоскопия*. 2013. № 3. С. 48-54.

8. Троїцький В.О., Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. Особливості створення засобів для оцінки параметрів дефектів тепловим неруйнівним контролем. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин*. Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 2012. С. 105-110.

9. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Машиностроение, 1976. 272 с.

10. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 187 с.

11. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Львів, СПОЛОМ, 2005. 396 с.

12. Годлевський В.С., Троїцький В.О., Бондаренко О.Г. Кореляційні методи й технології пошуку витоків у напірних трубопроводах. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин*. Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 2009. С. 525-530.

13. Приходько В.Н., Кириллова Л.Г., Кузьминский С.А., Гиллар Г.А. Неразрушающий контроль трубопроводов на наличие коррозионных поражений. *Дефектоскопия*. 1990. № 8. С. 51-57.

14. Mudge P.J., Lank A.M., Allyne D.N. A ljpg range method of the defection of corrosion under insulation in process pipework. Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26-28 November, 1996.

15. Rose I.L. Ultrasonic waves in solid media. *Cambridge University Press*. New York. 1999. pp. 77-82.

16. Nagai T., Hyodo M., Takamyra K. Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology. *Hihakai Kensa*. 2003. v. 52, № 12. pp. 667-671.

17. Бондаренко О.Г. Основні характеристики та особливості низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах. *Методи та прилади контролю якості*. 2013. № 1. ;С. 5-23.

18. Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень /За ред. В.В. Панасюка. Львів: СПОЛОМ, 2012. 316 с.

References

1. Nerazrushayushchyy kontrol' i dyahnostyka: Spravochnyk /V.V.Klyuev, F.R.Sosnyn, V.N.Fylatov y dr.; Pod red. V.V.Klyueva. M.: Mashynostroenye, 1995. 488 s.

2. Mekhanika ruynuvannya i mitsnist' materialiv: Dovidn. posibnyk. T. 5: Neruynivnyy kontrol' i tekhnichna diahnostyka /Pid red. Z.T.Nazarchuka. L'viv: Fyzyko-mekhanichnyy instytut im. H.V.Karpenka NAN Ukrayiny, 2001. 1134 s

3. Dubov A.A., Vlasov V.T. O Klassyfykatsyy metodov NK. V myre nerazrushayushcheho kontrolya. 2007. № 3. S. 63-64.

4. Vlasov V.T., Dubov A.A. *Fyzycheskye osnovy metoda mahnytnoy pamyaty metalla*. M.: ZAO «Tyso», 2004. 424 s.

5. Kulaev V.H. *Raspredelenye namahnychennosty v dlynnnykh ferromahnytnykh stal'nykh trubakh, pomeshchennykh v lyuboe mahnytnoe pole, pry ykh uprhom y plastycheskom yz-hybakh*. Defektoskopyya. 2002. № 6. S. 65-80.

6. Sadrtynov R.A., Heytsan V.B., Rybalko V.H., Novhorodtsev D.V. *Yssledovanye napryazhennoho sostoyannya stenky truby s neodnorodnyimi ostatochnyimi napryazhenyami pry yz-hybe*. Defektoskopyya. 2012. № 1. S. 75-86.

7. Sadrtynov R.A., Rybalko V.H., Novhorodtsev D.V. *Spetsyfyka robot po snyzhenyyu urovnya napryazheny truboprovodov s yspol'zovanyem mahnytnykh metodov kontrolya*. Defektoskopyya. 2013. № 3. S. 48-54.

8. Troyits'ky V.O., Bondarenko O.H., Hlukhovs'ky V.YU. *Osoblyvosti stvorenyia zasobiv dlya otsinky parametriv defektiv teplovym neruynivnym kontrolem*. Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsiyi konstruktsiy, sporud i mashyn. Kyiv: IEZ im. YE.O.Patona NAN Ukrainy, 2012. S. 105-110.

9. Hreshnykov V.A., Drobot YU.B. *Akustycheskaya émyssyya*. M.: Mashynostroenye, 1976. 272 s.

10. Yvanov V.Y., Belov V.M. *Akustyko-émyssyonnyy kontrol' svarky y svarnykh soedynenyi*. M.: Mashynostroenye, 1981. 187 s.

11. Skal's'ky V.R., Koval' P.M. *Akustychna emisiya pid chas ruynuvannya materialiv, vyrobiv i konstruktsiy*. L'viv, SPOLOM, 2005. 396 s.

12. Hodlevs'ky V.S., Troyits'ky V.O., Bondarenko O.H. *Korelyatsiyi metody y tekhnolohiyi poshuku vytokiv u napirnykh truboprovodakh*. Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsiyi konstruktsiy, sporud i mashyn. Kyiv: IEZ im. YE.O.Patona NAN Ukrainy, 2009. S. 525-530.

13. Prykhod'ko V.N., Kyryllova L.H., Kuz'mynsky S.A., Hyllar H.A. *Nerazrushayushchyy kontrol' truboprovodov na nalychye korrozyonnykh porazheny*. Defektoskopyya. 1990. № 8. S. 51-57.

14. Mudge P.J., Lank A.M., Allyne D.N. *A ljpg range method of the defection of corrosion under insulation in process pipework*. Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26-28 November, 1996.

15. Rose I.L. *Ultrasonic waves in solid media*. Cambridge University Press. New York. 1999. pp. 77-82.

16. Nagai T., Hyodo M., Takamya K. *Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology*. Hihakai Kensa. 2003. v. 52, № 12. rr. 667-671.

17. Bondarenko O.H. *Osnovni kharakterystyky ta osoblyvosti nyz'kochastotnoho khvyl'ovoho protsesu v protyazhnykh truboprovodakh*. Metody ta prylady kontrolyu yakosti. 2013. № 1. ;S. 5-23.

18. *Pratsezdatnist' materialiv i elementiv konstruktsiy z hostrokintsevymy kontsentratoramy napruzhen' /Za red. V.V. Panasyuka*. L'viv: SPOLOM, 2012. 316 s.

УДК 622.24 + 621.694.2

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-18-26

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ КОНФОРМНИХ ВІДОБРАЖЕНЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ КАВІТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМИННОГО НАСОСА

*Д.О. Паневник**ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул.Карпатська, 15, тел.(0342) 727101,**e-mail: den.panevnik@gmail.com*

Сучасні методи дослідження кавітаційних режимів експлуатації свердловинної ежекційної системи не враховують можливість її обертання в свердловині, внаслідок чого зменшується ефективність прогнозування режиму роботи струминного насоса. В роботі запропоновано 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, який передбачає відображення області з відомим комплексним потенціалом на область течії з заданими границями. Границі областей робочого й інжектваного потоку визначені відповідно до теорії струменів: на твердих поверхнях, які обмежують течію нормальна складова швидкості дорівнює нулю, а на вільних поверхнях модуль швидкості набуває постійних значень. Відповідно до розробленої автором математичної моделі наявність циркуляційної течії може бути врахована використанням коефіцієнта нерівномірності розподілу поздовжніх швидкостей по перерізу робочого струменя. Обертання потоку за рахунок дії сил в'язкісного тертя змінює епіюру поздовжніх швидкостей, що може бути враховано введенням у відому методику розрахунку коефіцієнта нерівномірності профілю кінематичних параметрів. Використовуючи відомі процедури визначення виду функцій у площинах комплексної змінної та змінної Жуковського, отримана система рівнянь координат струменя в параметричній формі. Розв'язок отриманої системи рівнянь дозволив встановити прямий зв'язок між координатами струменя. Координати траєкторії робочого струменя визначаються величиною діаметра робочої насадки струминного насоса, відстанню до камери змішування та нерівномірністю розподілу швидкостей в потоці, викликану обертанням ежекційної системи в свердловині. Зростання відстані між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса спричиняє зменшення радіуса поширення струменя робочого потоку.

Ключові слова: свердловинний струминний насос, циркуляційні потоки, кавітація, гідродинамічні функції, комплексний потенціал.

Modern methods of studying the cavitation modes of the downhole ejection system operation do not take into account the possibility of its rotation in the well, resulting in reduced efficiency of forecasting the mode of the jet pump operation. The paper proposes a mechanism for determining the effect of jet pump rotation on the configuration of mixed flow lines using the theory of flat potential flows. To construct the configuration of flow lines for a given velocity field, the conformal mapping method, which consists in mapping a region with a known complex potential to a flow region with given boundaries, is used. The boundaries of the working and injected flow areas are determined according to the theory of jets: on solid surfaces limiting the flow the normal velocity component is zero and on free surfaces the velocity modulus takes constant values. According to the mathematical model developed by the author, the presence of circulating flow could be taken into account by using the non-uniformity coefficient of the longitudinal velocities distribution in the cross section of the working jet. The rotation of the flow due to the action of viscous friction changes the plot of longitudinal velocities, which could be taken into account by introducing into the known method of calculating the non-uniformity coefficient. Using the known procedures for determining the form of functions in the planes of the complex variable and the Zhukovsky variable, a system of equations of jet coordinates in parametric form is obtained. The solution of the obtained system of equations allowed to obtain a direct connection between the coordinates of the jet. The coordinates of the the working jet trajectory are determined by the diameter of the working nozzle of the jet pump, the distance to the mixing chamber and the uneven distribution of velocities in the flow are caused by the rotation of the ejection system in the well. Increasing the distance between the working nozzle and the mixing chamber of the jet pump causes a decrease in the radius of propagation of the jet of the workflow.

Key words: downhole jet pump, circulating flows, cavitation, hydrodynamic functions, complex potential.

Постановка проблеми

Сучасний ринок енергоресурсів характеризується переходом від політики, яка підтримує видобуток нафти і газу, до дестимулювання використання викопних ресурсів на користь більш широкого залучення замінних технологій і, особливо, відновлюваної енергетики. Незважаючи на розвиток процесів декарбонізації світової економіки та стрімке зростання обсягів використання відновлювальних джерел енергії вуглеводні сьогодні залишаються безальтернативною сировиною для багатьох галузей промисловості [1-2]. Світова тенденція виснаження природних запасів вуглеводнів вимагає застосування нетрадиційних засобів та заходів розробки родовищ нафти і газу. Пізня стадія розробки вуглеводневих покладів характеризується суттєвим зростанням витрат на утримання та експлуатацію видобувного обладнання та зменшенням обсягів нафтогазовидобутку. Пластова вода, яка на даному етапі розробки родовищ складає основну частину продукції свердловин, може мати значну мінералізацію, що вкрай негативно впливає на довговічність підземного устаткування. Високий вміст розчиненого газу в продукції свердловин зменшує ефективність застосування традиційних способів нафтовидобутку. Намагання зберегти рентабельність виробництва викликало розробку гідроструминного способу експлуатації нафтових свердловин. Особливості використання свердловинних ежекційних систем полягають у необхідності забезпечення енергетично виправданих співвідношень продуктивності свердловини та наземного насосного агрегата, який формує робочий потік та приводить в дію струминний насос. При цьому виникає небезпека виникнення кавітації в проточній частині струминного насоса, різке падіння його продуктивності та катастрофічне зношування робочих елементів. В цих умовах зростають вимоги до точності прогнозування напірних та енергетичних характеристик свердловинних ежекційних систем для забезпечення раціонального режиму їх експлуатації. Зважаючи на те, що режими руху змішуваних потоків в проточній частині струминного насоса безпосередньо впливають на ефективність його експлуатації, дослідження

умов безкавітаційної роботи свердловинної ежекційної системи є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень

Під час CFD-моделювання робочого процесу ежекційної системи встановлено [3], що найбільш імовірним місцем виникнення кавітації є не вхідна ділянка камери змішування, а область потоку, розміщена на виході робочої насадки струминного насоса. Технологія високошвидкісної фотозйомки [4] дозволила встановити взаємозв'язок між вихровими та розривними потоками на окремих стадіях розвитку кавітаційних явищ в проточній частині струминного насоса. Імовірність виникнення кавітації значною мірою залежить від форми внутрішніх поверхонь приймальної камери струминного насоса [5]. Дослідженням гідродинаміки змішуваних потоків встановлено також можливість виникнення кавітаційних явищ на вхідній ділянці дифузора струминного насоса [6]. Зниження тиску на виході з струминного насоса викликає зростання коефіцієнта ежекції та збільшує імовірність виникнення розривних явищ в змішуваних потоках [7]. Значний вплив на характер руху та взаємодію змішуваних потоків має величина співвідношення площ перерізів камери змішування та робочої насадки. Порушення суцільності змішуваних потоків має місце також в проточній частині кільцевого струминного насоса [8]. Оскільки високошвидкісний кільцевий струмінь, зазвичай, рухається вздовж поверхні внутрішньої стінки, її геометрія може мати більший вплив на традиційні та кавітаційні характеристики насоса ніж в ежекційних системах з центральним підведенням робочого потоку. Закруглення елементів проточної частини струминного насоса змінює місце виникнення парогазових областей та інтенсивність протікання кавітаційних явищ.

Виділення раніше не вирішеної частки проблем

Намагання підвищити енергоефективність свердловинних ежекційних систем викликало появу конструкцій струминного насоса з розміщеними в його проточній частині елементами для закручування змішуваних потоків [9]. При цьому зменшуються витрати енергії при змішуванні потоків та зростає коефіцієнт корисної дії ежекційної системи.

Відомі також свердловинні ежекційні системи в яких закручування змішуваних потоків здійснюється обертанням струминного насоса за допомогою гідравлічних турбін [10]. Результати чисельного моделювання [11] показують, що утворення вихрових областей, викликане обертанням струминного насоса, підвищує інтенсивність кавітаційних процесів в його проточній частині. Запропонована в роботі [12] математична модель змішування потоків у вигляді сукупності елементарних течій, які описуються гідродинамічними функціями комплексної змінної і визначаються сумуванням розв'язків рівняння Лапласа не враховує величину діаметра робочої насадки і не може бути використана для моделювання кавітаційного режиму роботи струминного насоса. Сучасні методи визначення кавітаційних характеристик ежекційної системи, таким

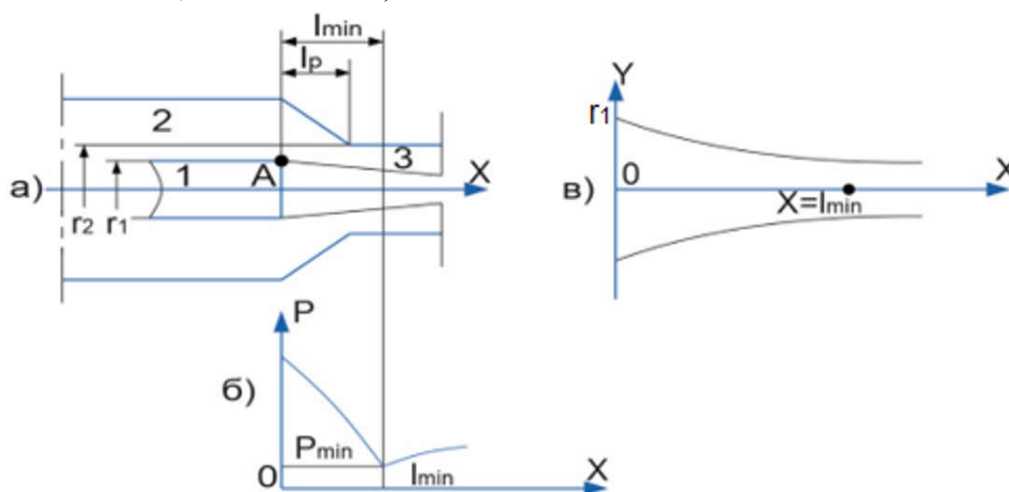
чином, не враховують можливість її обертання в свердловині, внаслідок чого зменшується ефективність прогнозування режиму роботи струминного насоса.

Мета досліджень

Метою досліджень, результати яких приведені в даній роботі, є розроблення методики контролю кавітаційних характеристик струминного насоса для умов його симетричного обертання в свердловині.

Висвітлення основного матеріалу

Перший етап моделювання кавітаційного режиму роботи струминного насоса передбачає визначення траєкторії робочого та інжектваного струменя. Траєкторії робочого та інжектваного струменів в проточній частині струминного насоса (рисунок 1 а) мають вигляд асимптотичних кривих.



1 – робоча насадка; 2 – приймальна камера; 3 – камера змішування

Рисунок 1 – Конфігурація траєкторії робочого струменя: а) геометрія проточної частини струминного насоса; б) зміна тиску по довжині струминного насоса; в) конфігурація ліній течії робочого струменя

Точка А є точкою відриву граничної лінії течії робочого струменя та визначає зовнішню межу робочого і внутрішню границю інжектваного потоку. Зважаючи на зміну вздовж осі симетрії площі перерізу робочого та інжектваного струменів необхідно встановити яку відстань від сопла струминного насоса необхідно прийняти за розрахункову при визначенні гідродинамічних параметрів потенціальних потоків.

Довжина області потенціального ядра зануреного струменя за даними експериментальних досліджень п'яти авторів

[13] (Геттінгенського інституту Прандтля, Туркуса, Сиркіна, Трюпеля і Цимма) становить $X = (4,4-5,1) d_p$. Ця величина буде використана для аналізу кавітаційних характеристик струминного насоса отриманих із застосуванням запропонованої математичної моделі. На відміну від робочої течії, конфігурація якої визначається виключно радіусом r_1 робочої насадки (рисунок 1 в), форма інжектваної течії залежить від трьох параметрів: радіусів r_1 , r_2 та відстані від сопла до камери змішування l_p . Необхідно також відзначити, що у випадку

дослідження інжектованого потоку внаслідок симетрії течії відносно осі абсцис можна обмежитись розглядом виключно її верхньої половини. Враховуючи, що вісь симетрії є лінією течії вона може бути замінена твердою стінкою.

Методи розв'язку поставленої задачі визначаються розв'язком системи рівнянь

$$d\left(z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}\right) = h_{i-j}; \quad (1)$$

$$\int_{S_i} \rho V dS = \int_{S_j} \rho V dS; \quad (2)$$

$$\sum Q_i = 0; \quad (3)$$

$$H_A - H_B = (S_0 Q^2 l)_1 = (S_0 Q^2 l)_2; \quad (4)$$

$$W(z) = \varphi + i\psi; \quad (5)$$

$$V_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad (6)$$

$$V_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}; \quad (7)$$

$$W(\xi) = W[f(z)] = W(z), \quad (8)$$

де z , $\frac{P}{\rho g}$, $\frac{V^2}{2g}$ – геометричний,

п'єзометричний та швидкісний напір потоку;

h_{i-j} – втрати напору в потоці між « i » та « j » перерізами;

V – швидкість потоку густиною ρ в перерізах площею S_i , S_j ;

Q_i – витрата потоку у вузловій точці;

H_A , H_B – гідродинамічний напір у вузлових точках A , B ;

S_0 – питомий опір каналів довжиною l ;

$W(z)$ – комплексний потенціал шуканої течії;

φ – функція потенціалу швидкостей;

ψ – функція течії;

V_x , V_y – компоненти швидкості;

$W(\xi)$ – комплексний потенціал еталонної течії.

Формула (1) є загальною формою запису рівняння збереження енергії потоку (в

інтерпретації Бернуллі) і визначає взаємозв'язок гідродинамічних параметрів i -го та j -го перерізів. Рівняння (2) визначає незмінну величину витрати в будь-якому перерізі гідравлічної системи. Рівняння (3), (4) стосуються ежекційних систем з паралельним включенням струминного насоса. Рівняння (3) характеризує баланс витрат у вузлових точках ежекційної системи, а рівняння (4) дозволяє визначити різницю напорів між вузловими точками за допомогою попередньо розрахованих чисел Рейнольдса Re , та коефіцієнтів гідравлічного тертя λ . Рівняння (5) визначає загальну структуру комплексного потенціалу шуканої течії в проточній частині струминного насоса, а рівняння (6), (7) (умови Коші-Римана) визначають потенціальність потоку.

Задача про визначення конфігурації ліній течії за заданим полем швидкостей передбачає інтегрування системи диференціальних рівнянь із змінними у вигляді координат частинок рідини. Враховуючи, що компоненти швидкості є функціями цих координат диференціальні рівняння ліній течії в загальному випадку не можуть бути проінтегровані шляхом відокремлення змінних. Разом з тим з теорії плоских потенціальних потоків відомо, що кожна система ліній течії визначає вигляд певної функції комплексного аргументу, дійсна частина якої характеризує швидкість, а уявна – витрату рідини. Це дає підстави застосовувати для пошуку конфігурацій ліній течії теорію функцій комплексної змінної. Аналіз кінематики потенціального потоку нестисливої рідини з математичної точки зору передбачає розв'язок однорідного диференціального рівняння з частковими похідними другого порядку (рівняння Лапласа). На сьогоднішній день отриманий розв'язок для елементарних потенціальних потоків з відомим розподілом швидкостей, що виключає необхідність розв'язку рівняння Лапласа. Розв'язок цієї задачі для складних потоків полягає у необхідності отримання такого часткового розв'язку, який задовольняв би її граничним умовам. Для побудови контуру потоку складної конфігурації застосовуємо метод конформного відображення, який полягає у відображенні області з відомим комплексним потенціалом $W(\xi)$ на область течії з заданими границями.

Рівняння (8) характеризує конформне перетворення потенціальних течій. Застосування даного методу передбачає пошук аналітичної (перетворюючої) функції $\xi = f(z)$, яка здійснює конформне відображення, необхідне для визначення течії робочого та інжектованого потоку. Границі областей робочого та інжектованого потоку при цьому визначаються відповідно до теорії струменів: на твердих поверхнях, які обмежують течію, нормальна складова швидкості дорівнює нулю, а на вільних поверхнях модуль швидкості набуває постійних значень.

Розглянемо задачу витікання рідини з простору, обмеженого симетричними прямолінійними похилими стінками [14]. Виберемо осі OX та OY в площині Z (рисунок 2 а) та позначимо через α кут нахилу стінок до вертикалі. Границі вільного струменя $BC, B'C'$ асимптотично наближаються до вертикальної осі. В процесі теоретичного аналізу необхідно визначити конфігурацію границь вільного струменя для умов його обертання з швидкістю ω в проточній частині струминного насоса та встановити взаємозв'язок між відомими ($b, \alpha, V_0, Q, \omega$) та невідомими (x, y) величинами.

Визначимо вигляд області течії обмеженої в фізичній площині Z (рисунок 2 а) стінками $AB, A'B'$ та лініями течії $BC, B'C'$ в площині комплексної змінної (рисунок 2 б). Лінії течії виходять з безмежності та прямують в безмежність, тобто функція ψ змінюється від $-\infty$ до $+\infty$. Відстань між лініями течії ABC та $A'B'C'$ визначає величину витрати рідини Q . Таким чином, області течії фізичної площини Z в площині W буде відповідати полоса шириною Q . Коефіцієнт β , що характеризує величину витрати Q визначає нерівномірність розподілу швидкостей, викликану обертанням потоку.

Визначимо вигляд області течії на площині змінної Жуковського (рисунок 2 в) [14]. Відповідно до характеру зміни функції Жуковського отримаємо зображення заданої області течії. Зображення граничних ліній течії $AB, A'B'$ в області змінної Жуковського має вигляд прямих, паралельних осі X і розміщених від неї на відстані αi (рисунок 2 в). Вільні лінії течії будуть співпадати з віссю Y на ділянці від $Y = -\alpha i$ до $Y = +\alpha i$. Таким чином, якщо границі

області змінної W складаються з прямих $\psi = \text{const}$, то границі області ω також будуть складатись з прямих, оскільки вздовж вільних поверхонь постійною є дійсна, а вздовж твердих стінок – уявна частина функції Жуковського. Отже задана область течії на площині змінної Жуковського має вигляд напівполоси (рисунок 2 в), розміщеної праворуч осі OY .

Наступний етап розв'язку задачі передбачає встановлення відповідності між функціями W та ω , для чого може бути введена параметрична функція t , значення якої змінюються в верхній площині. Введення ще одної допоміжної площини дозволяє отримати конформне відображення напівполоси змінної Жуковського на полосу в площині W . Прийmemo, що заданій області течії на площині t відповідає верхня напівплощина (рисунок 2 г). Безпосередній пошук зв'язку між функціями W та ω може бути замінений пошуком функцій $W(t)$, $\omega(t)$ з наступним використанням параметра t для визначення необхідних величин.

Використовуючи відомі [14] процедури визначення вигляду функцій $W(t)$, $\omega(t)$ із застосуванням формул Шварца-Кристоффеля та Ейлера отримаємо рівняння координат струменя в параметричній формі

$$x = \frac{4}{\pi} \beta b \left(1,1478 + \frac{1}{2} \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right| - \cos \theta \right); \quad (9)$$

$$y = b \left(1 - \frac{4}{\pi} \beta \left(\sin \theta - \frac{1}{2} \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right) \right| + 0,2664 \right) \right), \quad (10)$$

де θ – аргумент комплексної швидкості.

Структура рівняння (9) не дозволяє визначити безпосередню залежність $\theta = f(x)$, яка після підстановки у формулу (10) дозволила б отримати вираз для розрахунку траєкторії робочого струменя $y = f(x)$ без застосування методу послідовних наближень. Для спрощення розрахунків введено допоміжну функцію $\lambda(\theta)$, яка дозволить лінеаризувати залежність між кутом θ та координатою x та отримати рівняння безпосереднього зв'язку даних параметрів.

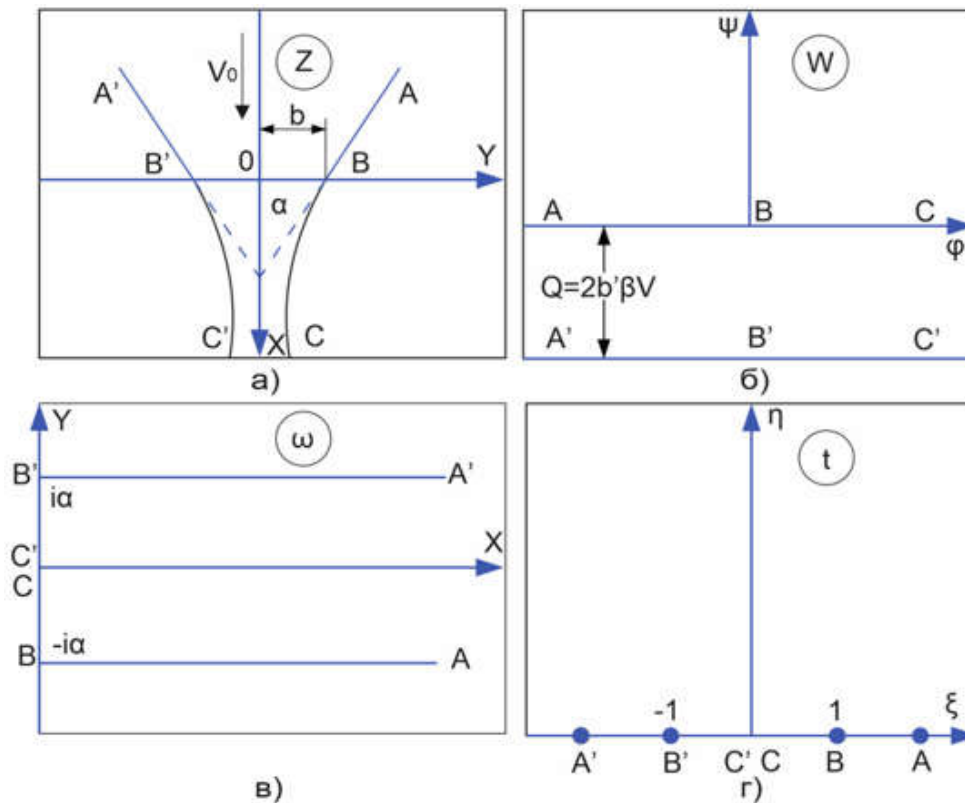


Рисунок 2 – Конфігурація області течії робочого потоку: а) фізична площина; б) площина комплексної змінної; в) площина змінної Жуковського; г) площина параметричної змінної

Перепишемо рівняння (9) у вигляді
 $x = \beta b \lambda(\theta)$ (11)

$$\lambda(\theta) = 1,4622 + 0,6369 \ln \left| \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right| - 1,2739 \cos \theta \quad (12)$$

Графічне зображення рівняння (12) (крива 1 на рисунку 3) має нелінійний характер. Для лінеаризації залежності $\lambda = f(\theta)$ представимо

функцію отриману з використанням рівняння (12) у вигляді співвідношення (крива (2) на рисунку 3)

$$\lambda = a + k\theta, \quad (13)$$

коефіцієнти якого визначені за допомогою ортогональних поліномів Чебишева $a = 1,7889$; $k = -0,42$.

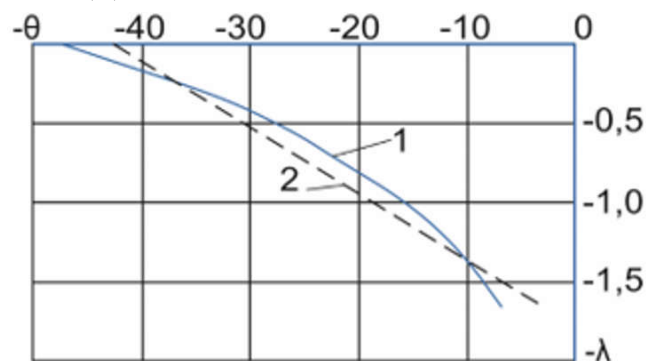


Рисунок 3 – Визначення допоміжної функції: 1 – фактичні значення; 2 – лінеаризовані значення

Використовуючи рівняння (11), (13) залежність $\theta = f(x)$ представимо в формі

$$\theta = -\frac{1,7889\beta b + x}{0,042\beta b} \quad (14)$$

Підстановка отриманої формули в рівняння (10) дозволить отримати прямий зв'язок між координатами струменя

$$y = b \left(1 + \frac{4}{\pi} \beta \left(\sin \frac{1,7889\beta b + x}{0,042\beta b} + \frac{1}{2} \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1,7889\beta b + x}{0,084\beta b} \right) \right| - 0,2664 \right) \right) \quad (15)$$

Використовуючи останнє рівняння визначимо похибку від введення допоміжної функції $\lambda(\theta)$. Після підстановки значень координати $x=0$ в рівняння (15) отримаємо $y=0,998b$ (для випадку $\beta=1$).

$y = f(x)$. Рівняння (10) враховуючи (14) має вигляд

Враховуючи, що координата $x=0$ відповідає значенню координати $y=b$ похибка викликана введенням функції $\lambda(\theta)$ становить 0,2 %.

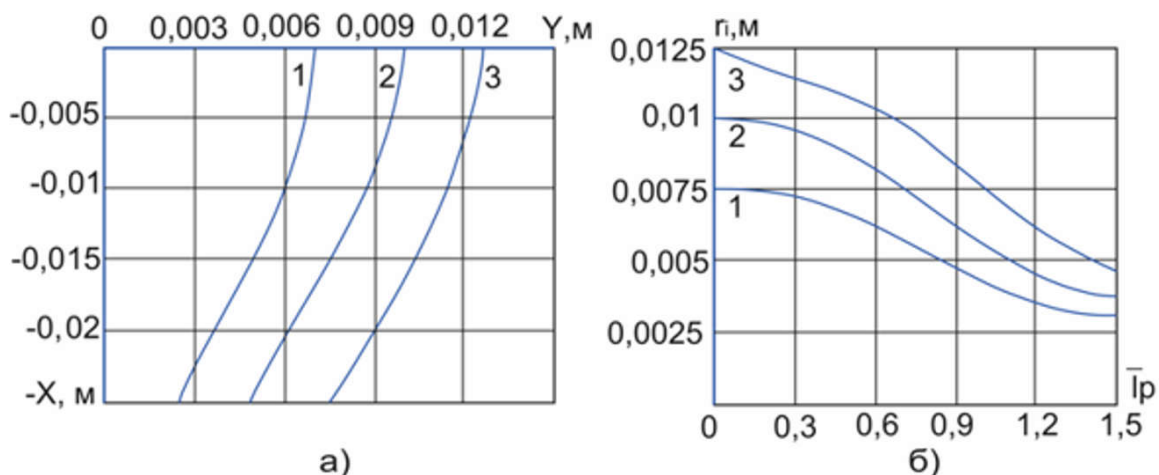


Рисунок 4 – Дослідження конфігурації робочого потоку: а) траєкторія струменя для різних радіусів робочої насадки: 1 – 0,0075 м; 2 – 0,01 м; 3 – 0,0125 м; б) зміна радіуса при поширенні струменя для різних діаметрів робочої насадки: 1 – 0,015 м; 2 – 0,02 м; 3 – 0,025 м.

Графічне зображення траєкторій струменя (для випадку $\beta=1$) отримане з використанням рівняння (15) приведені на рисунку 4 а. Точки перетину графічних залежностей з віссю абсцис визначають радіус робочої насадки. Зміна радіуса струменя показана на рисунку 4 б у вигляді функції відносної відстані \bar{l}_p між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса $\bar{l}_p = l_p / d_{pn}$ (де l_p – абсолютна відстань між робочою насадкою та камерою змішування; d_{pn} – діаметр робочої насадки).

Висновки та перспективи розвитку напрямку

1. Визначений параметр, який дозволяє врахувати обертання ежекційної системи при контролі її кавітаційних характеристик: нерівномірність розподілу кінематичних параметрів в робочому потоці безпосередньо

залежить від швидкості обертання струминного насоса. Нерівномірність розподілу кінематичних параметрів зростає при зменшенні величини коефіцієнта нерівномірності. Величина коефіцієнта нерівномірності розподілу швидкостей в робочому потоці та швидкість обертання струминного насоса зв'язані оберненопропорційною залежністю.

2. Координати траєкторії робочого струменя струминного насоса визначаються величиною його початкового діаметра, відстанню між робочою насадкою і камерою змішування та нерівномірністю розподілу швидкостей в потоці, викликану обертанням ежекційної системи в свердловині.

3. Зростання відстані до камери змішування струминного насоса викликає зменшення радіуса поширення струменя робочого потоку.

Визначення конфігурації робочого струменя та встановлення впливу на його радіус режимних та конструкторських параметрів

струминного насоса дозволяє застосовувати для аналізу гідродинамічних параметрів змішуваних потоків основні закони гідродинаміки і, зокрема, рівняння збереження енергії та неперервності руху рідини. Завдання подальших досліджень полягає на основі визначеної конфігурації робочого струменя встановити умови за яких величина тиску змішуваних потоків зменшиться до значення тиску насичених парів робочої рідини з наступним утворенням кавітаційної області в проточній частині струминного насоса.

Список використаних джерел

1. BP Energy Outlook 2017 Edition. 2017. 103 p. bp.com/energyoutlook # BP stats. (дата останнього звернення, якщо електронний ресурс) (дата звернення: 07.12.2021).
2. Markevych K., Omelchenko V. Hlobalni enerhetychni trendy kriz pryizmu natsionalnykh interesiv: analitychna dopovid (Tsentr Razumkova). Kyiv: Zapovit, 2016. 118 p.
3. Domagala M. Simulation of cavitation in jet pumps. Technical transactions mechanics. 1-M / 2013. № 7(2) P.51–58.
4. Long Y., An C., Zhu R., Chen J. Research on hydrodynamics of high velocity regions in a water-jet pump based on experimental and numerical calculations at different cavitation conditions. Physics of Fluids. 2021. Vol. 33. Issue 4. 8 p. <https://doi.org/10.1063/5.0040618>.
5. Wang X., Chen Y., Li M., Xu Y., Wang B., Dang X. Numerical investigation of the cavitation performance of annular jet pumps with different profiles of suction chamber and throat inlet. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2020. Vol. 14. Issue 1. P. 1416–1428. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1824875>. (дата звернення: 06.12.2021).
6. Narui H., Inagaki S. Limiting Flow Cavitation Number of Water Jet Pumps. Bulletin of JSME. 1982. Vol. 25. Issue 209. P.1682–1689. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.25.1682>.
7. Long X., Zhang J., Wang Q., Xiao L., Xu M., Lyu Q., Ji B. Experimental investigation on the performance of jet pump cavitation reactor at different area ratios. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2016. № 78. P. 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.018>.

8. Wang X., Chen Y., Li M., Xu Y., Wang B., Dang X. Numerical Study on the Working Performance of a Streamlined Annular Jet Pump. *Energies*. 2020. № Vol. 13. Issue 17. 15 p. <https://doi.org/10.3390/en13174411>.

9. Panevnyk D.A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz* 2021. no. 9. pp. 579–586. <https://doi.org/10.18668/NG.2021.09.02>.

10. Паневник Д.О. Аналіз досліджень впливу закручування потоку на характеристику свердловинних струминних насосів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 4(77). С.31-40. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4\(77\)-31-40](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4(77)-31-40)

11. Zi H., Zhou L., Meng L., Wang Z. Prediction and analysis of jet pump cavitation using Large Eddy Simulation. *Journal of Physics Conference*. December 2015. Series 656(1): 012142. P. 1-5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012142>.

12. Паневник Д.О. Обгрунтування методу моделювання циркуляційних потоків при обертанні наддолотного струминного насоса. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2021. №3(80). С. 46–52.

13. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 824 с.

14. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1963. Ч.1. 1963. 584 с.

References

1. BP Energy Outlook 2017 Edition. 2017. 103 p. bp.com/energyoutlook # BP stats. (Date of application: 07.12.2021).
2. Markevych K., Omelchenko V. Hlobalni enerhetychni trendy kriz pryizmu natsionalnykh interesiv: analitychna dopovid (Tsentr Razumkova). Kyiv: Zapovit, 2016. 118 p. <https://razumkov.org.ua> > 2016_glob_ener_trendy.
3. Domagala M. Simulation of cavitation in jet pumps. Technical transactions mechanics. 1-M / 2013. № 7(2) P.51–58. <https://www.ejournals.eu> > pliki > art.
4. Long Y., An C., Zhu R., Chen J. Research on hydrodynamics of high velocity regions in a water-jet pump based on experimental and numerical calculations at different cavitation conditions. Physics of Fluids. 2021. Vol. 33. Issue 4. 8 p. <https://doi.org/10.1063/5.0040618>.

5. Wang X., Chen Y., Li M., Xu Y., Wang B., Dang X. Numerical investigation of the cavitation performance of annular jet pumps with different profiles of suction chamber and throat inlet. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 14. Issue 1. P. 1416–1428. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1824875>. (Date of application: 07.12.2021).
6. Narui H., Inagaki S. Limiting Flow Cavitation Number of Water Jet Pumps. *Bulletin of JSME*. 1982. Vol. 25. Issue 209. P.1682–1689. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.25.1682>.
7. Long X., Zhang J., Wang Q., Xiao L., Xu M., Lyu Q., Ji B. Experimental investigation on the performance of jet pump cavitation reactor at different area ratios. *Experimental Thermal and Fluid Science (EXP THERM FLUID SCI)*2016. № 78. P. 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.018>.
8. Wang X., Chen Y., Li M., Xu Y., Wang B., Dang X. Numerical Study on the Working Performance of a Streamlined Annular Jet Pump. *Energies*. 2020. № Vol. 13. Issue 17. 15 p. <https://doi.org/10.3390/en13174411>.
9. Panevnyk D.A. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz* 2021, no. 9, pp. 579–586. <https://doi.org/10.18668/NG.2021.09.02>.
10. Panevnyk D.O. Analysis of studies of the influence of flow vortex on the characteristics of downhole jet pumps. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2020. no. 4(77). P. 31-40. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4\(77\)-31-40](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2020-4(77)-31-40).
11. Zi H., Zhou L., Meng L., Wang Z. Prediction and analysis of jet pump cavitation using Large Eddy Simulation. *Journal of Physics Conference*. December 2015. Series 656(1):012142. P. 1-5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012142>.
12. Panevnyk D.O. Substantiation of the method of modeling circulating flows during the rotation of the overhead jet pump. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2021. № 3(80). P.46–52. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-3\(80\)-46-52](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2021-3(80)-46-52).
13. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh struj*. M.: Fizmatgiz, 1960. 824 p.
14. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. *Teoreticheskaya gidromekhanika*. M.: Fizmatgiz, 1963. CH.1. 1963. 584 p.

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 681.121

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-27-35

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОНДУЮЧИХ ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ У СИСТЕМАХ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОТЯЖНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

О. Г. Бодаренко

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

Виконано аналіз сутності взаємодії низькочастотної ультразвукової спрямованої хвилі з несучільностями стінки труби в процесі проведення процедури діагностування технічного стану протяжних трубопроводів. Показано, що механізм відбиття низькочастотної хвилі від несучільностей стінки труби різної висоти співпадає з механізмом відбиття морської приливної або штормової хвилі від дамб різної висоти на суші. Наведена загальна характеристика інформаційних збуджувальних сигналів для зондування стану об'єктів у радіолокації та при діагностуванні протяжних трубопроводів.

Вводиться параметр роздільна здатність системи ультразвукового контролю, під якою уявляється здатність системи контролю роздільно приймати та відтворювати сигнали від двох або більше відбивачів, які близько розміщені один від іншого в напрямку розповсюдження спрямованої хвилі. Проаналізовано наявність так званої мертвої зони, що представляє собою ділянку труби від місця встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени, в якій луно-сигнал від несучільності не відділяється від збудженого (початкового). Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями. Перш за все, важливо знати розмір мертвої зони на ділянці збудження низькочастотних коливань, тому що ця ділянка не буде проконтрольована. Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування технічного стану протяжних трубопроводів спрямованими хвилями при виявленні несучільностей стінки труби. Встановлено, що використання обвідної у вигляді функції Хеннінга для модуляції збуджуваного синусоїдального сигналу дозволяє управляти тривалістю цугу акустичного коливання у стінці труби та вхідним і вихідним перехідними процесами, що в свою чергу зменшує тривалість мертвої зони при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями. Обґрунтована форма обвідної імпульсу збудження коливань у середовищі стінки протяжного трубопроводу у вигляді функції Хеннінга.

Ключові слова: протяжний трубопровід, збуджувальний сигнал, обвідна імпульсу, функція Хеннінга.

The analysis of the essence of the interaction of low-frequency ultrasonic directional wave with the inconsistencies of the pipe wall in the process of diagnosing the technical condition of long pipelines is performed. It is shown that the mechanism of reflection of low-frequency wave from irregularities of the pipe wall of different heights coincides with the mechanism of reflection of sea tidal or storm wave from dams of different heights on land. The general characteristics of information excitation signals for sensing the state of objects in radar and in diagnosing long pipelines are given.

The parameter of the resolution of the ultrasonic control system is introduced, which represents the ability of the control system to separately receive and reproduce signals from two or more reflectors, which are closely spaced from each other in the direction of propagation of the directional wave. The presence of the so-called dead zone, which is a section of the pipe from the place of installation of the piezoelectric transducers of the acoustic antenna, in which the echo signal from the discontinuity is not separated from the excited (initial). The presence of a dead zone and its size is an important characteristic of the sensitivity of low-frequency diagnostics of long pipelines by directional waves.

First of all, it is important to know the size of the dead zone in the low-frequency oscillation excitation section, because this section would not be monitored. The presence of a dead zone and its size is an important characteristic of the sensitivity of low-frequency diagnostics of the technical condition of long pipelines by directional waves when detecting inconsistencies in the pipe wall.

It is established that the use of the Henning function to modulate the excited sinusoidal signal allows to control the duration of the acoustic oscillation train in the pipe wall and input and output transients, which in turn reduces the dead zone duration when diagnosing technical condition of low-frequency pipelines. The form of the envelope pulse of excitation of oscillations in the environment of the wall of the long pipeline in the form of the Henning function is substantiated.

The form of the envelope pulse of excitation of oscillations in the environment of a wall of the extended pipeline in the form of function of Henning is substantiated.

Keywords: long pipeline, excitation signal, envelope pulse, Henning function.

Вступ. У роботі [1] виконано аналіз основних характеристик та особливостей низькочастотного хвильового процесу при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів ультразвуковими спрямованими хвилями. Визначена сутність низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах та наведені схеми зсуву частинок середовища стінки труби для поздовжньої, згинальної і крутильної мод спрямованої хвилі. Розглянуто дисперсійні діаграми звукових швидкостей для різних мод спрямованих хвиль, на основі яких сформульовано їх основні особливості при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів. Виконано аналіз хвильового процесу в протяжному трубопроводі з позиції акустичної локації його твердого середовища низькочастотними спрямованими хвилями та розроблено модель активної локаційної низькочастотної ультразвукової системи для діагностування технічного стану трубопроводу. Розглянуто принципи збудження п'єзоелементів акустичної антени, напрямки руху коливань та просторові уявлення про розподіл зміщення частинок середовища труби при розповсюдженні в ньому поздовжніх, крутильних та згинальних мод низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль.

У той же час при застосуванні системи низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями суттєвим є процес збудження звукових коливань в середовищі стінки труби п'єзоперетворювачами акустичної антени та їх взаємодія з несучільностями стінки труби під час поширення звукової хвилі середовищем стінки трубопроводу.

Саме аналізу особливостей формування зондуючих імпульсних сигналів присвячена дана робота.

Сутність взаємодії низькочастотної ультразвукової хвилі з несучільностями стінки труби. Найбільш показовим поясненням сутності взаємодії низькочастотної спрямованої хвилі з несучільностями стінки труби протяжного трубопроводу є порівняння процесу розповсюдження низькочастотної хвилі у стінці трубопроводу з процесом переміщення морської хвилі під час цунамі, поданого в роботі японських учених [2]. Слово «цунамі» має японське походження й складається з двох ієрогліфів – «бухта» і «хвиля». Саме в цьому приховане його глибоке розуміння: цунамі набуває руйнівної сили тільки при зіткненні з сушею. Морська хвиля (цунамі) виникає внаслідок морських землетрусів. На відкритому просторі в місці виникнення висота її сягає від 0,1 до 5 м, але рухається вона з величезною швидкістю – до 700 км за годину. При наближенні до берега швидкість хвилі падає, а її висота багаторазово виростає – від 10 до 50 м і більше. Саме тоді величезна стіна води навалюється на землю, змиваючи все на своєму шляху.

Можна вважати, що японські вчені дуже правильно вибрали порівняння механізму відбиття морської хвилі від дамб різної висоти під час цунамі з механізмом відбиття низькочастотної спрямованої хвилі від несучільностей стінки труби різних розмірів. При цьому під цунамі мається на увазі не стихійне лихо, а високі приливні або штормові хвилі.

На рис. 1 схематично зображено амплітуди H_1 та H_2 хвиль цунамі в залежності від висоти 1-ї та 2-ї дамб.

Під час руху морської хвилі в напрямку малої дамби 1 висота H_1 цунамі буде не значною. Відповідно при попаданні морської хвилі на більш високу дамбу 2 висота H_2 хвилі виростає значно.

Для порівняння на рис. 2 схематично зображено залежність амплітуди відбитих сигналів спрямованої хвилі в середовищі труби від несучільностей 2 поперечному перерізі труби різних розмірів.

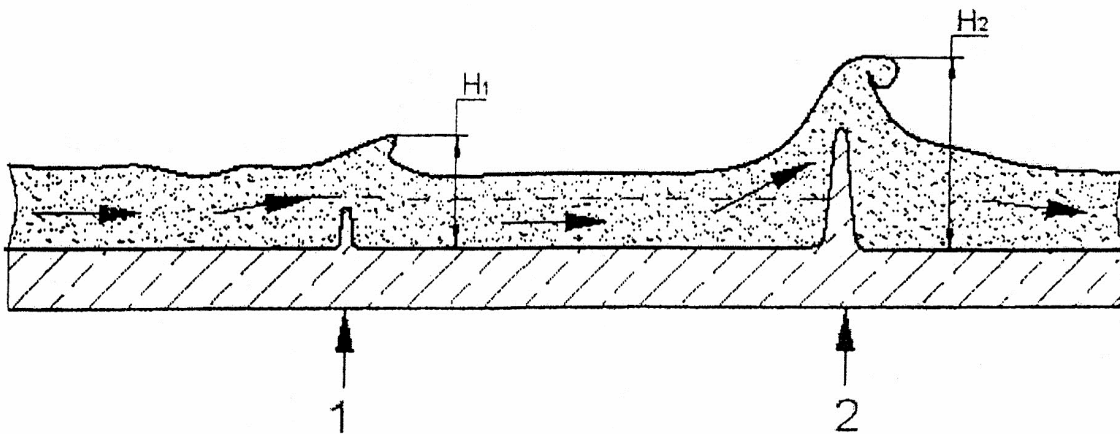


Рисунок 1 – Схематичне зображення амплітуди хвилі цунамі в залежності від висоти дамби

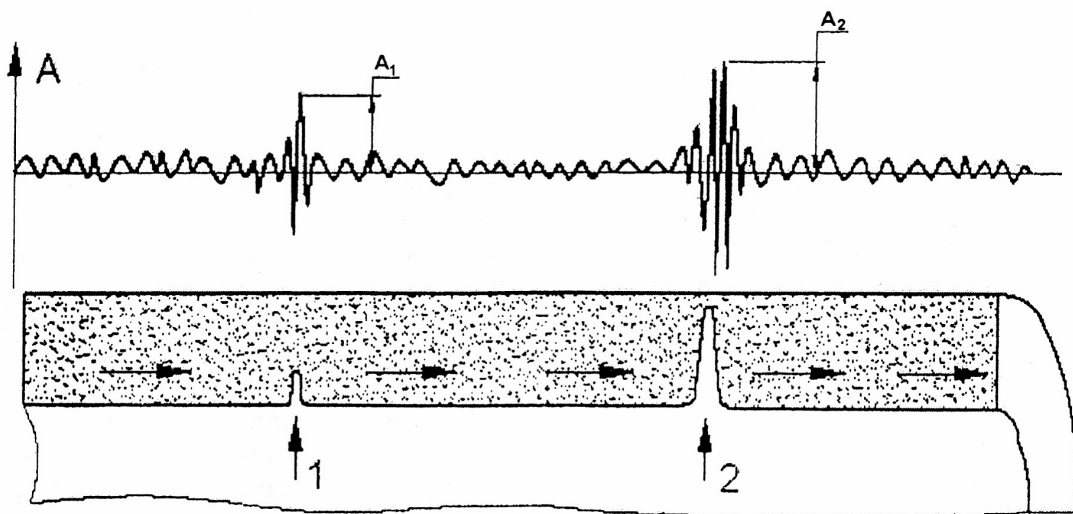


Рисунок 2 – Схематичні зображення амплітуди відбитих сигналів від несучільностей у поперечному перерізі труби різних розмірів

При невеликій несучільності 1 стінки труби амплітуда A_1 відбитого сигналу буде малою. При збільшенні несучільності 2 стінки труби відповідно зростає амплітуда A_2 відбитого від неї сигналу.

Наведені на рис. 1, 2 зображення яскраво ілюструють відповідність амплітуди сигналу низькочастотної спрямованої хвилі, відбитого від несучільностей труби різних розмірів, висоти морської хвилі цунамі в залежності від висоти дамби.

Таким чином, низькочастотні ультразвукові хвилі, які генеруються п'єзоперетворювачами кільцевої антени та поширюються по тілу середовища протяжного трубопроводу в напрямку його вісі, будуть відбиватися від несучільностей стінки труби як граничних поверхонь й повертатися до п'єзоперетворювачів антени.

Інформативними параметрами при проведенні процедури діагностування технічного стану

протяжних трубопроводів будуть відбиті від несущільностей сигнали різної амплітуди та відстань від п'єзоперетворювачів до виявленої несущільності, яка в однорідному середовищі протяжного трубопроводу встановлюється за проміжком часу від точки передавання зондуючого сигналу спрямованої хвилі до приймання відбитого сигналу тим же п'єзоперетворювачем.

Загальна характеристика інформаційних сигналів для зондування стану об'єктів. У різних галузях науки і техніки застосовуються різні інформаційні сигнали, за допомогою яких фіксується змінний у часі та просторі (за величиною) фізичний стан різноманітних промислових об'єктів. Тому такі сигнали найчастіше розглядаються як певні повідомлення, що несуть інформацію про процеси, стан та фізичні величини об'єктів, виражені у формі, зручній для передачі, обробки, зберігання й використання відомостей про об'єкти. Якщо врахувати, що сигнали, як правило, описуються ще й математичною залежністю, то можна отримати нове визначення сигналу. Отже, сигнал – це інформаційна функція, що несе повідомлення про фізичні властивості, стан або поведження деякої фізичної системи, об'єкта чи середовища [3].

Як за величиною, так і у часі інформаційні сигнали можуть мати або безперервні, або дискретні значення. Серед безперервних сигналів найбільш поширеним є синусоїдальний.

У загальному випадку математична модель безперервного синусоїдального сигналу записується у вигляді виразу

$$u(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де A - амплітуда сигналу; ω_0 - кругова частота; φ_0 - початкова фаза; t - поточний час.

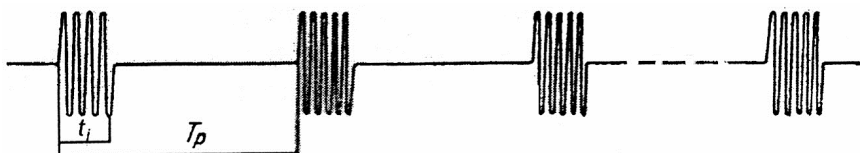


Рисунок 3 – Послідовність збуджувальних радіоімпульсів

Математичну модель радіоімпульсу з прямокутною обвідною в поточному часі можна записати у вигляді

У більшості випадків технічних застосувань синусоїдальних сигналів (радіотехніка, акустична дефектоскопія тощо) використовуються дискретні інформаційні сигнали у вигляді рознесених у часі послідовностей радіоімпульсів, які представляють собою відрізки синусоїдального сигналу тривалістю t_i .

Математичну модель радіоімпульсу $u_p(t)$ можна отримати із виразу (1) моделі синусоїдального сигналу $u(t)$, якщо виконати заміну амплітуди A (постійна величина) на функцію часу $A(t)$, яка описує радіоімпульси[4]:

$$u_p(t) = A(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2)$$

У радіотехніці при виявленні та оцінці значень параметрів деяких сигналів з апіорно відомими параметрами застосовують різноманітні функції часу $A(t)$ (обвідні радіоімпульсів). Найпростішою є прямокутна обвідна (функція Діріхле), амплітуда якої в інтервалі її спостереження дорівнює одиниці.

Історично задача рознесених у часі радіоімпульсів виникла в області імпульсних радіолокаційних систем. Збуджувальний сигнал представляє собою послідовність прямокутних імпульсів – відрізків синусоїд однакової амплітуди на несучій частоті $\omega_0 = 2\pi n / T$, де n - ціле число синусоїдальних коливань в радіоімпульсі з періодом T .

Приклад такої послідовності радіоімпульсів наведено на рис. 3, де t_i - тривалість радіоімпульсу, T_p - період слідування радіоімпульсів.

$$f(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(2\pi n f_0 t + \varphi_0), & 0 \leq t \leq t_i, \\ 0, & t < 0 \text{ \& } t > t_i \end{cases} \quad (3)$$

де t_i - тривалість радіоімпульсу; A - амплітуда сигналу; f_0 - циклічна частота синусоїдального сигналу; φ_0 - початковий фазовий кут; $1/f_0 = T$ - період синусоїдальних коливань;

A , f_0 , t_i , φ_0 - постійні величини, які виконують роль інформативних параметрів сигналів.

Особливістю радіоімпульсів, які застосовуються в радіолокації, є те, що при вимірюванні він у вигляді електромагнітної хвилі розповсюджується у просторі і часі без зміни своєї форми. Якщо в зоні дії радіолокаційної станції знаходиться ціль, то радіоімпульс відбивається і, в залежності від розвитку та конфігурації цілі, змінює свою амплітуду та поступає на приймач радіолокаційної станції.

В акустичній дефектоскопії для збудження ультразвукових коливань у середовищі об'єктів контролю застосовуються послідовності радіоімпульсів із прямокутною, дзвіноподібною (гаусовою) та експоненціальною формами обвідної імпульсів. Фактична форма обвідної в акустичній дефектоскопії визначає закон зміни амплітуди в акустичному імпульсі. Найбільше розповсюдження в акустичній дефектоскопії отримали послідовності акустичних імпульсів у вигляді радіоімпульсів з прямокутною формою обвідної. Основними характеристиками таких послідовностей імпульсів є частота заповнення, тривалість окремого імпульсу та період повторення. Останній за звичай вибирається суттєво більшим тривалості окремого прямокутного акустичного імпульсу, тобто $t_i \ll T_p$.

При контролі протяжних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями генерація енергії коливань у середовищі труби здійснюється також за допомогою послідовності радіоімпульсів шляхом збудження п'єзоперетворювачів акустичної антени.

При використанні такої послідовності радіоімпульсів для збудження коливань в середовищі протяжного трубопроводу необхідно, щоби тривалість t_i радіоімпульсу та період T_p його слідування (повторення) були вибрані такими, щоби час проходження

імпульсом трубопроводу довжиною L_{Tp} був більше t_i , а кожний відбитий від любого відбивача луно імпульс повертався до п'єзоперетворювача після збудження наступного імпульсу. У цьому випадку в трубопроводі будуть виникати низькочастотні коливання спрямованої хвилі, які не будуть залежати від зміни довжини L_{Tp} трубопроводу.

Тому для виключення впливу на п'єзоперетворювач відбитого від несущіюностей луно-сигналу одночасно із збудженням прямого імпульсу довжина шляху розповсюдження спрямованої хвилі під п'єзоперетворювачів акустичної антени до кінця найбільшої контрольованої ділянки трубопроводу може бути визначена за виразом

$$L_{Tp} > 2Ct_i, \quad (4)$$

де C - швидкість звуку в середовищі трубопроводу.

У залежності від числа n періодів T несучої частоти синусоїдального сигналу радіоімпульсу спрямованої хвилі його тривалість t_i буде визначатися за виразом

$$t_i = nT = \frac{n}{f_0}. \quad (5)$$

Теоретично швидкістю C спрямованої хвилі, числом n синусоїдальних коливань та несучою частотою f_0 радіоімпульсу буде визначатися найменша довжина неконтрольованої ділянки протяжного трубопроводу.

Обґрунтування форми обвідної імпульсу збудження коливань у середовищі протяжного трубопроводу. В акустичній дефектоскопії ряд збуджень, які повторюються, називаються цугом [5]. Зазвичай поняття цугу відноситься до відрізка синусоїди, тобто до радіоімпульсу. Генерація енергії коливань у вигляді такого імпульсу, заповненого синусоїдальною несучою частотою, здійснюється через випромінювальну поверхню п'єзоелектричної пластинки. Якщо цуг змінної напруги відповідає власній частоті пластинки, то на початку і в кінці він раптово обривається. Але при імпульсному збудженні ультразвукових коливань в об'єкті контролю пластинка п'єзоперетворювача внаслідок сил

інерції і сил пружності не схильна до раптових змін і компенсує їх на початку та в кінці циклу коливань вхідним і вихідним перехідними процесами [6]. Зменшення тривалості вхідного і вихідного перехідних процесів досягається за допомогою механічного демпфірування пластини п'єзоперетворювача. Досягти зменшення перехідних процесів, особливо вихідного, за рахунок демпфування пластини не завжди вдається. У той же час наявність тривалого перехідного процесу призводить до збільшення розміру так званої «мертвої зони» [7].

Особливо це має значення в низькочастотному ультразвуковому діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів з застосуванням поздовжньої та крутильних мод спрямованої хвилі.

Мертва зона представляє собою ділянку труби від місця встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени, в якій луно-сигнал від несучільності не відділяється від збудженого (початкового). Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями.

Тут вводиться такий параметр як роздільна здатність системи ультразвукового контролю, під якою уявляється здатність системи контролю роздільно приймати та відтворювати сигнали від двох або більше відбивачів, які близько розміщені один від іншого в напрямку розповсюдження спрямованої хвилі. Для нас перш за все важливо знати розмір мертвої зони на ділянці збудження низькочастотних коливань, тому що ця ділянка не буде проконтрольована.

Визначимо розмір мертвої зони реальної системи низькочастотного ультразвукового контролю протяжних трубопроводів, параметри збуджувального радіоімпульсу якої складають: частота синусоїдального сигналу $f_0 = 40$ кГц.

Кількість періодів сигналу $n = 10$ [8].

На рис. 4 наведено загальний вигляд зонduючого радіоімпульсу (а) та збудженого акустичного коливання у стінці труби (б).

Довжина X мертвої зони при використанні поздовжньої моди спрямованої хвилі з наведеними параметрами у протяжному трубопроводі може бути визначена за виразом[7]:

$$X = C(t_i + t_n) / 2. \quad (6)$$

Період T коливань синусоїдального сигналу частотою $f_0 = 40$ кГц буде дорівнювати:

$$T = \frac{1}{f_0} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

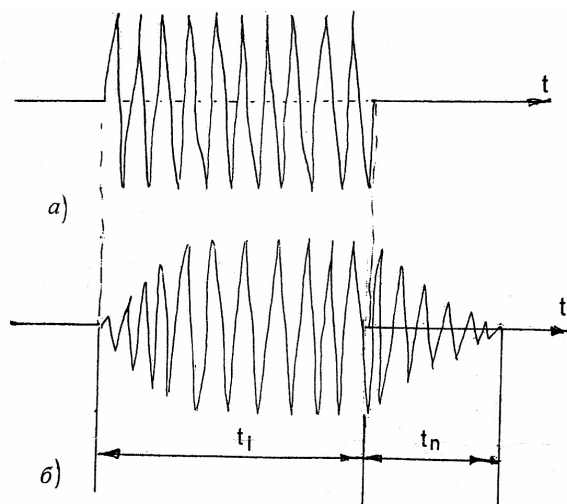


Рисунок 4 – Загальний вигляд зонduючого радіоімпульсу (а) та збудженого акустичного коливання в стінці труби (б), де: t_i - протяжність зонduючого імпульсу (тривалість вимушених коливань п'єзоперетворювача); t_n - протяжність перехідного процесу (тривалість вільних коливань п'єзоперетворювача)

Тоді тривалість прямокутного імпульсу буде складати $t_i = 25 \cdot 10^{-6}$ сек.

Тривалість вхідного і вихідного перехідних процесів згідно рис. 4 складає 5 коливань і дорівнює $t_n = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 125 \cdot 10^{-6}$ сек.

Тоді тривалість цугу збудженого в трубі акустичного коливання буде складати $t_i + t_n = 375 \cdot 10^{-6}$ сек.

При швидкості поздовжньої хвилі $L(0,2) C = 5000$ м/сек тривалість мертвої зони буде мати довжину

$$X = \frac{C(t_i + t_n)}{2} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 375 \cdot 10^{-6}}{2} = 937,5 \text{ мм} = 0,94 \text{ м.}$$

Наведений розрахунок показує, що тривалість мертвої зони, а відповідно неконтрольованої ділянки труби залежить від

частоти синусоїдального сигналу, кількості коливань в акустичному імпульсі та тривалості вихідного перехідного процесу цугу зондуючого коливання.

Відомо, що кожний імпульс (незалежно від форми) може бути зображений у вигляді ряду Фур'є як сума більшого чи меншого числа необмежених у часі складових коливань синусоїдальної форми, кратних основній частоті f_0 , які розміщуються в більш чи менш широкій смузі частот (частотного спектру).

Частотні компоненти спектру акустичного імпульсу прямокутної форми із заповненням несучої частотою f_0 (при $t = 0$) зосереджені в основному поблизу цієї частоти. Положення основного піку імпульсу на часовій шкалі відповідає частоті заповнення f_0 , а його ширина визначається тривалістю t_i імпульсу. Чим більше тривалість імпульсу, тим менша ширина головного частотного піку та смуги частот спектру. Чим коротший акустичний імпульс, тим ширша полоса частот, у якій розміщуються складові частот спектру із ще помітною амплітудою.

Зменшення тривалості мертвої зони при використанні акустичних імпульсів з прямокутною обвідною можна досягнути за рахунок зменшення тривалості t_i зондуючого імпульсу, яке можна здійснити двома шляхами:

1. Вибором несучої частоти f_0 в межах 20 – 100 кГц, які використовуються в низькочастотному ультразвуковому контролі протяжних трубопроводів у залежності від товщини стінки труби

2. Зменшенням числа періодів p несучої частоти в прямокутному акустичному імпульсі.

Зменшення тривалості t_i імпульсу може здійснюватися до визначеної межі за умови, що найбільша частина енергії акустичного прямокутного імпульсу буде міститися в основній частоті f_0 спектра.

Ще одним шляхом зменшення тривалості мертвої зони є зменшення тривалості вихідного перехідного процесу цугу зондуючого імпульсу, який впливає на тривалість усього цугу. Якщо поглянути на форму цього цугу, то можна

замітити, що при збудженні коливання акустичним імпульсом прямокутної форми амплітуда акустичного коливання в середовищі труби під час вхідного перехідного процесу збільшується поступово, потім залишається постійною в залежності від тривалості імпульсу, а потім поступово зменшується до нуля після закінчення прямокутного імпульсу під час вихідного перехідного процесу. Це означає, що цуг акустичного імпульсу в середовищі труби можна описати обвідною, форма якої відрізняється від форми обвідної прямокутного імпульсу. Можна стверджувати, що логічно спробувати вибрати форму обвідної імпульсу, яка б не відрізнялася від форми цугу коливання, яке збуджується в середовищі труби. Тоді тривалість цугу збуджуваного коливання в середовищі труби буде дорівнювати тривалості імпульсів, якими збуджуються п'єзоперетворювачі акустичної антени.

Саме цей принцип використовується в закордонних системах ультразвукового контролю протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями. Так для побудови обвідної кривої пакетних сигналів, які збуджують п'єзоперетворювачі акустичної антени, використовується так звана «функція Хеннінга» [8].

Функція Хеннінга в основному використовується в радіотехніці для виявлення гармонійних сигналів у широкосмуговому шумі при наявності інтенсивних гармонійних завад низької частоти. Це пов'язано з тим, що при обробці сигналів часто доводиться вирішувати задачі двох типів – задачу виявлення й задачу оцінювання. При виявленні необхідно дати відповідь на питання, чи дійсно спостерігається на даний час деякий сигнал з апріорно відомими параметрами. Оцінювання – це задача вимірювання значень параметрів, які описують сигнал. Часто сигнал зашумлений, на нього можуть накладатися заважаючі сигнали. Для багатьох застосувань найбільш інтересними є періодичні сигнали.

Цілком природно, що вирішення задач виявлення та оцінювання подібних сигналів пов'язане в їх розкладом за базисом, який складається із простих періодичних функцій Sin і Cos. Такий розклад сигналів можна здійснити за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), що ґрунтовно виконано при дослідженні

різноманітних функцій, які отримали назву «вікон», в роботі [9]. Із класичних вікон у наведеному дослідженні виділено прямокутне вікно (функція) Діріхле, трикутне вікно (функція)

Фейера та ціла сім'я виду $\text{Cos}^n(X)$, які залежать від параметра a , причому a , як правило, ціле число. В якості a частіше всього вибирають числа від 1 до 4. Найбільше застосовується вікно з $a=2$, яке отримало назву вікна Хеннінга, або

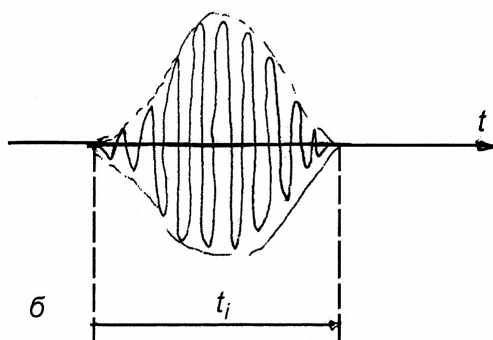
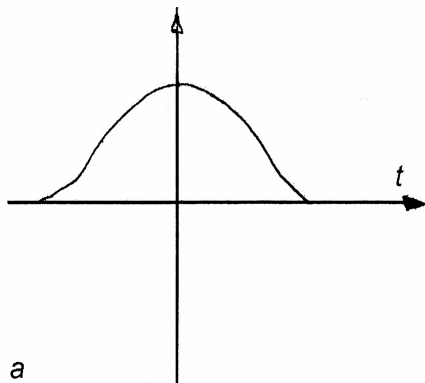


Рисунок 5 – Загальний вигляд вікна функції $\text{cos}^2(a)$ та радіоімпульсу функції Хеннінга

Математичну модель радіоімпульсу з обвідного типу функції Хеннінга в поточному часі можна записати у вигляді

$$f(t) = \begin{cases} A \cdot \text{cos}^2(\sin(2\pi f_0 t + \varphi_0)), & 0 \leq t \leq t_i, \\ 0, & t < 0 \text{ \& } t > t_i \end{cases} \quad (7)$$

Синусоїдальний сигнал с обвідною типу функції Хеннінга має вузький частотний спектр порівняно з частотним спектром радіоімпульсу прямокутної форми.

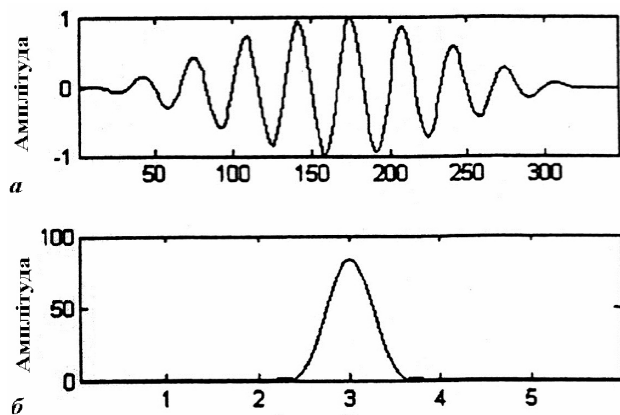


Рисунок 6 – Загальний вигляд зондуючого імпульсу з обвідною функції Хеннінга (а) та його частотний спектр (б)

функції Хеннінга. Саме ця функція, яка уявляє собою підняту косинусоїду, й використовується в низькочастотному ультразвуковому контролі як обвідна радіоімпульсу, що збуджує коливання в середовищі протяжного трубопроводу.

На рис. 5 наведено загальний вигляд вікна функції $\text{Cos}^2(a)$ та радіоімпульсу функції Хеннінга.

Використання обвідної синусоїдального сигналу типу функції Хеннінга дозволяє амплітуді синусоїдального сигналу несучої частоти поступово зростати до максимум на початковій частині обвідної, а потім поступово спадати на завершальній частині обвідної радіоімпульсу.

На рис. 6 в якості прикладу наведено загальний вигляд зондуючого імпульсу з обвідною функцією Хеннінга (а) та його частотного спектру (б) [10]. Зондуючий імпульс містить 10 періодів синусоїдальної спрямованої хвилі з середньою частотою $f_0 = 30$ кГц. Фактично сигнал синусоїдальної хвилі, що використовується для збудження п'єзоперетворювачів акустичної антени, модулюється за допомогою функції Хеннінга для того, щоби зменшити ширину смуги частот його спектру.

Висновки

Наявність мертвої зони та її розмір є важливою характеристикою чутливості низькочастотного діагностування технічного

стану протяжних трубопроводів спрямованими хвилями при виявленні несучільностей стінки труби. Використання обвідної у вигляді функції Хеннінга для модуляції збуджуваного синусоїдального сигналу дозволяє управляти тривалістю цугу акустичного коливання у стінці труби та вхідним і вихідним перехідними процесами, що в свою чергу зменшує тривалість мертвої зони при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями.

Список використаних джерел

1. Бондаренко О.Г. Основні характеристики та особливості низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. № 1. С. 5-23.
2. Takashi K., Fumitoshi S. Guided Wave Pipe Inspection and Monitoring System. *Журнал Японского сварочного общества*. 2006. V. 75. № 4. pp. 8-12.
3. Лагун І.І., Наконечний Р.А. Загальна класифікація сигналів та їх опрацювання. *Методи та прилади контролю якості*. 2009. № 22. С. 71-75.
4. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П.Бабак, С.В.Бабак, В.С.Еременко и др.; под ред. чл-корр. НАН Украины В.П.Бабака. К.: 2014. 823 с.
5. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав.ред. И.П.Голямина. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. 400 с.
6. Ультразвуковой контроль материалов/ под ред. Крауткремер Й., Крауткремер Г. М.: Металлургия, 1991. 752 с.
7. Выборнов Б.П. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
8. Kameyama S, Misu K., Wadaka S. Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave. *Hikakai Kensa*. 2003. v. 52. № 12. pp. 672-678.
9. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *ТИИЭР*. 1978. т. 66. № 1. pp. 60-96.
10. Mallott R., Mudge P., Gon T-H and W. Balachandran Analysis of cross-correlation and wavelet de-noising for the reduction of the effects of dispersion in long-range ultrasonic testing. *Insight*. 2007. vol. 49. № 6. pp. 350-355.

Referenses

1. Bondarenko O.H. Osnovni kharakterystyky ta osoblyvosti nyz'kochastotnoho khvyl'ovoho protsesu v protyazhnykh truboprovodakh. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2019. № 1. S. 5-23.
2. Takashi K., Fumitoshi S. Guided Wave Pipe Inspection and Monitoring System. *Zhurnal Yaponskoho svarochnoho obshchestva*. 2006. V. 75. № 4. pp. 8-12.
3. Lahun I.I., Nakonechnyy R.A. Zahal'na klasyfikatsiya syhnaliv ta yikh opratsyuvannya. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2009. № 22. S. 71-75.
4. Teoretycheskye osnovy ynformatsyonno-ymerytel'nykh system: Uchebnyk / V.P.Babak, S.V.Babak, V.S.Eremenko y dr.; pod red. chl-korr. NAN Ukrayny V.P.Babaka. K.: 2014. 823 s.
5. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsyklopedyya. Hlav.red. Y.P.Holyamyna. M.: Yzd-vo «Sovetskaya entsyklopedyya», 1979. 400 s.
6. Ul'trazvukovoy kontrol' materyalov/ pod red. Krautkremer Y., Krautkremer H. M.: Metallurhyya, 1991. 752 s.
7. Vybornov B.P. Ul'trazvukovaya defektoskopyya. M.: Metallurhyya, 1985. 256 s.
8. Kameyama S, Misu K., Wadaka S. Ultrasonic Test Instrument Using Guided Ware. *Hikakai Kensa*. 2003. v. 52. № 12. pp. 672-678.
9. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. *ТYYER*. 1978. т. 66. № 1. pp. 60-96.
10. Mallott R., Mudge P., Gon T-H and W. Balachandran Analysis of cross-correlation and wavelet de-noising for the reduction of the effects of dispersion in long-range ultrasonic testing. *Insight*. 2007. vol. 49. № 6. pp. 350-355.

УДК 691.3.07

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-36-43

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО МЕНІСКА

О. Г. Малько¹⁾, А. О. Малько²⁾, Г. В. Григорчук¹⁾

¹Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, malko.pochta@gmail.com

²Товариство з обмеженою відповідальністю «СЛОТ»,
вул. Незалежності, 67, м. Івано-Франківськ, 76000, kokakola@ukr.net

Шляхом математичного моделювання квазістатички капілярних поверхонь типу лежача крапля отримана методологічна база дослідження поверхнево-активних речовин за динамікою поверхневого натягу методом пульсуючого меніска. Сутність методу полягає в тому, що, шляхом прямої і зворотної подачі газу у меніск, реалізується процес пульсації меніска в околі максимального тиску в ньому, значення якого однозначно визначає поверхневий натяг на кожному циклі. Ефект полягає в тому, що меніск, при кожному циклі вимірювання, не захоплюється після моменту досягнення максимального тиску у ньому, а переходить у новий стійкий стан рівноваги, тобто процес адсорбції поверхнево-активних речовин не припиняється. Завдяки цьому запропонований метод відповідає точності вимірювання поверхневого натягу за методом максимального тиску у бульбашці і оперативності методу лежачої краплі. Можливість реалізації запропонованого методу теоретично обґрунтовано шляхом розробки математичної моделі процесу пульсації меніска в околі максимального тиску у ньому в системі замкнутій відносно кількості газової фази. На основі теоретичних досліджень результатів моделювання запропоновано структурну схему і розроблено алгоритм процесу визначення динамічних характеристик поверхневого натягу.

Управління процесом контролю здійснюється персональним комп'ютером через проміжний пристрій збору даних NI USB-6009. Це обумовлює необхідність розроблення алгоритму керування процесом вимірювання, а також забезпечення коректної обробки отриманих даних за описаною вище методикою. Дана умова була реалізована у програмному середовищі у вигляді віртуального приладу. Віртуальна складова приладу виконана за допомогою графічного програмного забезпечення LabVIEW, то замість коду в ньому використовується візуальні складові. Зручне керування роботою процесом вимірювання досягнуте тим, що на передню панель програми виведено усі налаштовуванні параметри у вигляді віртуальних кнопок, перемикачів, вікон вводу і вибору вхідної інформації, які відповідають конструкції установки. Для ефективної роботи підійде будь-який персональний комп'ютер, що має вільний USB – порт і встановлену програму LabVIEW, що забезпечить роботу даної конструкції.

Ключові слова: рідинний меніск, капілярна поверхня, гістерезис, пульсація, поверхневий натяг, структура, алгоритм, система.

By mathematical modeling of quasi-statics of capillary surfaces of the lying drop type, the methodological basis for the study of surfactants on the dynamics of surface tension by the method of pulsating meniscus was obtained. The essence of the method is that, by direct and reverse supply of gas to the meniscus, the process of pulsation of the meniscus in the vicinity of the maximum pressure in it, the value of which uniquely determines the surface tension on each cycle. The effect is that the meniscus, with each measurement cycle, does not close after reaching the maximum pressure in it, but goes into a new steady state of equilibrium, ie the process of adsorption of surfactants does not stop. Due to this, the proposed method corresponds to the accuracy of measuring the surface tension by the method of maximum pressure in the bubble and the efficiency of the lying drop method. The possibility of implementing the proposed method is theoretically justified by developing a mathematical model of the process of pulsation of the meniscus in the vicinity of the maximum pressure in the system closed relative to the amount of gas phase. Based on theoretical studies of the simulation results, a block diagram is proposed and an algorithm for the process of determining the dynamic characteristics of surface tension is developed.

The control process is controlled by a personal computer via an intermediate data acquisition device NI USB-6009. This necessitates the development of an algorithm for controlling the measurement process, as well as ensuring the correct processing of the obtained data according to the method described above. This condition was implemented in the software environment in the form of a virtual device. The virtual component of the device is made using the graphics software LabVIEW, then instead of code it uses visual components. Convenient control of the measurement

process is achieved by the fact that the front panel of the program displays all the settings in the form of virtual buttons, switches, input windows and selection of input information that corresponds to the design of the installation. Any personal computer with a free USB port and LabVIEW software installed to ensure this operation will work effectively.

Key words: liquid meniscus, capillary surface, hysteresis, pulsation, surface tension, structure, algorithm, system.

Вступ.

Поверхнево-активні властивості мають більшість органічних сполук (поверхнево-активні речовини - ПАР): спирти, кислоти, аміни, гидроперекиси, кетони, ефіри, солі карбонових кислот та ін [1]. Таким чином, інформація про вміст у воді ПАР може також служити інтегральною оцінкою ступеня її чистоти на предмет органічних включень.

Найбільш поширеними на теперішній час є методи, засновані на аналізі форми краплі або бульбашки, практично не мають обмежень за часом контролю процесу адсорбції, що дає можливість визначення концентрацій органічних включень. Однак даний метод має ряд істотних недоліків: вплив випаровування рідини на зміну обсягу меніска бульбашки при тривалому процесі дослідження; неможливість оперативного контролю концентрації органіки; неможливість використання в автоматизованих системах контролю.

За результатами математичного моделювання процесу пульсації рідинного меніска в околиці максимального тиску в системі замкнутої щодо кількості газової фази [2] запропоновано новий метод визначення динамічного поверхневого натягу (ПН) за вимірним тиску в пульсуючому меніску. Структура системи контролю органіки у природній і питній водах, та загальний алгоритм її функціонування наведені у роботі [3].

Опис процесу пульсації меніска

Сутність методу полягає в тому, що шляхом прямого і зворотного подачі газу у газовий пухирець, реалізується процес пульсації меніска в околиці максимального тиску, значення якого однозначно визначає поверхневий натяг на кожному циклі. Ефект полягає в тому, що бульбашка при кожному циклі не зривається після проходження максимального тиску, а переходить в новий стійкий стан рівноваги, тобто процес адсорбції ПАР здійснюється не безперервно на одну і ту ж поверхню розділу фаз.

Спрощену імітаційну схему процесу пульсації меніска капілярної поверхні бульбашки шляхом зміни її об'єму показано на рис.1, де зміна об'єму капілярної поверхні здійснюється шляхом переміщення плунжера.

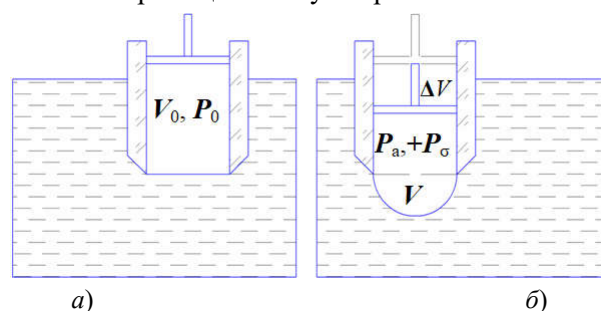


Рисунок 1 – Процес формування меніска

При переміщенні плунжера вниз із первинного положення (рис.1, а) газова фаза переходить із системи подачі і формує меніск зростаючого об'єму (рис.1, б). При зворотному ході плунжера навпаки, газова фаза переходить з меніска в систему подачі. З термодинамічної точки зору описаний процес можна вважати ізотермічним, оскільки об'єм бульбашки зневажливо малий по відношенню до об'єму рідини, а теплоємність рідини значно більша від теплоємності газової фази

При переміщенні плунжера вниз із первинного положення (рис.1, а) газова фаза переходить із системи подачі і формує меніск зростаючого об'єму (рис.1, б). При зворотному ході плунжера навпаки, газова фаза переходить з меніска в систему подачі. З термодинамічної точки зору описаний процес можна вважати ізотермічним, оскільки об'єм бульбашки зневажливо малий по відношенню до об'єму рідини, а теплоємність рідини значно більша від теплоємності газової фази

В результаті чисельного моделювання квазістатичної еволюції капілярних поверхонь типу лежача крапля на основі рівняння капілярності Лапласа у диференціальній формі [2] отримані залежності об'єму газового меніска V від зміни об'єму системи подачі газу ΔV . На

рис.2 наведено фрагмент залежності об'єму газового меніска V від зміни об'єму системи подачі газу ΔV з вираженим вигином і відповідна їй візуалізація положень об'єму меніска для , що пояснює процес гістерезису.

При витискуванні газу об'єм меніска зростає у напрямі 1-2. У точці 2 відбувається перехід 2-3, тобто стрибкоподібне зростання об'єму меніска. Наступна подача газу приводить до росту меніска у напрямі 3-4. Зворотній хід поршня від точки 4 відбувається по шляху 4-3-5. У точці 5 відбувається різке зменшення об'єму меніска по напрямку 5-6. При подальшому зменшенню об'єму системи (втягування газу) процес йде по шляху 6-1. При циклічному процесі витискування – втягування відбувається виражений ефект гістерезису по всіх характеристиках меніска (об'єму, тиску, площі поверхні тощо). Причому амплітуда петлі гістерезису залежить від радіуса вимірювального капіляра, початкового об'єму системи подачі і ПН досліджуваної рідини.

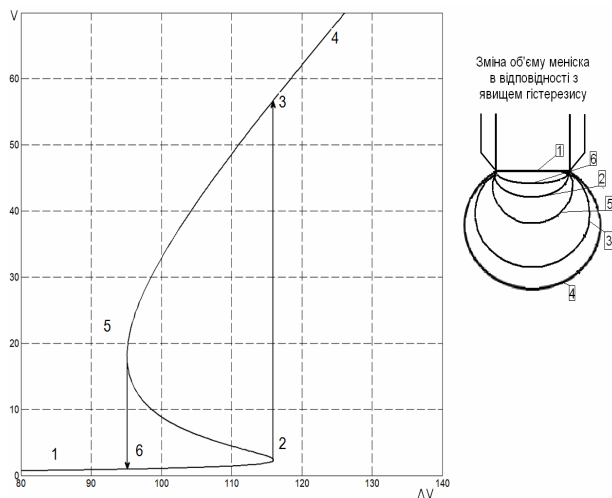


Рисунок 2 – Гістерезис зміни об'єму бульбашки від об'єму витискування і втягування поршнем (приріст 1-2-3-4, спад 4-3-5-6-1)

На рис. 3 представлено результати моделювання процесу пульсації меніска при рівномірному зростанні ΔV до максимально можливого значення, з наступним рівномірним падінням до нуля. Точками 1, 2, 3, 4, 5, 6 позначено відповідні положення згідно рис. 1.

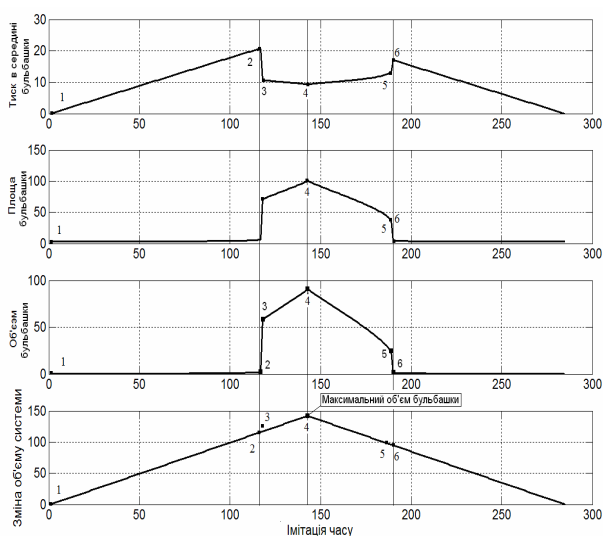


Рисунок 3 – Процес пульсації бульбашки при рівномірному зростанні ΔV від нуля до максимально можливого значення, з наступним рівномірним спаданням до нуля

На рис. 4 представлено результати моделювання циклічного процесу пульсації меніска, де в режимі витискування після проходження максимального тиску і його стрибкоподібного падіння (точки 2–3) здійснюється реверс (витискування – втягування), і в режимі втягування при стрибкоподібному зростанні тиску (точки 5–6) здійснюється реверс (втягування – витискування). Точками 1, 2, 3, 5, 6 позначено відповідно положення згідно рис. 2.

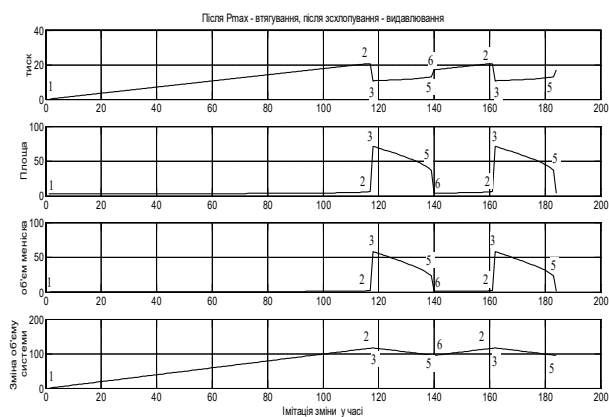


Рисунок 4 – Процес пульсації з реверсами в моменти стрибкоподібної зміни тиску в меніску

Структура системи визначення динамічного поверхневого натягу

Основні структурні одиниці розробленої конструкції приладу для визначення динамічного ПН та контролю концентрації ПАР у водних розчинах зображено на рис.3.1.

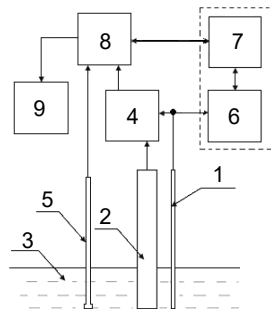


Рисунок 5 – Структурна схема системи визначення динамічного поверхневого натягу

Система містить такі блоки і вузли:

1 – вимірювальний капіляр з ножовим торцем, який занурюється у рідину 3 і сполучений із системою подачі повітря і одним із пліч диференціального давача тиску 4;

2 – гідростатичний компенсатор тиску з широким торцем, який занурюється в рідину 3 на однакову глибину з капіляром 1 і сполучений з плечем диференціального давача тиску 4, протилежним стосовно капіляра;

3 – досліджуваний розчин;

4 – диференційний давач тиску, який вимірює різниці тисків у капілярі 1 і гідростатичному компенсаторі тиску 2;

5 – термометр опору, який вимірює температури рідини 3 і служить для корекції результатів вимірювання ПН по температурі;

6 – вузол подачі повітря, який здійснює подачу повітря в капіляр 1 шляхом поступального переміщення плунжера у шприцевій системі;

7 – механізм переміщення плунжера вузла подачі повітря;

8 – блок обміну даними NI USB-6009, з'єднаний через USB порт з персональним комп'ютером 9 і призначений для обробки сигналів диференційного давача тиску 4, термометра опору 5 та керування процесом вимірювання (запуском та реверсом механізм переміщення плунжера 7);

9 – персональний комп'ютер, що здійснює обробку отриманих сигналів і керування процесом вимірювання.

Принцип роботи системи полягає в тому, що через вимірювальний капіляр 1 з вузла подачі повітря 6 за допомогою руху плунжера, який приводиться в рух двигуном (механізм переміщення плунжера вузла подачі повітря 7), подається газ. У результаті на торці капіляру, що занурений у водний розчин 3, утворюється бульбашка. Подальше витискування газу через капіляр 1 призводить до зростання бульбашки, процес продовжується до досягнення значення максимального тиску в меніску, яке фіксується диференційним давачем тиску 4. Після проходження стану максимального тиску, об'єм бульбашки стрибкоподібно зростає (перехід 2–3 на рис.2.), а значення тиску стрибкоподібно спадає без руйнування капілярної поверхні. Це є сигналом для переходу в режим всмоктування газу із бульбашки, шляхом реверсу руху двигуна і, відповідно, підняття плунжера. Площа поверхні розділу фаз при цьому зменшується, а тиск поступово збільшується до моменту стрибкоподібного зростання (перехід 5–6 на рис.2., що є сигналом до переходу в режим витискування бульбашки. Описані цикли вимірювання повторюються, доти, поки значення максимального тиску у меніску стає практично незмінним, що відповідає досягненню рівноважного ПН.

Гідростатичний компенсатор тиску 2 з'єднаний з диференційним давачем тиску 4 служить для компенсації тиску гідростатичного стовпа занурення у рідину 3, що дає можливість забезпечити незалежність результатів вимірювання від глибини занурення капіляра. Перед початком і після вимірювання слід використати вузол продування для очистки капіляра 1 від залишків рідини.

Керування роботою приладу проводиться за допомогою персонального комп'ютера 9. Передача отриманої інформації з диференційного давача 4 на персональний комп'ютер 9 здійснюється за допомогою блоку обміну даними 8, який приєднується до персонального комп'ютера через USB порт.

Алгоритм функціонування процесу вимірювання

Управління процесом контролю здійснюється персональним комп'ютером через проміжний пристрій збору даних NI USB-6009, розглянутий [4]. Це обумовлює необхідність розроблення алгоритму керування процесом вимірювання, а також забезпечення коректної обробки отриманих даних за описаною вище методикою. Дана умова була реалізована у програмному середовищі [83–84, 86–95] у вигляді віртуального приладу.

Узагальнена блок-схема алгоритму програми керування процесом вимірювання та обробки даних, врахуванням специфіки функціонування блоку збору даних NI USB-6009, показана на рис.5. Задана тактова частота виконання простих операцій програми в даному випадку рівна 40 кГц.

Послідовність операцій алгоритму програми є наступною.

1) На початку функціонування програми необхідно задати основні параметри, які визначають критерії виконання керуючих функцій алгоритму. Їх значення обумовлені апріорною інформацією про область зміни динамічного поверхневого натягу досліджуваної рідини. До даних параметрів слід віднести: приблизний час досягнення рівноважного поверхневого натягу, радіус вимірювального капіляра, що обумовлює чутливість вимірювань, наявність шумів сигналу вимірювань і т. п. Завдання параметрів може здійснюватись: введенням з клавіатури або зчитуватися з файлу, який попередньо введено у програмний модуль. В даному випадку задаються наступні параметри:

– dP_v – значення критерію досягнення максимального тиску у бульбашці в процесі зростання її об'єму, який визначає мінімальну величину стрибкоподібного спаду тиску після проходження максимуму (перехід 2–3, рис.2);

– dP_n – значення критерію досягнення моменту стрибкоподібного спадання об'єму бульбашки в процесі зменшення її об'єму, який визначає мінімальну величину стрибкоподібного зростання тиску (перехід 5–6, рис.2.);

– n – значення зсуву номерів у послідовності вимірювань для визначення

умови досягнення рівноважного поверхневого натягу;

– s – значення критерію досягнення рівноважного поверхневого натягу, який визначає максимальну різницю значень у послідовності вимірювань з різницею номерів n .

2) Здійснюється обнуління лічильника кількості циклів вимірювання – k і значення попереднього виміру P_1 у послідовності P_1, P_2 – вимірів надлишкового тиску у рідинному меніску, з метою коректності їх подальшого порівняння.

3) Процес вимірювання починається з команди на витискування бульбашки, що реалізується поданням імпульсу логічної одиниці на відповідний цифровий вихід блоку збору даних NI USB-6009.

4) На кожному такті здійснюється вимірювання тиску у рідинному меніску P_2 , що реалізується усередненням вибірки з п'яти послідовних вимірів.

5) Результати вимірювання тиску P_2 , за бажанням користувача, відображаються на моніторі у вигляді осцилограми розгорнутої в часі.

6) Після кожного наступного вимірювання тиску P_2 здійснюється порівняння з попереднім значенням P_1 , у разі стрибкоподібного спадання тиску на величину більше ніж dP_v (досягнення максимального тиску), процес видавлювання бульбашки припиняється, у протилежному випадку, після переприсвоєння послідовності вимірів P_1, P_2 процес витискування продовжується (перехід до п.3)

7) При досягненні максимального тиску фіксується його значення P_{max} , проводиться переприсвоєння значень послідовності вимірів P_1, P_2 , та здійснюється операція декрементування лічильника k .

8) За отриманим значенням P_{max} здійснюється розрахунок поверхневого натягу σ згідно залежностей [], побудовані для конкретного радіуса вимірювального капіляра.

9) Результати обчислень значення поверхневого натягу σ виводяться на монітор у вигляді осцилограми розгорнутої в часі (рис. 3.8) і, за бажанням користувача, записуються у файл для можливості наступної обробки.

10) Здійснюється оцінка на можливість перевірки досягнення рівноважного стану –

кількість проведених послідовних вимірів ПН k повинна бути більша від n .

11) При виконанні попередньої умови п.10 здійснюється порівняння значень двох вимірів σ у послідовності вимірювань з різницею номерів n .

12) Якщо неможливо зробити перевірку досягнення рівноважного стану ($k < n+1$), або стан рівноважного поверхневого натягу ϵ не досягнутий, то подається команда на втягування бульбашки, що реалізується поданням імпульсу логічної одиниці на відповідний цифровий вихід блоку збору даних NI USB-6009.

13) Аналогічно як в п.4 проводиться вимірювання тиску у бульбашці P_2 , що реалізується усередненням вибірки з п'яти послідовних вимірів.

14) Після кожного вимірювання тиску P_2 здійснюється порівняння з попереднім значенням P_1 , у разі стрибкоподібного зростання тиску на величину більше ніж dP_n (стрибкоподібне зменшення об'єму бульбашки) процес втягування бульбашки припиняється, і проводиться перехід до режиму витискування (перехід до п.3).

15) У протилежному випадку, після переприсвоєння послідовності вимірювань P_1, P_2 процес втягування продовжується (перехід до п.12).

16) Якщо модуль різниці цих вимірювань є меншим значення критерію досягнення рівноважного поверхневого натягу s , то вважається, що досягнуто стан рівноважного поверхневого натягу.

17) За отриманою динамічною характеристикою $\sigma(t)$ розраховується концентрація ПАР – C .

18) Результати розрахунку виводяться на екран комп'ютера та можуть бути записані у заданий файл.

19) Процес вимірювання закінчено.

Для полегшення роботи оператора з приладом і програмою було розроблено зручний інтерфейс (рис.6). На екран монітора інформація виводиться графічно, у вигляді сигналу значення поверхневого натягу в часі, а керування роботою вимірювальної установки здійснюється за допомогою віртуальних клавіш. Розроблена програма може працювати у двох режимах: «ручному» і «автоматичному». Вибір варіанту режиму роботи здійснюється перед

початком роботи за допомогою перемикача, що знаходиться на віртуальному інтерфейсі програмного забезпечення і відмічається спеціальним «індикатором режиму роботи». Для початку вимірювання тиску необхідно натиснути віртуальну кнопку «пуск».

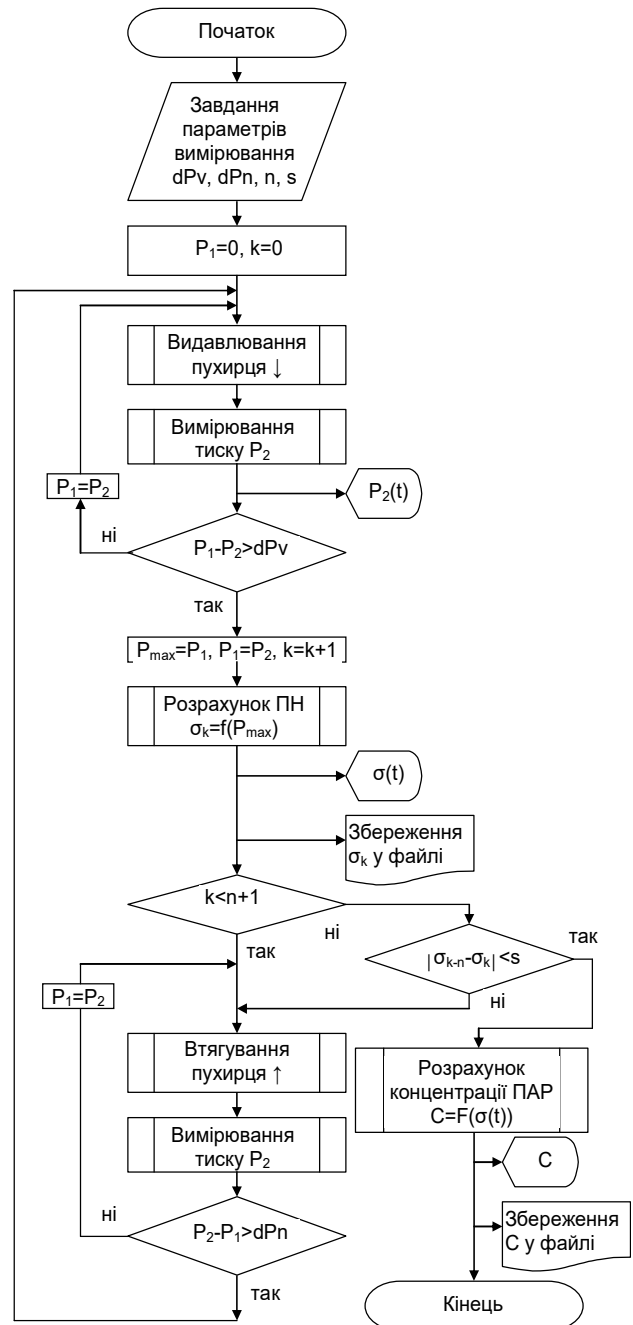


Рисунок 6 – Блок схема алгоритму програми керування процесом вимірювання та обробки даних

Обидва режими вмикаються шляхом натискування на віртуальний перемикач «включити подачу». Після чого поступає імпульс на контролер двигуна, запускаючи рух плунжера. Вимірювання можна починати як з витискування, так і з всмоктування, для цього потрібно натиснути відповідну віртуальну кнопку «почати з витискування» або «почати з втягування».

При роботі програми у «ручному» режимі керування рухом двигуна здійснюється оператором за допомогою перемикача «втягування»–«витискування» на інтерфейсі програми. Максимальне значення тиску і поверхневий натяг фіксується візуально за допомогою введеного на екран графічного сигналу. Для припинення роботи натискається віртуальна кнопка «Стоп».

При вибраному автоматичному режимі роботи, керування установкою проходить під керівництвом комп'ютера, який самостійно фіксує максимальні значення тиску і перемикає рух двигуна у протилежному напрямі. В цьому випадку для початку роботи достатньо натискання віртуальної кнопки «включити подачу». Для припинення роботи приладу потрібно натиснути віртуальну клавішу «Стоп». Напрямок руху плунжера можна дізнатися за допомогою «індикатора руху поршня».

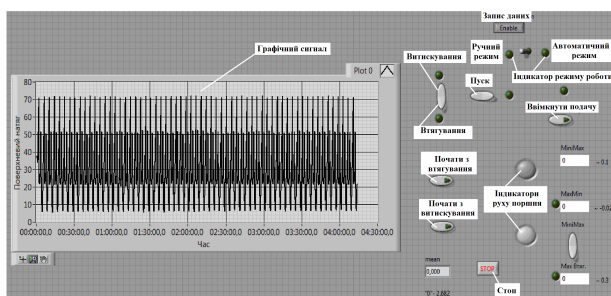


Рисунок 7 – Інтерфейс програми керування процесом вимірювання і обробки даних

Віртуальна складова приладу виконана за допомогою графічного програмного забезпечення [6], то замість коду в ньому використовується візуальні складові. Графічні зображення тексту програми показано на рис. 7 і рис. 8 (для автоматичного і ручного режиму роботи з приладом).

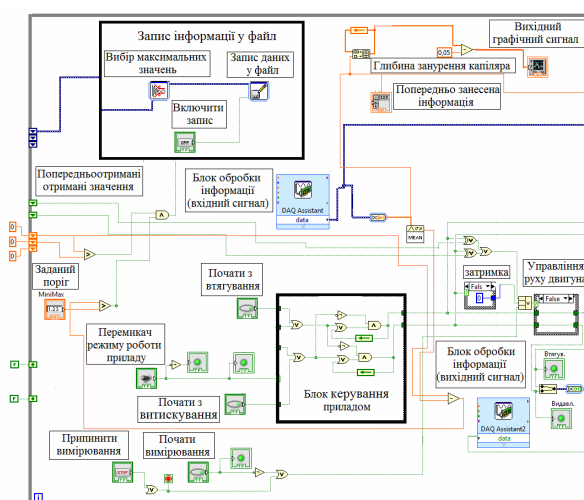


Рисунок 8 – Графічне відображення робочої програми для роботи в автоматичному режимі

Зручне керування роботою системи вимірювання досягнуте тим, що на передню панель програми виведено усі налаштовувані параметри у вигляді віртуальних кнопок, перемикачів, вікон вводу і вибору вхідної інформації, які відповідають конструкції установки.

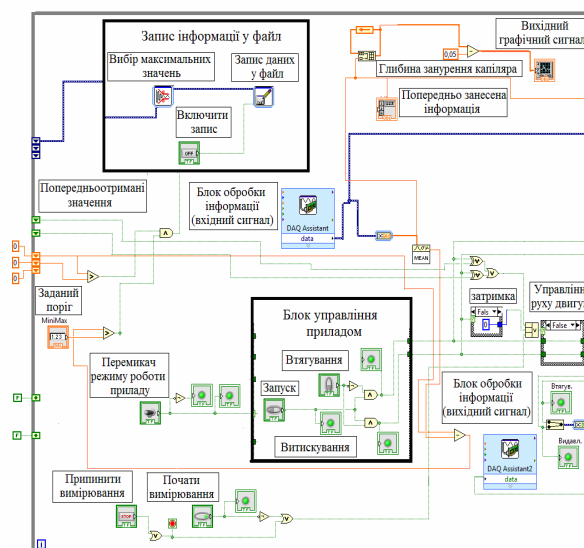


Рисунок 9 – Графічне відображення робочої програми при роботі у ручному режимі

Також слід зазначити, що розроблена програма проводить запис отриманої інформації у числовій формі в форматі txt та графічно, що значно полегшує наступну обробку результатів вимірювання і використання її в обчисленнях. Запам'ятовування розпочинається після

натискання віртуальної клавіші «запис даних» на екрані.

Висновки.

На основі визначеного алгоритму функціонування системи вимірювання динамічного поверхневого натягу на предмет контролю органіки у природній і питній водах розроблена і апробована графічна програма у середовищі LabView. Апробація програми проведена на реальній системі за допомогою багатофункціонального пристрою введення-виведення USB 6009

Список використаних джерел

1. В. Б. Файнерман, В. Я. Уманський, Б. С. Горелік, Д. О. Ластков, О. Г. Козаков, О контроле содержания органических соединений в питьевой и природной воде методом межфазной тензиометрии. - Вестн. гиг. эпид. – 2006. – Т. 10, № 1. – С. 181 - 185.
2. О. Г. Малько, А. О. Малько, Математичне моделювання процесу пульсації рідинного меніска в околі максимального тиску: 6 -та Міжнародна науково-практична конференція ІТКІ - 15, Прикарпатський національний університет, Івано-Франківськ, 2015. – С. 214 – 216.
3. О. Г. Малько, А. О. Малько, Система оперативного контролю органіки у природній і питній водах : 8-ма Міжнародна науково-практична конференція ІТКІ - 17, Прикарпатський національний університет, Івано-Франківськ, 2017. – С. 426-429.
4. Руководство пользователя и технические характеристики USB-6008/6009 [електронний ресурс] – Режим доступу: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/daq/ni_usb_6008_6009.pdf – Назва з екрану.

5. Ю. С. Магда. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

References

1. V. B. Faynerman, V. YA. Umans'kyu, B.S. Horelik, D.O. Lastkov, O.H.Kozakov, O kontrole soderzhanyya orhanycheskykh soedynenyy v pyt'evoy u pryrodnoy vode metodom mezhfaznoy tenzyometryy. - Vestn. hyh. epyd. – 2006. – Т. 10, № 1. – S. 181 - 185.
2. О. Н. Mal'ko, А. О. Mal'ko, Matematychnе modelyuvannya protsesu pul'satsiyi ridynnoho meniska v okoli maksymal'noho tysku: 6 -ta Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya ITKI - 15, Prykarpат-s'kyu natsional'nyy universytet, Ivano-Frankivs'k, 2015. – S. 214 – 216.
3. О. Н. Mal'ko, А. О. Mal'ko, Systema operatyvnoho kontrolyu orhaniky u pryrodniy i pytniy vodakh. : 8-ma Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya ITKI - 17, Prykarpат-s'kyu natsional'nyy universytet, Ivano-Frankivs'k, 2017. – S. 426-429.
4. Rukovodstvo pol'zovatelya y tekhnicheskyye kharakterystyky USB-6008/6009 [elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: ftp://ftp.ni.com/pub/branches/russia/daq/ni_usb_6008_6009.pdf – Nazva z ekranu.
5. YU. S. Mahda. LabVIEW: praktycheskyy kurs dlya ynzhenerov y razrabotchykov. – M.: DMK Press, 2012. – 208 s.

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 006.91

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-44-49

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ КІНЕМАТИЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РОЗПЛАВІВ (РІДИН)

¹Т. О. Ваврик, ¹О. С. Царева, ¹А. В. Семенчук, ²В. Д. Царев, ¹Л. М. Гобир, ¹Б. С. Незамай¹Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: pma@iung.edu.ua²Інститут нафтогазової інженерії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: a.if.ua1981@gmail.com

Здійснено математичне моделювання розрахунку кінематичної в'язкості рідини (розплаву) на основі нестационарних методів. Обґрунтовано вибір нестационарного методу досліджень для здійснення теоретичного розрахунку кінематичної в'язкості розплаву (рідини). Визначено теоретичну основу обраного методу досліджень. Перевірено відповідність результатів числової реалізації теоретичних розрахунків результатам обраного експерименту. Досліджено наявність взаємозв'язків кінематичної в'язкості з іншими фізико-хімічними властивостями розплаву (рідини) на прикладі температури. Розглянуто існуючі стаціонарні та нестационарні методи дослідження кінематичної в'язкості, визначено її переваги та недоліки. Визначено, що теоретичний розрахунок кінематичної в'язкості шляхом числової реалізації математичної моделі обчислюється методом послідовних наближень. За вихідними даними взятого за основу експерименту побудовано ізотерми кінематичної в'язкості. За результатами теоретичних розрахунків побудовано теоретичну криву. Визначено, що теоретична крива та ізотерми розрахунку кінематичної в'язкості за обраною температурою значно наближені, що дає змогу стверджувати про певну точність математичної моделі. В ході аналізу візуалізації вихідних даних обраного експерименту та теоретичної кривої встановлено, що ізотерми змінюються експоненціально. Це вказує на існування залежності в'язкості від фізико-хімічних властивостей розплаву (рідини), зокрема, температури. Характер змін ізотерм та теоретичної кривої збігається.

Ключові слова: математична модель, кінематична в'язкість, розплав, метод послідовних наближень, нестационарні методи досліджень, фізико-хімічні властивості.

In the article mathematical modeling of calculation of kinematic viscosity of liquid (melt) on the basis of nonstationary methods was considered. The choice of non-stationary research method for the theoretical calculation of the kinematic viscosity of the melt (liquid) was substantiated. The theoretical basis of the chosen research method was determined. The matching results of theoretical calculations numerical realization to the results of the selected experiment was checked. The presence of relationships between kinematic viscosity and other physicochemical properties of the melt (liquid) on the example of temperature was studied. Stationary and non-stationary methods of kinematic viscosity research was considered, its advantages and disadvantages was determined. It is determined that the theoretical calculation of kinematic viscosity by numerical realization of a mathematical model is calculated using the method of successive approximations. Based on the initial data of the experiment, the kinematic viscosity isotherms were constructed. Based on the results of theoretical calculations, a theoretical curve was constructed. It is determined that the theoretical curve and isotherms for calculating the kinematic viscosity at the selected temperature are much closer, which suggests a certain accuracy of the mathematical model. During the analysis of the visualization of the initial data of the selected experiment and the theoretical curve, it was found that the isotherms change exponentially. This indicates the existence of a dependence of the viscosity on the physicochemical properties of the melt (liquid), in particular, temperature. The nature of the changes in the isotherms and the theoretical curve coincides.

Keywords: mathematical model, kinematic viscosity, melt, method of successive approximations, non-stationary research methods, liquid, physicochemical properties

Вступ. Особливості будови рідкого металу (а також розплавів), обумовлені міжчастковою взаємодією, впливають на якість металопродукції. Зокрема, на взаємозв'язку структури розплавів і сплавів в рідкому стані базуються способи фізико-хімічної дії на розплави для створення нових матеріалів з кращим рівнем службових характеристик. Тому теоретичні дослідження методом математичного моделювання в області розрахунку кінематичної в'язкості розплавів є не лише актуальними з наукової точки зору, а й носять прикладний характер.

Аналіз публікацій та постановка завдання дослідження.

Сучасні уявлення про будову рідких металів і розплавів базуються на , а тому числі, і на дослідженні їх фізико-хімічних властивостей, зокрема, в'язкості [1-5]. Займаючи проміжне місце огляд між газом і твердим тілом, металічні розплави мають ряд властивостей, характерних для кожного з цих станів. За певних умов металічний розплав, як і інші рідини, наближається до газів за рядів фізико-хімічних властивостей. Разом із тим, теоретичні дослідження [3-6] теоретичні дослідження в'язкості ґрунтуються на залежності між в'язкістю рідини та структурою її молекул. Інформацію про в'язкість отримують переважно емпіричним шляхом [7], адже жодна теорія не дає простої залежності, яка б дозволила визначити в'язкість рідин апіорі. За відсутності експериментальних даних в багатьох випадках користуються неточними методами розрахунку в'язкості [6].

Основні методи вимірювання в'язкості поділяють [1-2, 8-11] на стаціонарні (методи капілярного витікання, обертання циліндрів і падаючих кульок) і нестаціонарні, засновані на спостереженні крутильних коливань системи, пов'язані з досліджуваною рідиною.

До стаціонарних методів досліджень в'язкості рідин належать методи Пуазейля і Стокса.

У методах капілярного витікання використовується закон Пуазейля для стаціонарної течії в'язкої рідини капіляром при ламінарному потоці без урахування краєвих ефектів і витрати енергії тиску:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot V \cdot l} \quad (1)$$

де:

R – радіус капіляра;

l – його довжина;

ΔP – різниця тисків на кінцях капіляра;

V – об'єм рідини, яка протікає через капіляр за одиницю часу

Недолік методу в тому, що він нема способу, як враховувати краєві ефекти на кінцях капіляра: поправку на довжину, зумовлену початковою ділянкою, і поправку на зміну кінетичної енергії рідини при переході від нульової швидкості у верхньому резервуарі до відмінної від нуля швидкості в капілярі. Також існують проблеми пов'язані з вибором матеріалу для капіляра та технологією його виготовлення.

Метод Стокса більш досконалий теоретично. Коефіцієнт в'язкості η визначається за формулою:

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot (\rho' - \rho) \cdot g}{9\nu(1 + 2.4 \frac{r}{R}) \cdot (1 + 3.1 \frac{r}{L})} \quad (2)$$

де:

ν – швидкість рівномірного руху кульки радіуса r ;

ρ' і ρ – густина кульки та рідини відповідно;

R – радіус циліндричної посудини, віссю якої у в'язкій рідині рухається кулька;

L – довжина посудини;

g – прискорення вільного падіння.

Недоліки використання цього методу зумовлені великими розмірами приладу, який потребує значної кількості досліджуваної рідини і, передбачає необхідністю її рівномірного нагрівання.

Нестаціонарні методи [8-11] базуються на спостереженні за крутильними коливаннями системи, пов'язаної з рідиною. До нестаціонарних належать метод, що базується на вивченні коливань тіла, зануреного в досліджувану рідину, і метод, на основі вивчення затухаючих коливань циліндра або порожньої кулі, заповнених досліджуваною

рідиною і підвішених на пружній нитці. Саме за допомогою нестационарних методів досліджень визначається кінематична в'язкість [7,8,9].

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми.

Існуючі теоретичні дослідження визначення розрахунку кінематичної в'язкості розплавів (рідин) не дають точного результату, на який можна було б опиратися в подальших дослідженнях. Математично теорія нестационарних методів складніша, ніж стаціонарних, тому вони не так поширені. Проведення емпіричних досліджень не завжди є виправданим з огляду на мету та цілі. Водночас, запропонований метод теоретичного розрахунку кінематичної в'язкості потребує підтвердження. Тому важливо за наявності даних обраного експерименту перевірити на адекватність та точність математичну модель на основі нестационарного методу.

Формулювання цілей статті

Обґрунтувати здійснення теоретичного розрахунку кінематичної в'язкості розплавів (рідин) на основі нестационарного методу досліджень. Визначити теоретичну основу обраного методу досліджень. Перевірити відповідність результатів числової реалізації теоретичних розрахунків результатам обраного експерименту. Дослідити наявність взаємозв'язків кінематичної в'язкості з іншими фізико-хімічними властивостями розплавів (рідин).

Висвітлення основного матеріалу досліджень

Експериментально в'язкість досліджуваних розплавів вимірювалась методом, що базується на вивченні затухаючих коливань циліндра, наповненого рідиною і підвішеного на пружній нитці. Математичну модель розрахунку кінематичної в'язкості розроблено на основі методу [7]

Теоретичну основу моделі складають такі твердження:

1. Ковзання між рідиною та внутрішньою поверхнею циліндра відсутнє;
2. Коливання циліндра розглядається через досить великий проміжок часу після їх початку, коли початковий розподіл швидкостей не впливає на рух рідини;
3. Амплітуди коливань циліндра малі;

4. Рух рідини в циліндрі описується з достатньою точністю без впливу нелінійних членів рівняння Нав'є-Стокса для рідини, що не стискається:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \vec{V}$$

де:

- \vec{F} – напруженість поля масових сил;
- ρ – густина рідини;
- ν – кінематична в'язкість рідини;
- P – тиск.

Перше наближення є загальноприйнятим у віскозиметрії [1,2]. Друге і третє припущення означають, що необхідно брати до уваги регулярні коливання, які задовольняють умові лінійної залежності логарифма амплітуди від номера коливань.

На підвісну систему, яка складається із циліндра, наповненого рідиною і підвішеного на пружній нитці, діють три види моментів сил: пружний момент кручення нитки, пропорційний куту закручування; момент сил внутрішнього тертя, зумовлений наявністю рідини в циліндрі; момент сил зовнішнього тертя, зумовлений наявністю газового середовища.

Вирішення гідродинамічної задачі крутильно-коливальних рухів циліндра за методом [7] передбачає, що диференціальне рівняння руху матиме вид:

$$I \frac{d^2 \varphi'}{dt^2} + K \varphi' = -L \frac{d\varphi}{dt} - L \frac{d\varphi'}{dt}$$

де:

- I – момент інерції всієї підвісної системи без рідини;
- φ – кутове зміщення циліндра;
- φ' – дійсна частина кутового зміщення;
- K – коефіцієнт пружності нитки підвісу;

$L \frac{d\varphi}{dt}$ – момент сил тертя, які діють на внутрішню поверхню циліндра і зумовлені наявністю рідини;

$L \frac{d\varphi'}{dt}$ – сумарний момент тертя, обумовлений газовим середовищем, яке оточує підвісну систему.

При розв'язанні рівняння (2) отримано три формули для визначення рідини, область можливого застосування яких визначається параметром:

$$\zeta = R \sqrt{\frac{2\pi}{\tau\nu}}$$

де:

R – радіус циліндра;
 τ – період коливань підвісної системи;
 ν – кінематична в'язкість.

При $\zeta \geq 10$ для області малов'язких рідин (якими, частково, є і металічні розплави) в'язкість визначається за формулою:

$$\nu = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{I}{MR}\right)^2 \cdot \frac{(\delta - \delta_0 \cdot \frac{\tau}{\tau_0})^2}{\sigma\delta}$$

де:

M – маса рідини;
 R – внутрішній радіус циліндра;
 δ, δ_0 – логарифмічні декременти коливань наповненої і порожньої системи відповідно;
 τ, τ_0 – періоди коливань наповненої і порожньої системи відповідно.

Величина σ при вільному верхньому меніску визначається виразом:

$$\sigma = 1 - 1.5x - \frac{3}{8}x^2 - a + \frac{2R}{H} \cdot (b - cx)$$

де:

$x = \frac{\delta}{2\pi}$;
 H – висота зразків;
 a, b, c – коефіцієнти, які визначаються за допомогою графіків або таблиць [7].

Математична модель на основі обраної методики передбачає, що знаходження кінематичної в'язкості ν обчислюється методом послідовних наближень. Спершу вважають $\sigma = 1$ і за формулою (4) обчислюють в'язкість у нульовому наближенні ν_0 . Потім із виразу:

$$Y_n = \frac{2\pi R^2}{\tau \cdot \nu_{n-1}}$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ обчислюють параметр Y_n і знаходять значення коефіцієнтів a, b, c для визначення σ

Значення σ_n розраховують за допомогою формули: (5)

$$\nu_n = \frac{\nu_{n-1}}{\sigma_n^2}$$

Відтак знаходять кінематичну в'язкість в наступному наближенні. Розрахунок продовжується доти, поки не буде виконуватись умова $\nu_n \approx \nu_{n-1}$.

Момент інерції підвісної системи визначається за допомогою еталона (диск радіусом 50 мм) за формулою: (6)

$$I = I_{et} \cdot \frac{\tau_0^2}{\tau_{et}^2 - \tau_0^2}$$

де:

I_{et} – момент інерції еталона;

$$I_{et} = \frac{mR^2}{2}$$

τ_0, τ_{et} – періоди коливань підвісної системи порожньо і з еталоном відповідно.

Тривалість періодів, за які проводилися вимірювання, – 50 коливань.

Період (τ) і декремент коливань (δ) підвісної системи з дослідною речовиною визначались за 5 - 10 коливань і обчислювалися за формулою

$$\delta = \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right)$$

де:

n – число коливань;

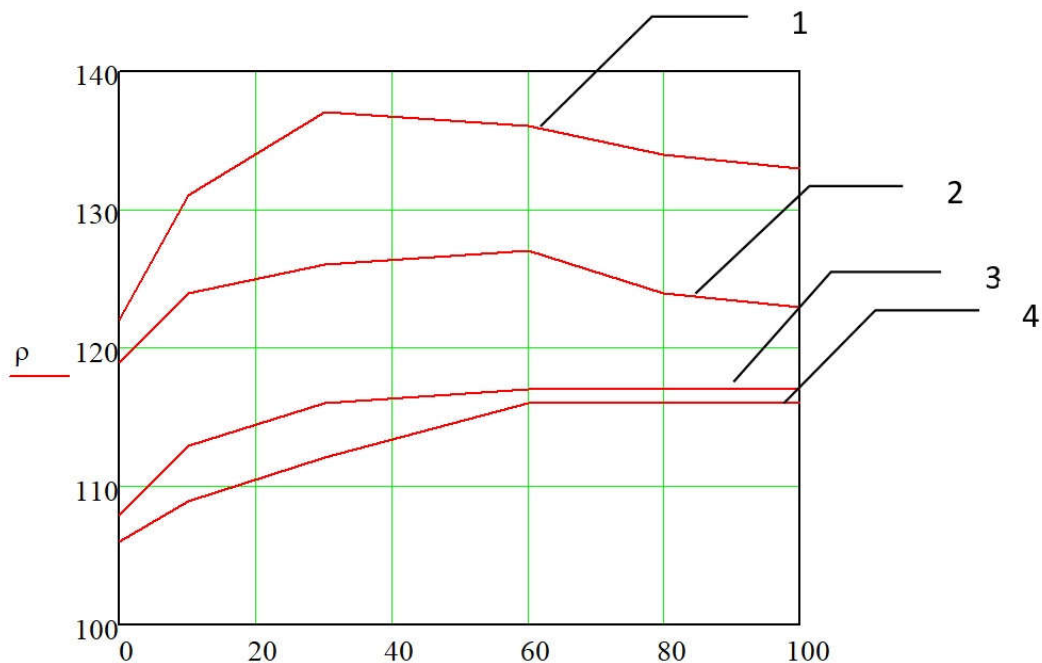
A_0, A_n – початкова і кінцева амплітуда коливань;

При розрахунку кінематичної в'язкості також враховували температурну залежність декременту коливань порожньої системи.

Експериментально [7] вимірювання в'язкості досліджуваних розплавів здійснювалось у режимі (8) нагрівання і охолодження. Перед початком вимірювань для повного розплавлення досліджуваного сплаву давали витримку 1 -1.5 години. При кожній наступній зміні температур витримка має складати 5 - 10 вимірювань. Дослідження

проводились на зразках із вмістом сурми 0,10,20,30,60,80,100 Atm%. За вихідними даними експерименту побудовані ізотерми в'язкості рис.1. (графік 1,2,3). З графіків робимо

висновок, що ізотерми змінюються по експоненціальній залежності в'язкості від температури.



- 1- В'язкість системи при температурі 400⁰
- 2- В'язкість системи при температурі 5000
- 3- В'язкість системи при температурі 7000
- 4- Теоретична крива

Рисунок 1 – Ізотерми в'язкості системи Pb-Sb

За результатами числової реалізації математичної моделі побудовано теоретичну криву, яка має відображати результати числової реалізації моделі розрахунку в'язкості (рис. 1, графік 4)

Результати теоретичних розрахунків числової реалізації математичної моделі практично накладаються на ізотерму (рис. 1, графік 4), побудовану на основі вихідних даних експерименту. Також теоретична крива, як і ізотерма 3, демонструє існування експоненціальній залежності в'язкості температури. Таким чином, можемо стверджувати про існування залежності кінематичної в'язкості від фізико-хімічних властивостей розплаву (рідини).

Висновок. У результаті числової реалізації математичної моделі розрахунку кінематичної в'язкості розплавів (рідин) вдалося отримати

теоретичну криву, яка практично накладається на ізотерми, побудовані за вихідними даними експерименту. У результаті проведених розрахунків та візуалізації вихідних даних експерименту вдалося встановити існування експоненціальній залежності кінематичної в'язкості від температури.

Список використаних джерел

1. Курс фізики / За ред. І.Є. Лопатинського. Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2002
2. А.М. Толкачов, О.В. Третьяков. Молекулярна фізика і термодинаміка. Загальна фізика. Київ: Академія ВВ, 2007. С. 78-84.
3. Bilyk R., Liudkevych U., Mudry S. Structure and short range order in liquid Ga. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2017. Вип. 25 С. 7-13.

4. Білик Р. Термодинамічні властивості та структура рідких розплавів індію і галію. Вісник Львівського університету. 2017. Вип. 54. С. 30-36.

5. Пригунова А. С., Петров С. С. Будова металевих розплавів і її взаємозв'язок із твердим станом. Металознавство та обробка металів. 2016. №2. С. 17-29

6. Крих Г. Б. Особливості застосування реологічних моделей неньютонівських рідин [Електронний ресурс]. Код доступу - vlp.com.ua/files/11_46.pdf

7. Швидковский Е. Г. Некоторые вопросы вязкости расплавленных металлов. Москва: Гостехиздат. 1955. 207 с.

8. Клым Н. М., Мудрый С. И., Петрук А. А. Ближний порядок в расплавах системы Pb-Cd. Известия вузов. Физика. 1982. № 8. С.109-111.

9. Склярчук В. М., Якимович А. С., Дуфанець М. В. Розрахунок в'язкості розплавів системи Al-Cu. Металлофізика и новейшие технологии. 2008. Т. 30. С. 313–319.

10. Pecharsky V. K.. Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. Springer. 2005. 713p.

11. Mudry S., Shtablavyi I., Liudkevych U., Winczewski S. Structure and thermal expansion of liquid bismuth. *Materials Science-Poland*. 2015. Vol. 33 (4). P. 767-773.

References

1. Kurs fizyky / Za red. I.YE. Lopatyns'koho. L'viv: Vyd-vo "Beskyd Bit", 2002

2. А.М. Tolkachov, О.В. Tret'yakov. Molekulyarna fizyka i termodynamika. Zahal'na fizyka. Kyiv: Akademiya VV, 2007. S. 78-84.

3. Bilyk R., Liudkevych U., Mudry S. Structure and short range order in liquid Ga. Fyzyko-matematychnе modelyuvannya ta informatsiyini tekhnolohiyi. 2017. Vyp. 25 S. 7-13.

4. Bilyk R. Termodynamichni vlastyivosti ta struktura ridkykh rozplaviv indiyu i haliyu. Visnyk L'vivs'koho universytetu. 2017. Vyp. 54. S. 30-36.

5. Pryhunova A. S., Petrov S. S. Budova metalovykh rozplaviv i yiyi vzayemozv'yazok iz tverdym stanom. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv. 2016. №2. S. 17-29

6. Krykh H. B. Osoblyvosti zastosuvannya reolohichnykh modeley nen'yutonivs'kykh ridyn [Elektronnyy resurs]. Kod dostupu - vlp.com.ua/files/11_46.pdf

7. Shvydkovskyy E. H. Nekotorye voprosy v'yazkosti rasplavlennykh metallov. Moskva: Hosttekhizdat. 1955. 207 s.

8. Klym N. M., Mudryy S. Y., Petruk A. A. Blyzhnyy poriyadok v rasplavakh systemy Pb-Cd. Yzvestyia vuzov. Fyzyka. 1982. № 8. S.109-111.

9. Sklyarchuk V. M., Yakymovych A. S., Dufanets' M. V.. Rozrakhunok v'yazkosti rozplaviv systemy Al-Cu. Metallofyzika y noveyshye tekhnolohyy. 2008. T. 30. S. 313–319.

10. Pecharsky V. K.. Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. Springer. 2005. 713p.

11. Mudry S., Shtablavyi I., Liudkevych U., Winczewski S. Structure and thermal expansion of liquid bismuth. *Materials Science-Poland*. 2015. Vol. 33 (4). P. 767-773.

УДК 658.562

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-50-58

АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РИЗИКІВ ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В МЕТРОЛОГІЧНІЙ СФЕРІ

Т.П. Гут^{1}, М.М. Микийчук²*

¹ Державне підприємство “КИЇВСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”;
вул. Січневого прориву, 84, м. Біла Церква, Київська обл., 09113; e-mail: tarasgut@ukr.net

² Національний університет “Львівська політехніка” (Львів, Україна), директор інституту комп’ютерних технологій, автоматики та метрології;
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013; e-mail: mykolamm@ukr.net

Стаття присвячена дослідженням щодо визначення ризиків діяльності в метрологічній сфері та факторів, що їх спричиняють. В роботі обґрунтовані підходи до класифікації інноваційних ризиків калібрувальних лабораторій, запропоновано загальну схему процесу управління метрологічними ризиками і наведено механізми своєчасного їх попередження або усунення, що підвищить результативність діяльності.

Процес управління ризиками охоплює різні аспекти роботи з ризиком, від ідентифікації і аналізу ризиків до оцінки їх прийнятності і визначення потенційних можливостей зниження ризику за допомогою вибору, реалізації і контролю відповідних управлінських дій. Діяльність з управління ризиками повинна охоплювати такі основні напрямки (етапи): ідентифікацію (складання переліку) ризику, оцінку ймовірності виникнення, вибір методу та засобів (інструментів) управління ризиком, запобігання, контролювання, фінансування ризику, оцінку результатів. Особливо актуальним є питання управління метрологічними ризиками, як основними ризиками, які визначають ступінь керованості процесами вимірювань, рівень контролю точності результатів даних процесів, а отже, і затрати на їх забезпечення. Основною метою оцінювання метрологічного ризику є систематизація можливих невідповідностей, що можуть виникнути під час виконання вимірювань та створення умов для ранжування процесів метрологічної діяльності випробувальних та калібрувальних лабораторій за рівнем втрат якості послуг від невірності вимірювань.

Впровадження сучасних систем управління метрологічними ризиками сприятиме підвищенню результативності систем вимірювань та зменшенню витрат при забезпеченні якості метрологічних послуг. Для ефективного застосування системи управління метрологічними ризиками необхідно створити перелік показників метрологічних ризиків, а також відповідне нормативне забезпечення їх обґрунтованого застосування в системах управління якості.

Ключові слова: управління ризиками, класифікація ризиків, джерело ризику, оцінювання ризиків, метрологічний ризик, контроль якості, процеси вимірювання.

The article is devoted to research on determining the risks of activities in the metrological field and the factors that cause them. The approaches to classification of innovative risks of calibration laboratories are substantiated in the work, the general scheme of process of management of metrological risks is offered and mechanisms of their timely prevention or elimination that will increase efficiency of activity are resulted.

The risk management process covers various aspects of risk management, from identifying and analyzing risks to assessing their acceptability and identifying potential opportunities to reduce risk through the selection, implementation and control of appropriate management actions. Risk management activities should cover the following main areas (stages): identification (compilation of a list) of risk, assessment of probability of occurrence, choice of method and means (tools) of risk management, prevention, control, risk financing, evaluation of results. The issue of metrological risk management is especially relevant, as the main risks that determine the degree of controllability of measurement processes, the level of control over the accuracy of the results of these processes, and hence the cost of their provision. The main purpose of metrological risk assessment is to systematize possible discrepancies that may arise during measurements and create conditions for ranking metrological activities of testing and calibration laboratories according to the level of loss of service quality due to the reliability of measurements.

The introduction of modern metrological risk management systems will help increase the effectiveness of measurement systems and reduce costs while ensuring the quality of metrological services. For the effective application of the metrological risk management system it is necessary to create a list of metrological risk indicators, as well as the appropriate regulatory support for their reasonable use in quality management systems.

Key words: risk management, risk classification, risk source, risk assessment, metrological risk, quality control, measurement processes

Вступ

В умовах зростання вимог споживача до якості метрологічних послуг основним напрямом розвитку і засобом підвищення іміджу калібрувальних лабораторій є розширення сфери метрологічних послуг та модернізація вимірювального процесу. Особливо це актуально сьогодні, коли на ринку метрологічних послуг йде жорстока конкуренція за клієнта. У відділі науково-технічної роботи та стандартизації ДП “КІЇВОБЛСТАНДАРТ-МЕТРОЛОГІЯ” протягом останніх років проводиться низка досліджень, пов’язаних з вирішенням питань інноваційної діяльності у сфері метрологічних робіт та послуг калібрувальної лабораторії, зокрема визначення та запобігання ризикам, включаючи метрологічні ризики. Дослідження показали, що вимірювальні та калібрувальні лабораторії стикаються з низкою ризиків, які можуть впливати на досягнення цілей в сфері якості та точності вимірювань.

Процес управління ризиками охоплює різні аспекти роботи з ризиком, від ідентифікації і аналізу ризиків до оцінки їх прийнятності і визначення потенційних можливостей зниження ризику за допомогою вибору, реалізації і контролю відповідних управлінських дій. Особливо актуальним є питання управління метрологічними ризиками, як основними ризиками, які визначають ступінь керованості процесами вимірювань, рівень контролю точності результатів даних процесів, а отже, і затрати на їх забезпечення.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз та узагальнення принципів і підходів щодо визначення, оцінювання та управління ризиками з метою подальшого застосування та запровадження отриманих результатів в рамках діяльності випробувальних та калібрувальних лабораторій, як державної, так і приватної форми власності

Аналіз досліджень і публікацій

Сутність теорії ризиків, її історичний аспект розглядається в працях таких вчених, як: А.П. Альгин [1], О.В. Васюренко [2], В.В. Вітлінський [3, 4, 5], А.С. Іванілов [6], Л.Н. Івін [6], Г.Г. Кірейцев [7], М.С. Клапків [8], С.І. Наконечний [5], Т.Н. Первозванська [9],

А.А. Первозванський [9], Ю. Сенейка [10], О.В. Таран [2], І. Хміля [11], П.І. Юхименко [12] та ін. Праці цих вчених присвячені дослідженням у сфері економіки, підприємництва, фінансів, менеджменту. В обліковій літературі теорія ризику не досліджувалася, хоча в практичній діяльності вже протягом кількох століть використовувалися резерви як інструменти покриття імовірного ризику, який зумовлює для підприємства фінансові витрати.

Сьогодні поняття “ризик” не має чіткого визначення. Широко використовується набір спеціалізованих термінів, з яких найуживаніші “небезпека” (hazard) і “ризик” (risk). Спроби різних авторів розглядати ці терміни як синоніми або надати їм певного змісту, на жаль, взаємно неузгоджені. Тому дуже важливо дати точне, чітке визначення цих базових понять, яке б відображало взаємозв’язки і суперечності між суспільством, навколишнім середовищем і найновішими технологіями. У більшості визначень небезпека розглядається як об’єктивна реальність як у відносинах між суспільством і технікою, так і у відносинах з навколишнім середовищем - середовищем проживання людини. Згідно з визначенням “Комітету із сприйняття ризику і інформування про нього” Національної дослідницької ради США небезпекою є: “...дія або явище, що спричиняє потенціальну шкоду людям чи предметам”. За визначенням В. Маршалла [13], небезпека — природне або техногенне явище, в результаті якого можливе виникнення явищ або процесів, здатних вражати людей, завдавати матеріальних збитків, руйнувати довкілля. Отже, небезпека — доволі широке комплексне

поняття, що охоплює погляди різних наукових дисциплін. А.Б. Качинський, А.М. Сердюк [14] підкреслюють, що небезпека — поняття якісне. Кількісною мірою небезпеки є ризик. Ризик — це імовірні збитки, які можуть бути встановлені перемноженням вірогідності (частоти) негативних подій на величину можливого збитку від неї [15]. З урахуванням цих двох елементів пропонуються такі визначення. Небезпека - це природне та техногенне явище із прогнозованою або неконтрольованою загрозою виникнення небажаних подій у певний момент часу і в межах певної території, здатне завдати збитків здоров'ю людей, матеріальні збитки, руйнувати довкілля. Небезпека визначається якісно. Ризик - це усвідомлена небезпека виникнення подій з визначеними у просторі та часі небажаними наслідками. Ризик — величина кількісна і визначається помноженням імовірності негативної події на величину можливого збитку від неї [14].

Особливо актуальними, для інноваційної діяльності калібрувальних лабораторій, є питання управління метрологічними ризиками, як основними ризиками метрологічної діяльності калібрувальних та випробувальних лабораторій [16].

Виклад основного матеріалу

На даний час однією з найважливіших умов стосовно забезпечення сталого розвитку будь-якого підприємства, що здійснює метрологічну діяльність, орієнтованого на отримання стабільних прибутків і ефективну роботу, є розробка програми управління ризиками підприємства. В її цілі і завдання входять *ідентифікація, аналіз, визначення кількості і оцінка всіх ризиків підприємства, розробка конкретних рекомендацій по боротьбі з виявленими ризиками.*

Невизначеність, пов'язана з можливістю виникнення в ході реалізації проекту несприятливих умов, ситуацій та наслідків, називається *ризиком.*

Ризик являє собою складну економічно-управлінську категорію, при визначенні якої має місце ряд протиріч. *Управління ризиком* - це процес реагування на події та зміни ризиків у процесі виконання проекту. При цьому важливим є проведення моніторингу ризиків. Моніторинг ризиків включає контроль ризиків протягом всього життєвого циклу проекту.

Якісний моніторинг ризиків забезпечує управління інформацією, яка допомагає приймати ефективні рішення до настання ризикових подій.

Оскільки, метрологічний ризик визначається ймовірністю втрат від невірогідності вимірювальної інформації процесів вимірювань [16], то важливим моментом є розроблення інструментів виявлення невідповідностей метрологічної діяльності, що зумовлюють втрати якості вимірювань та втрати ефективності вимірювань.

Діяльність з управління ризиками повинна охоплювати такі основні напрямки (етапи): ідентифікацію (складання переліку) ризику, оцінку ймовірності виникнення, вибір методу та засобів (інструментів) управління ризиком, запобігання, контролювання, фінансування ризику, оцінку результатів.

Перші два етапи прийнято називати оцінкою ризику. При цьому ідентифікація ризику належить до якісного аналізу, а оцінка ризику - до кількісного.

Для ефективного управління ризиками виникає необхідність їх класифікації за важливими ознаками. Причому вибір цих ознак повинен визначатися необхідністю відображення більшості його характерних рис та важливості впливу на результат процесу якого він стосується. Важливість правильної ідентифікації та оцінювання ризику зумовлюється потребою в об'єктивній, достовірній та актуальній інформації про стан процесу. Тому для подальшої роботи, з'являється необхідність в подальшому аналізі та проведенні класифікації ризиків, які можуть виникати під час діяльності калібрувальних та випробувальних лабораторій.

У *таблицях 1 та 2* наведено узагальнену та згруповану класифікацію ризиків в метрологічній сфері за їх класифікаційними ознаками, критеріями та категоріями.

Таблиця 1 - Класифікація ризиків пов'язаних з інноваційною діяльністю в метрологічній сфері

№ п/п	Класифікаційна ознака	Групи ризиків	Категорії ризиків
1	2	3	4
1	За джерелами виникнення	Політичні ризики	- ризики зміни державного устрою, часта зміна уряду - ризики нестабільності політичної влади - ризики неадекватності прийняття політичних рішень [17]
		Господарські ризики	- ризики зміни податкового законодавства - ризики ринкової діяльності (відсутність споживачів товарів та послуг) - ризики зміни цін постачальників - ризики затримки платежів за виконану роботу [17] - ризики неадекватного менеджменту та управління
		Форс-мажорні обставини	- ризики стихійних лих (землетрусу, повені, бурі, урагану та ін.) - ризики виникнення військових конфліктів - ризики втрати майна при пожежі [17]
2	За причинами виникнення	Зовнішні	1. Непередбачувані зовнішні ризики: - заходи державного впливу у сфері оподаткування, ціноутворення, землекористування, фінансово-кредитній сфері, охорони навколишнього середовища, вплив органів експертизи та ін.; - природні катастрофи (землетруси, повінь та інші природні катаклізми); - кримінальні та економічні злочини (тероризм, саботаж, рекет та ін.); - зовнішні ефекти: політичні (заборона на діяльність та ін.), економічні (зрив постачання, банкрутство партнерів, клієнтів), екологічні (аварії), соціальні (страйки) і т. п. [17] 2. Передбачувані зовнішні ризики: - ринковий ризик (зміна цін, валютних курсів, вимог споживачів, кон'юнктури, конкуренція, інфляція та ін.); - операційний ризик (відмова від цілей проекту, порушення правил експлуатації та техніки безпеки, неможливість підтримки робочого стану обладнання, споруд і т. п.). [17]
		Внутрішні	1. Внутрішні організаційні ризики, а саме: - зриви робіт через нестачі робочої сили, матеріалів, затримки постачань, помилок у плануванні та проектуванні, незадовільного оперативного управління, зміна раніше узгоджених вимог та поява додаткових вимог з боку замовників та партнерів та ін.; - перевитрати, що виникли внаслідок: зриву планів робіт проекту, низької кваліфікації розробників проекту, помилок у складанні кошторисів та бюджетів, неефективної стратегії постачання та збуту, виявлення претензій з боку партнерів, постачальників та споживачів. [17] 2. Внутрішні технічні ризики: - зміна технології виконання робіт, помилкові технологічні рішення, помилки в проектній документації, невідповідність проектним стандартам, поломки техніки тощо. [17]
		Інші	транспортні ризики; ризик, пов'язаний зі здоров'ям людей; ризик пошкодження майна; правові ризики. [17]

Таблиця 2 - Загальна класифікація ризиків за критеріями та категоріями

№ п/п	Критерії ризиків	Категорії ризиків
1	2	3
1	- за походженням (джерелом виникнення) ризиків	антропогенні – пов'язані з діяльністю працівників або персоналу; природні – пов'язані з вразливістю господарського об'єкту до впливів природного характеру; соціогенні – соціальні (злочинність, несприятливі соціальні прояви), економічні (конкурентна боротьба); техногенні – пов'язані з функціонуванням технічних систем всередині господарського об'єкту; комбіновані – природно-антропогенні, соціогенно-техногенні, тощо; внутрішні – пов'язані з господарською діяльністю самого суб'єкта; зовнішні – визначаються зовнішніми обставинами щодо господарського об'єкта. [18, 19]
2	- за об'єктами ураження можна виділити ризики	людські – ураження працівників або персоналу; технічні – наприклад, несправність устаткування чи виробничого обладнання; економічні – збитки економічного чи фінансового характеру; моральні – наприклад, реноме установи. [18, 19]
3	- за характером наслідків ризику	прямий ризик – результат веде до втрат, наприклад - пожежа; альтернативний ризик – коли результати можуть бути пов'язані як з негативними, так і з позитивними наслідками, наприклад перехід від випуску товарів, на які є невеликий, але сталий попит, до нової продукції. [18, 19]
4	- за умовою прийнятності можна виділити ризики	неприйнятні – ризики неприйнятні в будь-якому випадку за будь-яких умов; прийнятні за певних умов – ризики, для яких визначені умови прийнятності; прийнятні без обмежень – наприклад, ризики, виникнення яких обумовлене реалізацією господарської діяльності. [18, 19]
5	- за можливістю уникнення (свободи вибору) ризику можна розділити на	добровільні – коли суб'єкт господарювання свідомо ризикує; вимушені – коли суб'єкт в своїй господарській діяльності не може уникнути ризику. [18, 19]
6	- за ступенем визначення і прогнозування ризику їх можна розділити на	передбачувані – які можна передбачити; прогнозовані – які можна передбачити, але, як правило, неможливо передбачити момент їх виникнення; непередбачувані (не прогнозовані) ризики – про які, як правило, інформація відсутня. [18, 19]
7	- за здатністю до оцінювання (можливості отримання кількісної або якісної оцінки)	оцінювані кількісно – оцінка виражена у вигляді числа; оцінювані якісно – оцінка у вигляді вербального судження; безоціночні – без можливості чи потреби оцінювання (лише констатація факту). [18, 19]
8	- за регулярністю (притаманністю або типовістю) виникнення	регулярний ризик - тобто ризик, притаманний даному об'єкту (системі) та/або ситуації, а також ризик, в основі якого природні або виробничо-господарські закономірності; спонтанний (сезонний) ризик – тобто нерегулярний ризик, який є наслідком рідкісних подій і форс-мажорних обставин з низькою вірогідністю. [18, 19]

<p>9</p>	<p>- за тривалістю або часовою залежністю</p>	<p>1) за критерієм тривалості дії можна виділити такі ризики: безстрокові – коли ризики є перманентними; довгострокові – коли ризик є протягом певного відрізка часу; короткострокові – коли ризик є лише в певний момент. 2) за зміною ризику з часом – можна виділити: статичні ризики – ризики, що мають сталі характеристики; динамічні ризики – ризики, характеристики яких змінюються в часі. 3) за можливістю вчасно виявити та ліквідувати втрати (негативні наслідки): скриті – такі, що не піддаються виявленню; приховані – такі, що важко піддаються виявленню; явні – ризики, що виявляються вчасно. [18, 19]</p>
<p>10</p>	<p>- за характером взаємодії з іншими ризиками чи об'єктами ризику</p>	<p>1) критерієм тут може бути ступінь поширення ризику, а саме: масові ризики – властиві значній кількості однотипних об'єктів; наприклад, аварії на транспорті; унікальні ризики – зустрічаються в окремих об'єктах. 2) за критерієм зв'язків між ризиками: пов'язані і взаємно посилюються; пов'язані і взаємно послаблюються; непов'язані – зв'язок між ризиками відсутній. 3) за критерієм індукування послідовності ризиків (аварія водогону - первинний ризик може спричинити замикання електричної мережі – вторинний ризик): первинні ризики – безпосередньо пов'язані з несприятливим початковими умовами; вторинні ризики – зумовлені наслідками первинних ризиків; похідні (опосередковані) ризики – зумовлені наслідками попередніх ризиків. [18, 19]</p>
<p>11</p>	<p>- за масштабами ризику чи ураження (розмір ризику описується переважно двома характеристиками - частотою виникнення і обсягом втрат, небезпеки або наслідків)</p>	<p>національні (глобальні) – становлять небезпеку для суспільства. 1) за критерієм частоти виникнення втрат: рідкісні ризики – вірогідність ризику низька; ризики помірної частоти – середня вірогідність ризику; часті ризики – висока вірогідність ризику. 2) за критерієм обсягу втрат: малі ризики – дрібні втрати; середні ризики – невеликі втрати; високі ризики – значні втрати; катастрофічні ризики – величезні втрати. 3) за критерієм охоплення можна розрізняти ризики: місцеві – становлять небезпеку для самого об'єкту-джерела ризику; локальні – становлять небезпеку для установи чи господарського об'єкту. 4) за критерієм ступеня істотності наслідків ризику можна поділити на: незначні – наслідки неістотні; істотні – наслідки відчутно вплинуть на суб'єкт господарювання; значні – наслідки матимуть значний вплив на суб'єкт господарювання. [18, 19]</p>

На підставі аналізу та узагальнення джерел [3, 4, 7] на *Рисунку 1* представлено загальну схему процесу управління метрологічними ризиками.

В межах теорії та практики управління метрологічними ризиками найважливішими є, зокрема, методи оцінки, моніторингу та прогнозування ризиків, інформаційного забезпечення управління ризиками

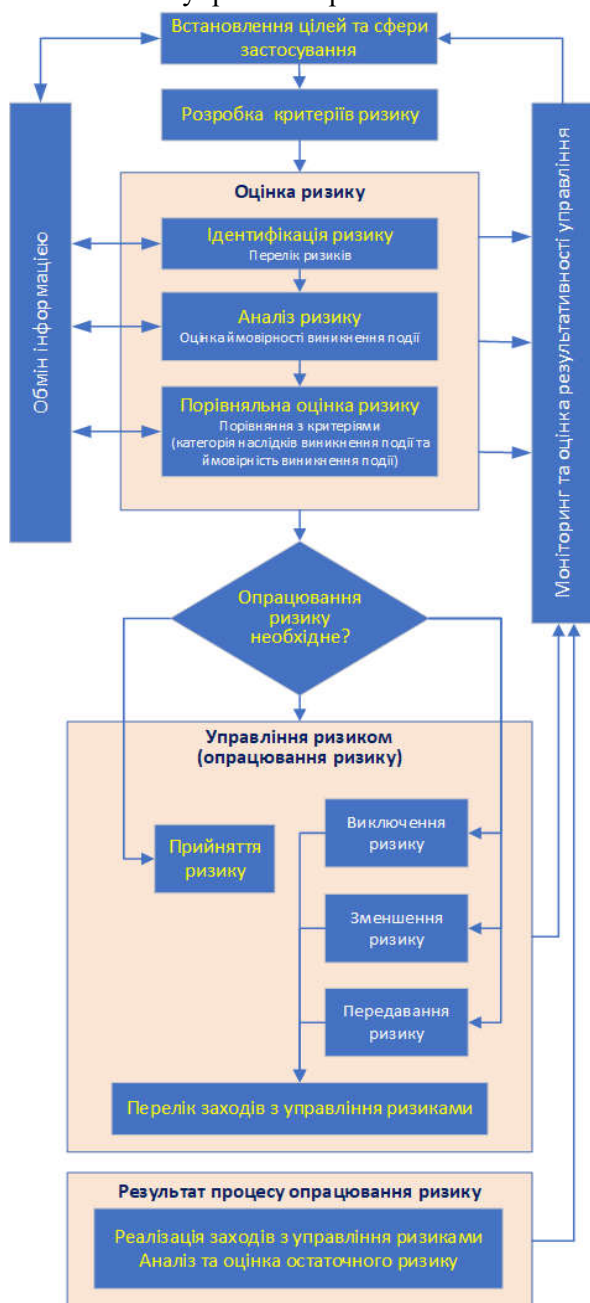


Рисунок 1 - Загальна схема процесу управління метрологічними ризиками

В теорії управління ризиками серед кількісних методів аналізу ризику найвідоміші метод *статистичного аналізу*, *аналіз доцільності витрат* і *метод експертних оцінок*. Важливим є вибір методу й інструментів управління ризиком. Слід зауважити, що поняття «метод» ширше, ніж «інструмент». У межах вибраного методу можна використовувати конкретні інструменти.

Відомі п'ять основних методи управління ризиками:

- скасування;
- запобігання;
- контролювання;
- страхування;
- поглинання ризиків.

Скасування ризику означає відмову від певної діяльності чи такої істотної (радикальної) її трансформацію, у результаті якої ризик зникає.

Запобігання та контролювання ризику - це ефективна організація проектної діяльності, тобто коли її учасники мають змогу ефективно впливати на чинники ризику і зменшувати можливість настання несприятливої події.

Контролювання ризику полягає в реалізації комплексу заходів, спрямованих на мінімізацію збитків після настання несприятливої події.

Страхування ризику передбачає зменшення збитків від діяльності за рахунок фінансової компенсації зі спеціальних страхових фондів.

Поглинання ризику - це такий спосіб діяльності, коли при матеріалізації ризику збитки повністю несе його учасник (учасники). Цей метод управління ризиками застосовують тоді, коли можливість ризику невелика чи збитки в разі його настання неістотно впливають на учасників проектної діяльності.

Використання конкретного методу управління ризиками метрологічної діяльності, в значній мірі, визначається ступенем охоплення систем вимірювання калібрувальних та випробувальних лабораторій системою показників, які можуть використовуватися для оцінювання рівня метрологічного ризику. Також важливим фактором є фінансова здатність організації забезпечувати процеси отримання достовірної інформації про реальний стан існуючої системи вимірювань.

Загальний процес аналізу і оцінювання метрологічних ризиків необхідно здійснювати за допомогою системи кількісних і якісних показників, які, у свою чергу, повинні відбиратися за наслідками їх аналізу стосовно впливу на контрольований процес та його результати. Виявлення показників метрологічного ризику має сенс тільки за наявності для кожного з них шкали оцінювання, за якою можна зробити відповідну оцінку.

Згідно сучасного підходу аналіз ризиків - систематичне використання інформації для визначення джерел ризиків і кількісних їх оцінок [16]. На даний час не існує загально прийнятої методики оцінювання метрологічного ризику. Серед існуючих підходів немає єдиного який би всебічно охопив всі аспекти метрологічного ризику метрологічної діяльності організації. Існує декілька підходів до вирішення проблеми кількісного аналізу ризику, в яких застосовуються статистичні методи, ймовірнісні методи, експертні методи та методи з використанням індексних оцінок.

Порівняльний аналіз методів оцінювання ризиків дозволяє зробити висновок, що статистичні та ймовірнісні методи не забезпечують умов оперативності, оскільки потребують значних об'ємів об'єктивної інформації. Експертні методи містять значну суб'єктивну складову. Враховуючи потребу в оперативності та інтегрованості оцінок ризиків в систему управління якістю, оцінювання метрологічного ризику калібрувальних та випробувальних лабораторій доцільно здійснювати індексними методами.

Висновки

Проведено оцінювання метрологічного ризику шляхом систематизації можливих невідповідностей, що можуть виникнути під час виконання вимірювань та створення умов для ранжування процесів метрологічної діяльності випробувальних та калібрувальних лабораторій за рівнем втрат якості послуг від невірогідності вимірювань.

Впровадження сучасних систем управління метрологічними ризиками сприятиме підвищенню результативності систем вимірювань та зменшенню витрат при забезпечення якості метрологічних послуг. Для ефективного застосування системи управління метрологічними ризиками розроблений перелік

показників метрологічних ризиків, а також відповідне нормативне забезпечення їх обґрунтованого застосування в системах управління якістю.

Впровадження системи менеджменту метрологічних ризиків створює нові умови ранжування метрологічної діяльності за рівнем метрологічного ризику з наступним присвоєння йому відповідної категорії. Впровадження системи ранжування за рівнем метрологічного ризику дозволить систематизувати коригувальні дії та сприятиме вдосконаленню системи мінімізації втрат якості метрологічної діяльності внаслідок невірогідності вимірювань. В сукупності це дозволить підвищити оперативність коригувальних дій та довіру споживачів до результатів метрологічної діяльності калібрувальних та випробувальних лабораторій та підвищити ефективність інноваційної діяльності в метрологічній сфері.

Список використаних джерел

1. Альгин А.П. Риск и его роль в общественной жизни. – М.: Мысль, 1989. – 187 с.
2. Васюренко О.В., Таран О.В. Ризик як складова економічних процесів // *Фінанси України* – 2005. – № 7. – С. 68-74.
3. Вітлінський В.В. Концептуальні засади ризикологія у фінансовій діяльності // *Фінанси України*. – 2003. – №3. – С. 3-9.
4. Вітлінський В.В. Ризик як комплексне поняття // *Фінанси України*. – 2003. – №5. – С. 122-127.
5. Вітлінський В.В., Наконечний С.І. Ризик у менеджменті. – К.: ТОВ “Борисфен-М”, 1996. – 336 с.
6. Ивин Л.Н., Иванилов А.С. Введение в финансовый менеджмент. – К.: ИСИО, 1994. – 133 с.
7. *Фінансовий менеджмент: Навчальний посібник: Курс лекцій / За ред. проф. Г.Г. Кірейцева*. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 432 с.
8. Клапків М.С. Питання етимології економічного ризику // *Фінанси України*. – 2001. – № 4. – С. 14-20.
9. Первозванский А.А., Первозванская Т.Н. *Финансовый рынок: расчет и риск*. – М.: Инфра-М, 1994 – 245 с.

10. Сенейко Ю. Сучасні підходи до трактування категорії “ризик” // Регіональна економіка. – 2006. – № 1. – С. 206-211.

11. Хміль Ф.І. Основи менеджменту: Підручник. – К.: Академвидав, 2005. – 608 с.

12. Юхименко П.І., Леоненко П.М. Історія економічних учень. – К.: видавництво А.С.К., 2002. – 218 с.

13. Маршалл В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. – М.: Мир, 1989. – 672 с.

14. Качинський А. Б. Методологічні основи ризику в медико-екологічних дослідженнях та його значення для екологічної безпеки України / А. Б. Качинський, А. М. Сердюк // Лікарська справа. - 1995. - № 3-4. - С. 5-15.

15. Rowe W.D. Анатомія ризику. - N.-J.: John Wiley, 1977. - 488 с.

16. Микийчук М.М. Метрологічне забезпечення якості продукції на етапі виготовлення / М.М. Микийчук. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2014. – 265с.

17. М 591 Микитюк П. П. Управління проектами: Навч. пос. [для студ. вищ. навч. закл.] / П. П. Микитюк – Тернопіль, 2014. – 270с. 18. Бойко Т. Ризики, що супроводжують господарську діяльність, – сутність, класифікація і підходи до оцінювання / Т. Бойко, Т. Рябкова // Вимірювальна техніка та метрологія. - 2014. - Вип. 75. - С. 125-131. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2014_75_27. (25.05.2022)

19. Быков А.А., Порфильев Б.Н. Об анализе риска, концепциях и классификации рисков // Проблемы анализа риска. 2006. — № 4. — С. 319-336.

References

1. Algin A.P. Risk i ego rol v obshchestvennoy zhizni. – M.: Myisl, 1989. – 187 s.

2. Vasiurenko O.V., Taran O.V. Ryzhik yak skladova ekonomichnykh protsesiv // Finansy Ukrainy – 2005. – № 7. – S. 68-74.

3. Vitlinskyi V.V. Kontseptualni zasady ryzhikolohiia u finansovii diialnosti // Finansy Ukrainy. – 2003. – №3. – S. 3-9.

4. Vitlinskyi V.V. Ryzhik yak kompleksne poniattia // Finansy Ukrainy. – 2003. – №5. – S. 122-127.

5. Vitlinskyi V.V., Nakonechnyi S.I. Ryzhik u menedzhmenti. – K.: TOV “Borysfen-M”, 1996. – 336 s.

6. Ivin L.N., Ivanilov A.S. Vvedenie v finansovyy menedzhment. – K.: ISIO, 1994. – 133 с.

7. Finansovyi menedzhment: Navchalnyi posibnyk: Kurs lektsii / Za red. prof. H.H. Kireitseva. – Zhytomyr: ZhITI, 2001. – 432 s.

8. Klapkiv M.S. Pytannia etymolohii ekonomichnoho ryzhiku // Finansy Ukrainy. – 2001. – № 4. – S. 14-20.

9. Pervozvanskiy A.A., Pervozvanskaya T.N. Finansovyy ryinok: raschet i risk. – M.: Infra-M, 1994 – 245 с.

10. Seneiko Yu. Suchasni pidkhody do traktuvannia katehorii “ryzhik” // Rehionalna ekonomika. – 2006. – № 1. – S. 206-211.

11. Khmil F.I. Osnovy menedzhmentu: Pidruchnyk. – K.: Akademvydav, 2005. – 608 s.

12. Yukhymenko P.I., Leonenko P.M. Istoriia ekonomichnykh uchen. – K.: vydavnytstvo A.S.K., 2002. – 218 s.

13. Marshall V. Osnovnyie opasnosti himicheskikh proizvodstv / V. Marshall. – M.: Mir, 1989. – 672 s.

14. Kachynskyi A. B. Metodolohichni osnovy ryzhiku v medyko-ekolohichnykh doslidzhenniakh ta yoho znachennia dlia ekolohichnoi bezpeky Ukrainy / A. B. Kachynskyi, A. M. Serdiuk // Likarska sprava. - 1995. - № 3-4. - S. 5-15.

15. Rowe W.D. An anatomy of risk. - N.-J.: John Wiley, 1977. - 488 p.

16. Mykyichuk M.M. Metrological provision of product quality at the manufacturing stage // Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. - 265p.

17. Mykytiuk P. P. Upravlinnia proektamy: Navch. pos. [dlia stud. vshch, navch. zakl.] / P. P. Mykytiuk – Ternopil, 2014. – 270s.

18. Boiko T. Ryzhiky, shcho suprovodzhuiut hospodarsku diialnist, – sutnist, klasyfikatsiia i pidkhody do otsiniuvannia / T. Boiko, T. Riabkova // Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. - 2014. - Vyp. 75. - S. 125-131. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metrolog_2014_75_27. (25.052022)

19. Byikov A.A., Porfilev B.N. Ob analize riska, kontseptsiyah i klassifikatsii riskov // Problemyi analiza riska. 2006. — № 4. — S. 319-336

УДК 532.538;621.38

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-59-65

ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФАЛЬСИФІКОВАНОЇ ГОРІЛКИ ЗА РЕАКТИВНОЮ КОМПОНЕНТОЮ АДМІТАНСУ

Є. В. Походило, Ю. А. Стасишин

*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, вул. С. Бандери, 12, 79013,
Емейл: yevhen.v.pokhodylo@lpnu.ua, yurii.a.stasyshyn@lpnu.ua*

Проаналізовано способи контролю параметрів спиртових розчинів, зокрема способи ідентифікації фальсифікованої горілки за зміною реактивної компоненти в частотному діапазоні тестового синусоїдного сигналу. Акцентовано увагу на двох видах фальсифікації. Перший вид стосується фальсифікації через заміну горілки водно-спиртовим розчином. Другий – підміною горілки однієї марки іншою. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень запропоновано два способи ідентифікації такої фальсифікації.

Для першого виду фальсифікації продукції перевірка відбувається шляхом вимірювання реактивної компоненти адмітансу контрольованого об'єкта на двох фіксованих частотах; для другого підмінена марка горілки визначається вимірюванням частоти, на якій реактивна компонента адмітансу приймає екстремальне значення. Для обох способів ідентифікації запропоновані та подані у рисунках структури засобів з допомогою яких може відбуватися практична реалізація цих способів. У засобах ідентифікації використано перетворювач адмітансу контрольованого об'єкта на комплексну напругу, інформативним параметром якої є її реактивна компонента.

Для реалізації ідентифікації фальсифікованої горілки заміною марки структурна схема засобу містить генератор заданого частотного діапазону. У цьому діапазоні фіксують частоту, на якій реактивна компонента має екстремальне значення. За отриманою частотою визначається та чи інша марки горілки. Структурна схема засобу реалізації способу фальсифікації горілки водно-спиртовим розчином містить генератор двох частот. На цих частотах вимірюються реактивні компоненти, опрацьовуються, після чого фіксується результат ідентифікації.

Наведені рисунки, які демонструють запропоновані способи виявлення фальсифікованої продукції, а також схеми засобів вимірювання для проведення експериментів цими способами.

Подані висновки про виконану роботу: проаналізовані способи виявлення фальсифікацій горілкової продукції; запропоновані схеми засобів для практичного використання в перевірках, які складаються з простих широко поширених електричних складових, попри що вони дають точні результати вимірювань у виявленні фальсифікованих продуктів.

Ключові слова: горілка; адмітанс; реактивна компонента; частота; генератор; ідентифікація; векторний перетворювач.

Methods of control of parameters of alcohol solutions, in particular methods of identification of falsified vodka by change of reactive component in the frequency range of the test sinusoidal signal are analyzed. Emphasis is placed on two types of falsification. The first type concerns falsification by replacing vodka with an aqueous-alcoholic solution. The second - the replacement of vodka from one brand to another. Based on the analysis of the results of experimental studies, two ways to identify such falsification have been proposed.

For the first type of product falsification, the inspection is performed by measuring the reactive component of the controlled object's admittance at two fixed frequencies; for the second, the substituted brand of vodka is determined by measuring the frequency at which the reactive component of the admixture takes an extreme value. For both methods of identification, the structures of the means by which these methods can be practically implemented are proposed and presented in the figures. The means of identification used the admittance converter of the controlled object to a complex voltage, the informative parameter of which is its reactive component.

To implement the identification of counterfeit vodka by substituting the brand, the block diagram of the tool contains a generator of a given frequency range. In this range, the frequency at which the reactive component is of extreme value is recorded. The obtained frequency determines one or another brand of vodka. The block diagram of the means for implementing the method of falsification of vodka with water-alcohol solution contains a generator of two frequencies. Reactive components are measured at these frequencies, processed, and then the identification result is recorded.

The figures show the proposed methods for detecting counterfeit products, as well as schemes of measuring instruments for conducting experiments with these methods.

Conclusions on the work performed are presented: methods of detecting falsifications of vodka products are analyzed; proposed schemes of tools for practical use in inspections, which consist of simple common electrical components, although they give accurate measurement results in the detection of counterfeit products.

Key words: vodka; admittance; reactive component; frequency; generator; identification; vector converter.

Вступ

На сьогоднішній день необхідність контролювання якості будь-якої продукції загальновідома. Особливо актуальним є оцінювання рівня якості харчової продукції, зокрема міцних спиртних напоїв. Підроблення продукції під вироби популярних виробників, випущена продукція за межами виробничого контролю, підміна при перевезенні до споживача з місця виготовлення – це основні причини масової появи на ринку фальсифікованих горілчаних виробів. Заміна неякісними водно-спиртовими розчинами (спирт і дистильована вода) та невідповідність марки горілки (замість горілки однієї марки подається інша) є найбільш розповсюдженими типами фальсифікації. Саме тому оперативність контролю якості такої продукції, а саме ідентифікації фальсифікованої горілки, є актуальним.

Об'єкт дослідження – методи та засоби виявлення фальсифікованої горілчаної продукції.

Предмет дослідження – властивості реактивної компоненти адмітансу.

Мета роботи – створення способів виявлення факту фальсифікації горілки, а також спрощення вимірювальної процедури реалізації способів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: проаналізувати способи ідентифікації фальсифікованої продукції, дослідити поведінку реактивної компоненти адмітансу при певних умовах дослідження в частотному діапазоні, запропонувати структурні схеми засобів вимірювання для практичної реалізації мети.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – запропоновано способи ідентифікації фальсифікованої горілки за реактивною компонентою її адмітансу

Практична значущість результатів дослідження – запропоновані структурні схеми

можуть бути основою побудови портативних засобів ідентифікації горілчаних виробів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомий спосіб визначення марок горілчано-коньячних напоїв [1], за яким прикладають до проби досліджуваного напою змінний електричний струм та вимірюють залежність відношення реактивної та активної компонент електропровідності напої від частоти змінного струму і визначають частоти мінімуму та максимуму частотної залежності в цих екстремумах такого відношення. При цьому використовують змінний струм в області частот від 0,1 Гц до 200кГц, а також визначають відношення на частотах 2кГц та 200кГц, а потім через порівняння цих параметрів з еталонними значеннями визначають марку напою. Вимірювання великої кількості параметрів, що ускладнює технічний пристрій для відтворення і широкий діапазон частот, у яких здійснюється вимірювання, є недоліками цього способу. Також у способі не ставиться питання виявлення фальсифікованого продукту. Відомі інші способи, за якими ідентифікуються аналогічні об'єкти [2-5]. Для цього через об'єкт контролю пропускають струм різної частоти та вимірюють компоненти імпедансу [3] чи адмітансу [4]. Відомий спосіб [5], за яким для ідентифікації горілки запропоновано аналізувати форму кривої, якою подається реактивна компонента адмітансу в діапазоні частот. Базується такий спосіб на основі результатів експериментальних досліджень водно-спиртових розчинів та горілок різних марок [6].

Аналіз результатів дослідження

Аналіз результатів експериментальних досліджень [6] показав наступне. Якщо значення реактивної компоненти адмітансу на двох частотах в діапазоні (100-300) Гц прямо пропорційне частоті, то напій фальсифікований і є водно-спиртовим розчином (спирт і дистильована вода). В іншому разі знаходять в

діапазоні (3-30) кГц частоту, на якій реактивна складова адмітансу має екстремальне значення, і якщо ця частота не відповідає аналогічній частоті базового зразка горілки певної марки, що відповідає нормованим показникам якості, то напій фальсифікований через його невідповідність вказаній марці.

Реактивна компонента горілок відрізняється тим, що до неї входять лінійні частини (на початку діапазону та в кінці) та явно виражене екстремальне значення на певній частоті, яке є різним для кожної марка горілки. Такі ж екстремальні значення властиві і для спиртових розчинів, але їх частота є набагато нижча від

частоти для горілок. Нижче наводяться ілюстрації способів ідентифікації фальсифікованої горілки з урахуванням результатів експериментальних досліджень, а саме залежності реактивних компонент від частоти.

Ідентифікації фальсифікованої горілки заміною водно-спиртовим розчином

Ілюстрація способу виявлення фальсифікованої горілки водно-спиртовим розчином з різним вмістом води в ньому наведена на рис. 1 [7].

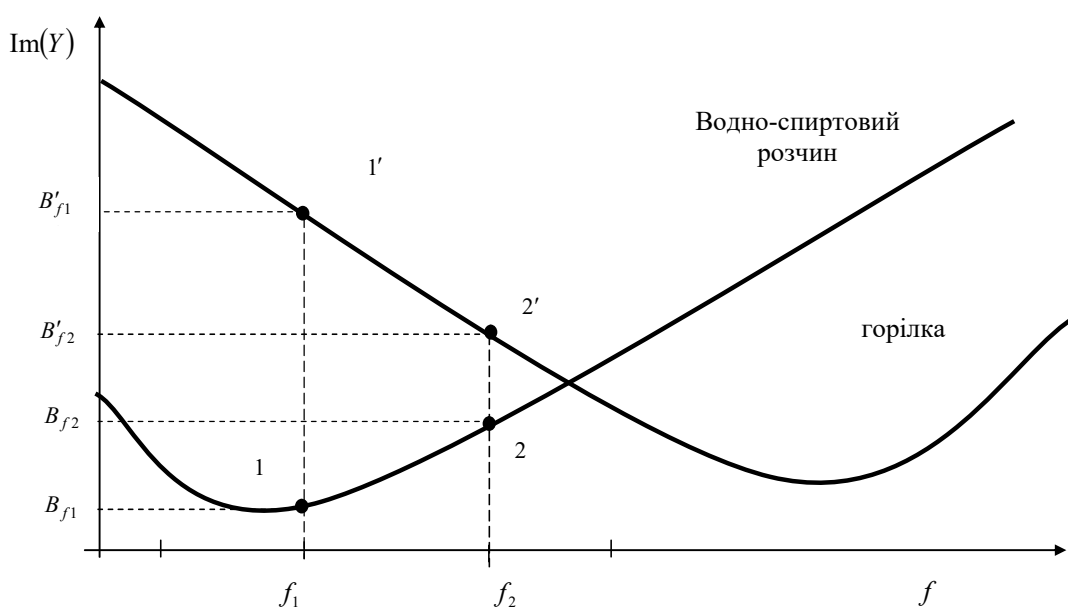


Рисунок 1 – Ілюстрація способу виявлення фальсифікованої горілки водно-спиртовим розчином.

Як видно з рис.1 криві суттєво відрізняються частотою, на якій реактивна компонента має екстремальне значення, а саме: для водно-спиртового розчину та горілки частоти знаходяться в різних частотних діапазонах. Відповідно до цього, в частотному діапазоні легко можна вибрати частоти, на яких значення однієї кривої спадає, а другої зростає. Саме це є основною ознакою виявлення підробленої горілки при заміні її розбавленим спиртом.

Для визначення такого водно-спиртового розчину (фальсифікована горілка) є достатнім вимірювання реактивної компоненти $Im(Y)$ адмітансу контрольованого об'єкта на двох частотах f_1 та f_2 , які є фіксованими (рис.1).

При цьому необхідно зазначити, що у разі використання первинного перетворювача з іншими геометричними розмірами, а також іншого конструктивного виконання фіксовані частоти можуть бути іншими. Тобто для формування електричного базового зразка необхідно отримати адмітансограми за реактивною компонентою для іншого первинного перетворювача [7].

Якщо отримане значення компоненти на частоті f_2 є більшим, ніж на f_1 ($B_{f1} < B_{f2}$), то горілка фальсифікована і є водно-спиртовим розчином (розбавлений водою спирт). Якщо навпаки - отримане значення компоненти на частоті f_2 є меншим, ніж на частоті f_1

($B'_{f_1} > B'_{f_2}$), то контрольований об'єкт є оригінальною горілкою.

На рис.2 наведено структурну схему засобу ідентифікації фальсифікованої горілки для реалізації такого способу.

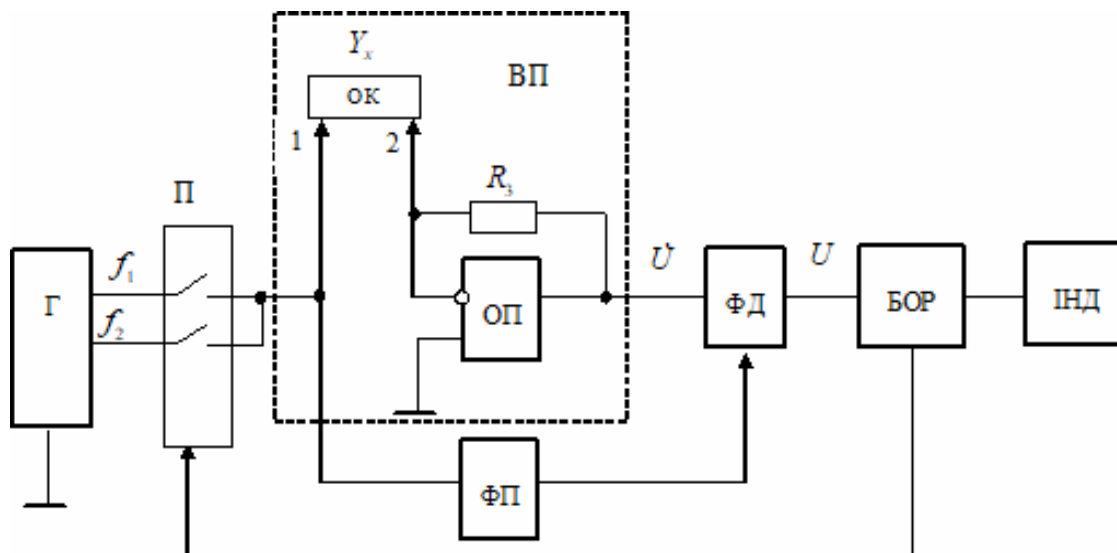


Рис. 2. Структурна схема засобу для виявлення фальсифікації горілки водно-спиртовим розчином

Схема вимірювального засобу (рис. 2), який реалізує запропонований спосіб, містить генератор Γ синусоїдального сигналу сталої амплітуди U_m та фіксованих частот f_1 та f_2 , перемикач Π , векторний перетворювач ВП на операційному підсилювачі ОП , елементами від'ємного зв'язку якого є адмітанс Y_x об'єкта контролю з електродами 1, 2 та опір R , а також фазовертач ФП керуючого сигналу фазочутливого детектора ФД , блок опрацювання результатів вимірювання БОР та індикатор ІНД .

Векторним перетворювачем ВП здійснюється перетворення адмітансу Y_x ємнісного характеру об'єкта контролю на комплексну напругу \dot{U}_x на двох частотах. Таке перетворення здійснюється спочатку на частоті f_1 , а потім на частоті f_2 . Керує перемикачем Π для зміни частоти БОР .

У такому разі на виході ВП для зазначених частот тестового сигналу та з урахуванням параметрів сенсора маємо комплексну напругу з активною G_x та реактивною B_x компонентами

$$\dot{U}_1 = U_m R_0 (G_{x1} + jB_{x1}) = U_m R_0 (G_{x1} + j\omega_1 C_{x1}) \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = U_m R_0 (G_{x2} + jB_2) = U_m R_0 (G_{x2} + j\omega_2 C_{x2}) \quad (2)$$

де активні G_{x1} , G_{x2} та $B_1 = \omega_1 C_{x1}$ та $B_2 = \omega_2 C_{x2}$ реактивні компоненти адмітансу контрольованого об'єктів на частотах $\omega_1 = 2\pi f_1$ та $\omega_2 = 2\pi f_2$.

З комплексних напруг (1), (2) фазочутливим детектором ФД , керованим зміщенням на кут $\frac{\pi}{2}$ сигналом генератора фазовертачем ФП виділяються відповідні реактивні компоненти у вигляді напруг постійного струму

$$U_1 = \text{Im}(\dot{U}_1) = U_m k_1 R B_1, \quad (3)$$

$$U_2 = \text{Im}(\dot{U}_2) = U_m k_2 R B_2, \quad (4)$$

де k_1 , k_2 - коефіцієнти перетворення фазочутливого детектора на зазначених частотах, відповідно.

Отримані значення напруг постійного струму, що відповідають відповідним

компонентам адмітансу об'єкта контролю на зазначених частотах подаються на БОР, опрацьовуються за зазначеним вище алгоритмом і видаються на індикаторний пристрій.

Ідентифікації фальсифікованої горілки підміною марки

Для виявлення фальсифікації горілки підміною марки необхідно визначити частоту, на якій реактивна компонента адмітансу приймає екстремальне значення. Ілюстрація способу виявлення фальсифікованої горілки підміною марки наведена на рис.3.

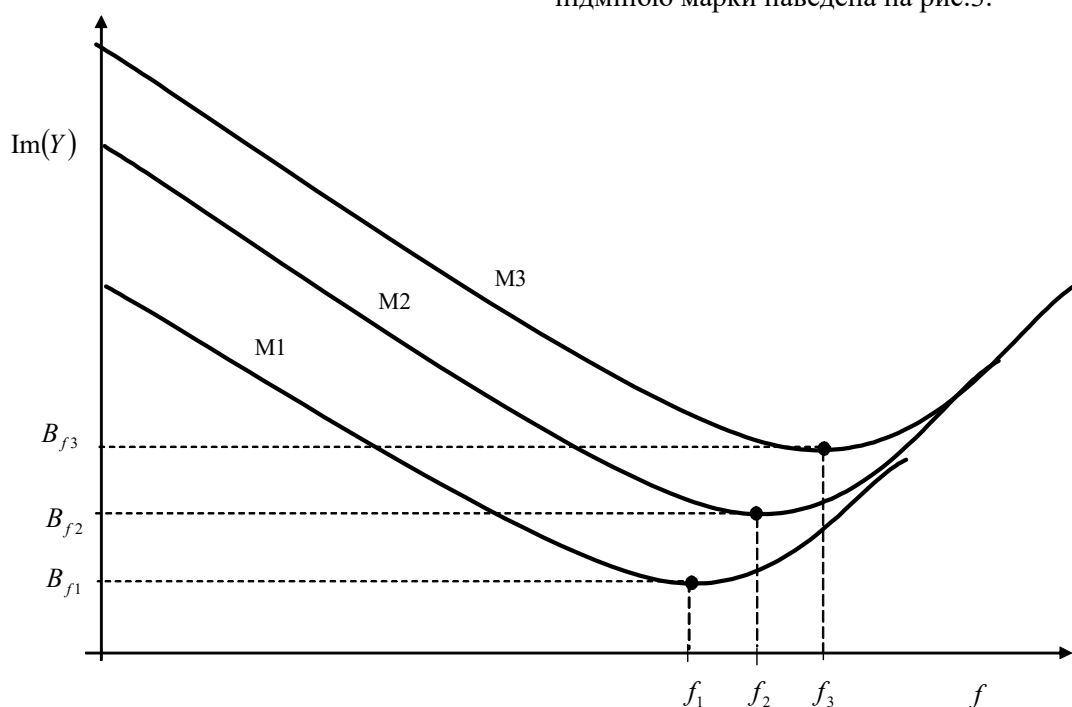


Рисунок 3 – Ілюстрація способу виявлення фальсифікованої горілки підміною марки

У даному разі ідентифікаційною ознакою є частота, на якій реактивна компонента приймає екстремальне значення, що відповідає відповідній марці горілки. На рис.3 показано, що горілці марки M1, M2, M3 відповідають частоти f_1, f_2, f_3 , на яких маємо відповідно значення компонент B_{f1}, B_{f2}, B_{f3} . Визначену частоту контрольованого об'єкта необхідно порівняти з відповідною частотою базового зразка (горілка певної марки, що відповідає нормованим показникам якості). Якщо ж співпадіння немає, то горілка не відповідає вказаній марці. Тобто, якщо в результаті вимірювання реактивної компоненти адмітансу горілки поданої за маркою M1 в частотному діапазоні отримано екстремальне значення, яке не відповідає частоті f_1 , а будь-

якій іншій частоті, то подана горілка не відповідає вказаній марці.

Структура засобу, який може реалізувати запропонований спосіб вимірювання зображена на рис.4.

Вимірювач містить джерело тестового сигналу ДТС фіксованого рівня U_T та частотою з діапазоном $\omega_1 \dots \omega_n$, векторний перетворювач ВП на операційному підсилювачі ОП, елементами від'ємного зв'язку якого є контрольований Y_x та зразковий R_0 елементи, фазочутливий детектор ФД, фазоповертач ФП, екстремум-детектор ЕД, пристрій керування ПК та індикатор ІНД.

Пристрій керування задає діапазон зміни частоти тестового сигналу ДТС та почергову зміну значення частоти в ньому.

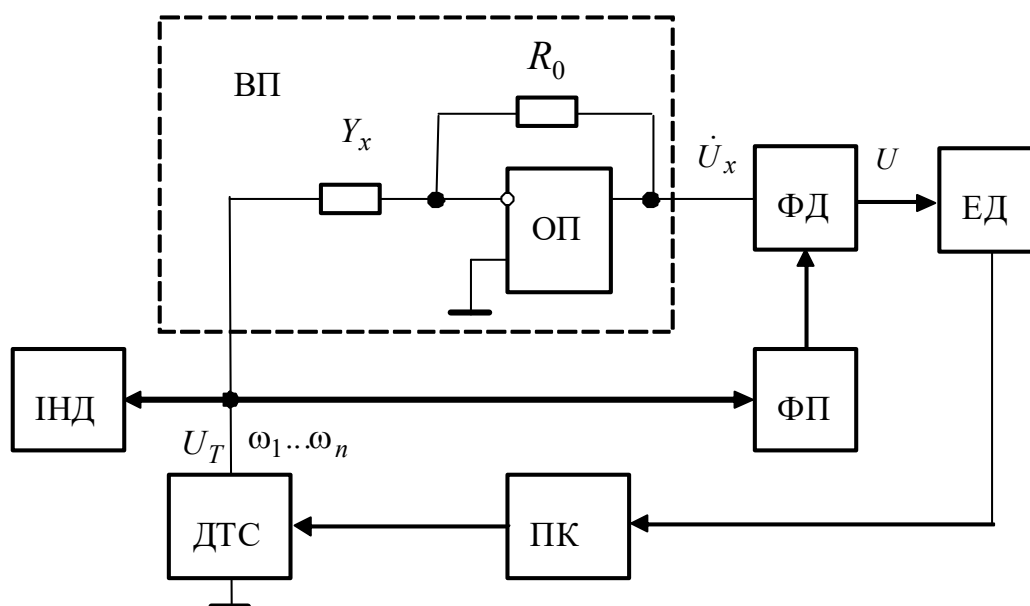


Рисунок 4 – Структурна схема пристрою для виявлення фальсифікації горілки підміною марки

Під дією тестового сигналу ДТС фіксованої частоти заданою ПК, векторним перетворювачем здійснюється перетворення адмітансу Y_x контрольованого об'єкта на комплексну напругу \dot{U}_x , а саме:

$$\dot{U}_x = U_T R_0 Y_x = U_T R_0 G_x + j U_T R_0 B_x, \quad (5)$$

де B_x та G_x - реактивна та активна складові адмітансу контрольованого об'єкта.

З допомогою фазочутливого детектора, на керуючий вхід якого подається сформована ФП напруга, виділяється з вихідної напруги \dot{U}_x (5) ВП складова напруги U , пропорційна реактивній компоненті адмітансу Y_x контрольованого об'єкта.

У такому разі на виході фазочутливого детектора отримуємо

$$U = \text{Im}(\dot{U}_x) = k U_T R_0 B_x, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт перетворення векторної величини в скалярну.

Як зазначено вище, реактивна компонента змінюється із зміною частоти, а тому і вихідна напруга ФД (6) буде також змінюватися відповідно. Екстремальне значення такої залежності фіксує ЕД, який через ПК зупиняє зміну частоти ДТС. Значення частоти, що відповідає екстремальному значенню фіксується

ИНД, а заодно за відповідною частотою екстремального значення визначається марка горілки.

Обговорення результатів дослідження

Переважно ознаками ідентифікації горілочаних виробів є діелектрична проникність, питома провідність, а також абсолютні значення реактивної та активної компонент [3,4], які, відповідно, від них залежать. Відомо, що на зміну таких параметрів впливають кліматичні та інші фактори. Отримані в роботі результати відрізняються від відомих у літературі [1-4] тим, що як ідентифікаційну ознаку контролю якості горілочаних виробів пропонується використати форму кривої. Крива описує залежність реактивної компоненти адмітансу контрольованого об'єкта в широкому частотному діапазоні. Крива має характерні ознаки в певному частотному діапазоні відповідно до виду фальсифікації об'єкта. В одному випадку - це екстремальні значення реактивних компонент на частотах різних частотних діапазонів (водно-спиртовий розчин та оригінальна горілка). В іншому – екстремальні значення реактивних компонент на різних частотах одного діапазону (різні марки оригінальної горілки). Використання форми кривої, як базового зразка, зменшує вплив різних факторів на результат ідентифікації.

ВИСНОВКИ

1) Проаналізовано способи виявлення фальсифікації спиртової продукції за електричними параметрами, зокрема за реактивною компонентою адмітансу.

2) Запропоновано структурні схеми засобів ідентифікації фальсифікованої горілки заміною водно-спиртовим розчином та підміною марки.

2) Запропоновані схеми засобів можуть бути реалізовані простими технічними засобами, доступними широкому колу споживачів і забезпечити оперативність виявлення фальсифікації горілчанних виробів.

Список використаних джерел

1. Патент України №19620 МПК G01 N 33/14, G01 N R27/00, опубл.15.12.2006, Бюл.№12.

2. Патент України №93243, М Спосіб експресного визначення вмісту етилового спирту в водно-спиртовому розчині, ПК G01N27/48, G01N27/02. опубл. 25.09.2014, Бюл. №18.

3. Кукла А.Л. Імпедансний аналізатор для ідентифікації марок водно-спиртових напій / Кукла А.Л., Павлюченко А.С., Майстренко А.С., Мамікін А.В. // Технологія і конструювання в електронній промисловості, Київ, 2012, №1, С.15-21.

4. Міхалева М. Дослідження спиртових розчинів імітансним методом / М. Міхалева // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2010. – №3. – С. 50-54.

5. Патент України №1336160, Спосіб виявлення фальсифікації горілки, МПК:G01N 33/14. Опубл.12.08.2019.

6. Походило Є.В., Юзва В.З., Вікович О.В. Ідентифікація спиртових розчинів за параметрами імітансу // Науковий вісник національного лісотехнічного університету України: збірник наук.-техн. праць / гол. ред. Ю.Ю. Туниця. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.7. – С. 263–266. – (Copernicus).

7. Походило Є.В., Куць В.Р., Сташишин Ю. А. Виявлення фальсифікації горілки методом імпедансної спектроскопії // Вимірювальна техніка та метрологія: міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 81, № 4. – С. 33–36.

References

1. Patent Ukrayiny №19620 MPK G01 N 33/14, G01 N R27/00, opubl.15.12.2006, Byul.№12.

2. Patent Ukrayiny №93243, M Sposib ekspresnoho vyznachennya vmistu etylovoho spyrtu v vodno-spyrtovomu rozchyni, PK G01N27/48, G01N27/02. opubl. 25.09.2014, Byul. №18.

3. Kukla A.L. 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.

4. Mikhalyeva M. Doslidzhennya spyrtovykh rozchyniv imitansnym metodom / M. Mikhalyeva // Standartyzatsiya, sertyfikatsiya, yakist'. – 2010. – №3. – S. 50-54.

5. Patent Ukrayiny №1336160, Sposib vyyavlennya fal'syifikatsiyi horilky, MPK:G01N 33/14. Opubl.12.08.2019.

6. Pokhodylo YE.V., Yuzva V.Z., Vikovykh O.V. Identyfikatsiya spyrtovykh rozchyniv za parametramy imitansu // Naukovyy visnyk natsional'noho lisotekhnichnoho universytetu Ukrayiny: zbirnyk nauk.-tekhn. prats' / hol. red. YU.YU. Tunytsya. – L'viv: RVV NLTU Ukrayiny. – 2016. – Vyp. 26.7. – S. 263–266. – (Copernicus).

7. Pokhodylo YE.V., Kuts' V.R., Stasyshyn YU. A. Vyyavlennya fal'syifikatsiyi horilky metodom impedansnoyi spektroskopiyi // Vymiryuval'na tekhnika ta metrolohiya: mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. – 2021. – Vyp. 81, № 4. – S. 33–36.

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 004.451.9

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-66-77

ВИБІР ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

**В.А. Ровінський¹, О.В. Євчук², Ю.В. Ровінський¹*

*¹Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника,
м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 54, <mailto:v.rovinsky@comp-sc.if.ua>*

*²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, itts@nung.edu.ua*

Проведено аналіз характеристик найбільш розповсюджених операційних систем реального часу, придатних для створення систем і пристроїв технічної діагностики. Для аналізу вибрані найбільш популярні серед них. Визначено, що визначення типу операційної системи повинне здійснюватися на основі таких параметрів систем технічної діагностики, як: 1) необхідна швидкодія обробки вхідних даних і пов'язана з нею обчислювальна потужність мікропроцесора системи діагностування; 2) мобільність і прямо пов'язана із споживаною електричною потужністю потреба в наявності чи відсутності автономного живлення пристрою, що входить до складу системи технічного діагностування; 3) ціна пристрою, від якої залежить вибір елементної бази для побудови обчислювачів реального часу дії – дешеві мікропроцесорні системи будуть мати невелику швидкодію, невеликий об'єм пам'яті, і тому при розробці системи технічної діагностики не буде можливим використати довільну операційну систему; 4) галузь застосування, яка накладає додаткові обмеження на надійність функціонування операційної системи (авіація, атомна енергетика, застосування військового спрямування) і вимагає наявності сертифікації безпеки, які визначаються спеціальними стандартами; 5) потреба використання типових давачів та вимірювальних перетворювачів визначає вибір операційної системи з будованою підтримкою таких давачів. Крім того, до важливих критеріїв вибору операційних систем реального часу належить частотна область вхідних інформаційних сигналів, які потребують обробки. Визначено, що у разі, якщо необхідно обробляти високочастотні сигнали, притаманні ультразвуковій та радіочастотній діагностиці, або радіолокації, слід вибирати операційні системи, які підтримують програмовані логічні матриці або цифрові сигнальні процесори. Наявність відкритого коду операційної системи зумовлює можливість його аналізу або модифікації під вузькоспеціалізовані потреби при розробці систем технічної діагностики.

Ключові слова: операційна система, операційна система реального часу, ОСРЧ, мікроконтролер, мікропроцесор, технічна діагностика.

There was an analysis of characteristics of the most wide-spread real-time operating systems, which are suitable for creating technical diagnostics systems and devices. The most popular among them were selected for the analysis. It was determined that the type definition of the operating system should be based on such parameters as: 1) the required input data processing speed and the associated computing power of the system diagnostic microprocessor; 2) mobility and the need for the presence or absence of autonomous power supply of the device that is part of the technical diagnostic system and is directly related to the consumed electric power; 3) the price of device, which determines the element base selection for building real-time computers - cheap microprocessor systems will have slow speed, a small amount of memory and therefore it's not possible to use any operating system during a technical diagnostic system developing; 4) scope, which imposes additional restrictions on the reliability of the operating system functionality (aviation, nuclear power, military use) and requires safety certification, determined by special standards; 5) the need to use typical sensors and measuring transducers determines the pick of an operating system with built-in support for such sensors. In addition, one of the important criteria for choosing real-time operating systems is the frequency range of input data signals that need to be processed. It was determined that if it is necessary to process high-frequency signals that inherent in ultrasound and radio frequency diagnostics or radar, chosen

operating systems should be supported by programmable logic arrays or digital signal processors. The open-source code of the operating system can be analyzed or modified for highly specialized needs in the development of technical diagnostic systems.

Key words: operating system, real-time operating system, RTOS, microcontroller, microprocessor, technical diagnostics.

Вступ. Операційні системи реального часу (ОСРЧ, англ: Real Time Operating System - RTOS) - це тип операційних систем, основне призначення яких - надання необхідного та достатнього набору функцій для проектування, розробки та функціонування систем, які мають здатність забезпечити необхідний рівень сервісу у певний проміжок часу на конкретному апаратному устаткуванні. Серед основних галузей застосування ОСРЧ – засоби технічного діагностування, літальні апарати та системи оборони, системи котирування цін, мережеві та мультимедійні системи, антиблокувальні гальмівні системи, системи управління повітряним рухом, програми для онлайн-комунікацій (аудіо та відео). Ідеальна ОСРЧ має передбачувану поведінку при всіх сценаріях навантаження, включаючи одночасні переривання та виконання потоків.

До переваг операційних систем реального часу можна віднести, те, що ОСРЧ управляється подіями без затримки часу обробки. ОС реального часу пропонують розробку API на основі окремих задач. У більшості випадків, це допомагає розробникам або тестувальникам працювати незалежно над своїми частинами проекту, що зменшує взаємозалежності між модулями за рахунок абстрагування часових залежностей і проектування на основі задач. Можливості ОС для планування на основі системи пріоритетів дозволяють ефективно розподіляти загальний час виконання на час аналітичної обробки та час критичної обробки.

Особливостям виділення пам'яті в ОСРЧ приділяється більше уваги, ніж в операційних системах загального призначення. Перша особливість - швидкість виділення пам'яті. Стандартна схема виділення пам'яті передбачає сканування списку значної довжини для визначення вільної області пам'яті заданого розміру, а це неприйнятно, оскільки в ОСРЧ виділення пам'яті відбувається за фіксований час. Друга особливість - пам'ять може стати фрагментованою в разі розділення вільних її частин вже запущеними процесами. Це може призвести до зупинки програми через її

неможливість задіяти новий фрагмент пам'яті. Алгоритм виділення пам'яті, поступово збільшуючи фрагментарність пам'яті, може успішно працювати на настільних системах, якщо вони перезавантажуються не рідше одного разу протягом місяця, але є неприйнятним для вбудованих систем, які можуть працювати роками без перезавантаження.

На теперішній час існує близько 205 операційних систем, які можна віднести до систем реального часу дії [1] і далеко не всі з них можна використати при проектуванні систем технічної діагностики. Тому успішний вибір ОСРЧ для проектування діагностичної системи потребує всебічного аналізу переваг і недоліків кожної із екземплярів ОСРЧ.

Метою дослідження є виявлення особливостей операційних систем реального часу для розробки технічних засобів діагностування на основі їх порівняльного аналізу.

Практична значущість результатів дослідження полягає в тому, що результати досліджень можуть бути використані при створенні мобільних діагностичних систем широкого спектру застосування.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження виконано з використанням даних офіційних виробників програмного забезпечення.

Аналіз літературних джерел. Не дивлячись на велику кількість існуючих операційних систем реального часу, найбільш популярними є наступні [2]:

- Deos (DDC-I)
- embOS (SEGGER)
- FreeRTOS (Amazon)
- Integrity (Green Hills Software)
- Keil RTX (ARM)
- LynxOS (Lynx Software Technologies)
- MQX (Philips NXP / Freescale)
- Nucleus (Mentor Graphics)
- Neutrino (BlackBerry)
- PikeOS (Sysgo)
- ThreadX (Microsoft Express Logic)
- µC/OS (Micrium)

- VxWorks (Wind River)
- Zephyr (Linux Foundation)

Тому є причина розглянути ці операційні системи і виявити їх особливості при використанні в системах технічної діагностики.

Deos™, операційна система реального часу з критичною безпекою DDC-I, яка була перевірена на відповідність вказівкам DO-178C/ED-12C Design Assurance Level A (DAL A) для додатків авіоники, підтримує ARINC 653 APEX, Rate Monotonic Scheduling (RMS). Deos є першою ОСРЧ, яка отримала сертифікат відповідності OSS для технічного стандарту FACE версії 3.1 як базового, так і розширеного профілів безпеки. Розширений профіль безпеки, який додає підтримку протоколу TCP/IP, підтримку багатьох процесів і розширені можливості POSIX (80 додаткових функцій), є надмножиною функціональних можливостей, які вимагаються базовим профілем.

Deos зарекомендувала себе як критично важлива для безпеки ОСРЧ з моменту її першої перевірки та аудиту і була сертифікована і вже «літає» в 10 тисячах літаків. З моменту первинної перевірки вона постійно розвивалась протягом останніх двох десятиліть в наступних базових лініях з новими процесорами та функціями, і врешті була успішно перевірена різними державними органами з сертифікації (FAA, ENAC, JAA, EASA, CAAC та інші).

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатись на базі: Linux і Windows XP, 7, 8 і 10
- Підтримувані процесори: Одно- та багатоядерні процесори x86, PowerPC, ARM і MIPS

FreeRTOS — багатозадачна операційна система реального часу для вбудованих систем. Портована на 35 мікропроцесорних архітектур. Поширюється під ліцензією MIT з 2017 року. FreeRTOS призначена для роботи на масових мікроконтролерах, які можуть мати низьку швидкодію, малий об'єм оперативної пам'яті, відсутність пристроїв управління пам'яттю та реалізованих на апаратному рівні механізмів підтримки багатозадачності, в тому числі швидкого переключення контексту[5].

Диспетчер системи дуже простий і компактний (займає, в залежності від платформи та налаштування ядра, 4-9 кілобайт),

- Існуючі компілятори розробки C, C++ (підмножина), і Ada95 [3]

embOS — це пріоритетно керована ОСРЧ, розроблена як основа для розробки вбудованих додатків і постійно розвивається з 1992 року. Вона доступна для всіх популярних ядер, компіляторів і інструментів розробки і була розгорнута на кількох мільярдах пристроїв у різних областях застосування. Різні механізми кваліфікують embOS як якісний програмний продукт найвищої продуктивності та надійності, завойовуючи своє місце як провідна в галузі операційна система реального часу.

Основні особливості ОС:

- Потужний і простий у використанні API
- Висока продуктивність з низьким використанням пам'яті
- Доступні плагіни на рівні ядра
- Нульова затримка переривань
- Сумісність з MISRA-C:2012
- Функціональна безпека сертифікована відповідно до IEC 61508 SIL 3 і IEC 62304 Class C [4]

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатись на базі: MacOS 10.5+(Intel and Arm M1), Linux і Windows Vista, 7, 8 і 10+ (x86, x64 and Arm),
- Підтримувані процесори: ARM7/9/11, ARM Cortex-A/R/M, AVR, AVR32, C16x, CR16C, ColdFire, H8, HCS12, M16C, M32C, MSP430, NIOS2, PIC18/24/32, R32C, R8C, RISC-V, RL78, RH850, RX100/200/600/700, RZ, SH2A, STM8, ST7, V850, 78K0, 8051
- Існуючі компілятори розробки: C, C++ однак підтримує пріоритетні процеси, витісняючи та оперативну багатозадачність, семафори та черги.

Версія Amazon FreeRTOS відрізняється функціями додаткової бібліотеки, яка забезпечує організацію безпечних з'єднань на базі мікроконтролерів із хмарними сервісами AWS IoT Core або потужнішими пристроями, що працюють під керуванням AWS Greengrass. У Amazon FreeRTOS забезпечується підтримка TLS 1.2, PKCS#11, шифрування даних, перевірки цілісності прошивки за допомогою цифрового підпису. Пропонуються засоби для оновлення прошивки в режимі OTA

(безпроводні). Мережевий стек включає підтримку MQTT, TCP/IP і Wi-Fi. Для вибору та установки програмних компонентів прошивки пропонується керуючий інтерфейс Amazon FreeRTOS Console. Специфічні компоненти для Amazon FreeRTOS, як і ядро FreeRTOS, поширюються під ліцензією MIT.[5]

Технічні особливості:

– Засоби розробки можуть запускатись на базі: GNU/Linux, macOS, Microsoft Windows и Solaris

– Підтримувані процесори: ARM (ARM7, ARM9, Cortex-M0, Cortex-M3, Cortex-M4, Cortex-A), Atmel AVR, AVR32, HCS12, MicroBlaze, Cortus (APS1, APS3, APS3R, APS5, FPF3, FPS6, FPS8), MSP430, PIC, Renesas H8/S, SuperH, RX, x86, 8052, Coldfire, V850, 78K0R, Fujitsu MB91460 series, Fujitsu MB96340 series, Nios II, Cortex-R4, TMS570, RM4x

– Існуючі компілятори розробки: C, C++, micro-python.

Integrity – ОСРЧ, орієнтована на вбудовані авіаційні системи (авіоніку). Integrity розроблена каліфорнійською компанією Green Hills Software. Сертифікована на відповідність POSIX. Орієнтована на однопроцесорні вбудовані системи, в центральному процесорі яких є блок управління пам'яттю. Система базується на власному розробленому в компанії мікроядрі μ -velocity, орієнтованому на пристрої із значними ресурсними обмеженнями. Середовища засобів розробки — інтегроване середовище для розробників вбудованої системи GHS Multi, серія компіляторів для мов Ада, C, C++, які підтримують засоби відладки і крос-компіляцію на різних апаратних платформах,.

Основна особливість системи — відмовостійкість (якщо виникне відмова в якій-небудь програмі, запусненій в цій операційній системі, система в цілому буде продовжувати працювати в штатному режимі, а перезапуск «впавших» додатків буде намагатись провести з наданням йому тих областей пам'яті даних, які були виділені додатком до його «падіння»).

Варіант системи Integrity-178B — операційна система реального часу, «підвид» Integrity, сертифікована за рівнем А стандарту DO-178B. Повністю підтримує вимоги ARINC 653-1-Application/Executive (APEX) API.

Використовується в американських військових літаках (наприклад, F-16, F-22, F-35) і гелікоптерах, а також у цивільних літаках Airbus A380, і Boeing 787.[6]

Технічні особливості:

– Засоби розробки можуть запускатись на базі: GNU/Linux, macOS, Microsoft Windows и Solaris

– Підтримувані процесори і платформи: Altera Cyclone, AMD x86, ARM Ltd, BAE RAD750, Broadcom, Fujitsu ARM, IBM 970, Intel Architecture (various), Intel SoC FPGA (Altera), Marvell (Cavium), Microchip PolarFire SoC, NVIDIA, NXP i.MX,NXP Layerscape, NXP MPC5xxx, NXP QorIQ, NXP S32, Qualcomm Snapdragon, Renesas R-Car, ST Telemaco, Texas Instruments Jacinto, Texas Instruments Sitara, Xilinx Zynq-7000 Soc, Xilinx UltraScale+ MPSoC

– Існуючі компілятори розробки: Ада, C, C++.

Keil RTX — це детермінована операційна система реального часу з відкритим вихідним кодом, що реалізує API CMSIS-RTOS v2, загальний інтерфейс RTOS для пристроїв на основі процесора Cortex-M. Сучасні програми для мікроконтролера часто повинні обслуговувати кілька дій одночасно, тому RTX дає можливість ефективно керувати перемиканням між видами діяльності. Кожна діяльність отримує окремий потік, який виконує конкретне завдання і це суттєво спрощує структуру користувацької програми. Потіки мають пріоритети, що дозволяє швидше виконувати критично важливі за часом частини користувацької програми. Детальніше про ОС:

– ОСРЧ з відкритим вихідним кодом. Keil RTX5 (включаючи вихідний код) постачається разом із Arm Keil MDK, повністю налаштовується і не має обмежень. Вона поставляється під ліцензією Apache 2.0 і на платформі GitHub.

– Проста у використанні - Зменшена потреба в навчанні, швидша розробка продукту. Keil RTX5 добре підтримується в середовищі μ Vision IDE/Debugger, яке містить інструменти, що підтримують RTX5, і дозволяють швидко відлагоджувати програми RTX5.

– Безпека та захист - Keil RTX5 сертифікована PSA і, природно, інтегрується з API архітектури безпеки платформи. Існує сертифікований у безпеці варіант Keil RTX5,

доступний як частина Arm Run-Time System для додатків функціональної безпеки (т.зв.:FuSa RTS).

– Гнучка мультизадачність – можна вибрати найкращий спосіб реалізації мультизадачності для прикладної програми. Keil RTX5 пропонує різні варіанти планування ядра, що дозволяє використовувати найбільш підходящий для вирішуваної задачі. Pre-emptive – кожен потік має інший пріоритет і працюватиме до тих пір, поки не буде готовий до запуску потік вищого пріоритету. Це зазвичай використовується в інтерактивних системах, де пристрій може перебувати в режимі очікування або у фоновому режимі, доки йому не буде надіслано вхідне повідомлення. Round-Robin – кожен потік буде працювати протягом фіксованого періоду часу роботи ЦП (кванту часу). Реєстратори даних/системні монітори зазвичай використовують циклове планування, щоб по черзі перебирати всі датчики або джерела даних без визначення пріоритетів. Co-operative – кожен потік працюватиме до тих пір, поки не буде сказано передати керування іншому потоку або не досягне блокуючого виклику ОС. Спільну багатозадачність можна побачити в програмах, які вимагають фіксованого порядку виконання.

– Детермінована поведінка – Keil RTX5 забезпечує повністю детерміновану поведінку, що означає, що події та переривання обробляються протягом заздалегідь визначеного часу (дедлайну). Програма користувача може будуватись на основі визначених послідовнісних і часових процесів.

– ОС призначена для вбудованих систем – використовує мінімальний обсяг системної пам'яті. Keil RTX5 спеціально написаний для програм, що працюють на мікроконтролерах ARM Cortex-M. Він працює швидко і вимагає лише мінімальних ресурсів MCU з розміром постійної пам'яті всього 5 КБ. [7]

Технічні особливості:

– Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+

– Підтримувані процесори і платформи: ARM

– Існуючі компілятори розробки: C, C++

LynxOS — Unix-подібна операційна система реального часу, розроблена для вбудовуваних систем, сумісна зі стандартами POSIX і, останнім часом, з операційною системою Linux. LynxOS використовується переважно в авіації, системах управління промисловими процесами та в галузі телекомунікацій. Це вбудована операційна система POSIX із жорстким розділенням у реальному часі, розроблена та сертифікована відповідно до стандартів безпеки FAA DO-178B/C DAL A.

LynxOS-178 є основним хостом для програм POSIX і FACE™ реального часу в рамках розробки та інтеграції LYNX MOSA.ic™. Внутрішня реалізація POSIX LynxOS-178 задовольняє профілі PSE як для спеціалізованих, так і багатопільових додатків реального часу, а також FACE™.

LynxOS і LynxOS-178 були розгорнуті в мільйонах критично важливих для безпеки додатків по всьому світу, включаючи численні військові та аерокосмічні системи. Використання LynxOS забезпечує скорочену сертифікацію та повторну сертифікацію розробленого програмного забезпечення. Поетапна сертифікація підтримує довгострокові програми з численними технічними оновленнями.

Компоненти LynxOS розраховані на абсолютний детермінізм (жорстка продуктивність у реальному часі), що означає, що вони реагують протягом певного періоду часу. Передбачуваний час відгуку гарантується навіть при інтенсивному введенні-виводі завдяки унікальній моделі багатопоточності ядра, що сприяє надзвичайно коротким та швидким програмам обробки переривань.[8]

Технічні особливості:

– Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+, Linux, Mac OS X

– Підтримувані процесори і платформи: Motorola 68010, x86/IA-32, ARM, Freescale PowerPC, PowerPC 970, LEON

– Існуючі компілятори розробки: C, C++, ObjectAda.

MQX (Message Queue eXecutive) — це операційна система реального часу, розроблена Precise Software Technologies, Inc., і в даний час продається Synopsys, Embedded Access, Inc. і

NXP Semiconductors. Як і більшість ОСРЧ, MQX включає багатозадачне ядро з випереджувальним плануванням і швидкою відповіддю на переривання, широкі можливості для міжпроцесного зв'язку та синхронізації, а також файлової системи.

Розмір системи налаштовується, це економить простір у пам'яті комп'ютера, використовуючи мінімум 6 КБ ПЗП, включаючи ядро, переривання, семафори, черги та менеджер пам'яті.

MQX включає набір протоколів Інтернету TCP/IP, вбудовану файловою системою DOS на основі таблиці розподілу файлів (MFS), стек хоста/пристрою універсальної послідовної шини (USB), а також проектування, налагодження та інструменти аналізу продуктивності. Він підтримується популярними бібліотеками, таких як wolfSSL, для забезпечення посиленних заходів безпеки, які працюють на рівні безпеки сокетів (SSL) і безпеки транспортного рівня (TLS).

MQX зазвичай використовується у вбудованих системах. Розробка MQX відбувається на хост-машині під керуванням Unix або Windows і крос-компілює цільове програмне забезпечення для роботи на різних архітектурах цільового центрального процесора.

MQX був портований на багато платформ і зараз працює на більшості сучасних процесорів, що використовуються на ринку вбудованих систем, включаючи Kinetis, ColdFire, PowerPC, ARC, ARM, StrongARM, xScale.

Усі нові пристрої Kinetis (ARM Cortex-M4), i.MX RT (ARM Cortex-M7) і ColdFire будуть включені в безкоштовну Freescale MQX RTOS. [9]

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+, Unix
- Підтримувані процесори і платформи: Freescale Power, ColdFire, Kinetis Cortex ARM, List of Freescale products
- Існуючі компілятори розробки: C, ASM.

Nucleus — операційна система реального часу, створена Accelerated Systems, підрозділом компанії Mentor Graphics (в даний час придбана компанією Siemens), для вбудовуваних систем і для різних процесорних платформ. Набула поширення в телевізійних декодерах, мобільних

телефонах, та інших переносних та кишенькових пристроях. Nucleus використовується Garmin International у GPS-модулях, призначених для цивільної авіації, а також практично у всіх китайських телефонах на базі масово використовуваного SOC MTK, у телефонах Siemens та Benq-Siemens 6x, 7x та 8x серій, Apple iPhone як baseband прошивки, та телефони на основі платформи Samsung Bada. Також використовується в годиннику фірми UWatch.

Nucleus підтримує режим асиметричної багато процесорної обробки (AMP) і режим симетричної багато процесорної обробки (SMP) для провідних 32- і 64-розрядних гетерогенних багатоядерних SoC. Nucleus також може працювати як GOS із вбудованим гіпервізором Mentor.

Під час роботи в режимі AMP Nucleus RTOS може співіснувати з іншими екземплярами Nucleus, Linux та/або відкритими машинними програмами, поширеними на інших процесорах. У цьому режимі кожен процесор працює незалежно і веде себе як окрема система всередині SoC. Mentor Embedded Multicore Framework забезпечує міжпроцесний зв'язок між операційними системами на різних ядрах та управління життєвим циклом процесора. Робота SMP передбачає, що екземпляр Nucleus RTOS керує кількома ядрами одночасно. Nucleus може розподіляти свої операції на всі ядра багатоядерного пристрою або будь-яку підмножину ядер. Для цієї мети Nucleus пропонує підтримку API під час виконання для прив'язаної обчислювальної області, а також контрольні задачі та спорідненість переривань для призначення ядра. [10]

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+, Linux, Mac OS X
- Підтримувані процесори і платформи: ARM (Cortex-M3-M4-R4-R4F-A8-A9, ARM7-9-11), PowerPC, MIPS32-16e, microMIPS, ColdFire, SuperH
- Існуючі компілятори розробки: C++.

PikeOS поєднує операційну систему реального часу (RTOS) з платформою віртуалізації та інтегрованим середовищем розробки на основі Eclipse IDE

для вбудованих систем. Це комерційний клон сімейства мікроядра L4. PikeOS розроблено для критичних додатків безпеки та безпечних додатків з потребами в сертифікації в галузі аерокосмічної, оборонної, автомобільної, транспортної, промислової автоматизації, медицини, мережевої інфраструктури та побутової електроніки.

Ключовою особливістю PikeOS є можливість безпечного виконання додатків з різними рівнями безпеки одночасно на одній комп'ютерній платформі. Це досягається шляхом суворого просторового та часового відокремлення цих програм. Програмне розділення додатків можна розглядати як контейнер із попередньо призначеними привілеями, який може мати доступ до пам'яті, часового кванту центрального процесора, пристроїв вводу/виводу та попередньо визначеного списку служб ОС. У PikeOS термін «додаток» відноситься до виконуваного файлу, пов'язаного з бібліотекою програмного інтерфейсу програм PikeOS (API) і виконується як процес всередині програмного розділу. Реалізація програмного інтерфейсу програм PikeOS (API) дозволяє додаткам варіюватися від простих циклів керування до повноцінних паравіртуалізованих гостьових операційних систем, таких як Linux або апаратно віртуалізованого програмного забезпечення [11].

Розділи програмного забезпечення також називають віртуальними машинами (VM), оскільки всередині розділу можна реалізувати повну гостьову операційну систему, яка виконується незалежно від інших розділів і, таким чином, може забезпечувати виконання задач із змішаною критичністю. PikeOS можна розглядати як гіпервізор типу 1.

Технічні особливості:

– Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+, Linux, Mac OS X

– Підтримувані процесори і платформи: ARM, PowerPC, x86, SPARC

– Існуючі компілятори розробки: Python, C++, C, Perl.

ThreadX спочатку була розроблена та продана фірмою Express Logic, зараз підтримується Microsoft. ThreadX забезпечує випереджувальне планування на основі

пріоритетів, швидку відповідь на переривання, керування пам'яттю, міжпотоківу взаємодію, сповіщення про події та функції синхронізації потоків. Основні технологічні характеристики ThreadX включають поріг випередження, успадкування пріоритетів, ефективне керування таймерами, забезпечують реалізацію швидких програмних таймерів, якісний дизайн пікоядра, швидкий ланцюжок подій і малий їх розмір: мінімальний розмір ядра для процесора архітектури ARM становить близько 2КБ.

ThreadX підтримує багатоядерні процесори за допомогою асиметричної багатопроцесорної обробки (AMP) або симетричної багатопроцесорної обробки (SMP). Ізоляція потоків програм за допомогою модуля керування пам'яттю (MMU) або захисту пам'яті блоку захисту пам'яті (MPU) можлива з модулями ThreadX.

ThreadX має сертифікати безпеки від Technischer Überwachungsverein (TÜV), і UL (Underwriters Laboratories) і відповідає вимогам MISRA C Асоціації надійності програмного забезпечення автомобільної промисловості.

ThreadX є основою платформи X-Ware Internet of things (IoT) Express Logic, яка також включає підтримку вбудованої файлової системи (FileX), підтримку вбудованого інтерфейсу користувача (GUIX), набір вбудованих протоколів Інтернету (TCP/IP) і хмарне підключення (NetX) та підтримку універсальної послідовної шини (USB). ThreadX отримав високу оцінку розробників і є дуже популярною ОСРЧ. Станом на 2022 рік, за даними компанії з маркетингових досліджень VDC Research, ОСРЧ ThreadX стала однією з найпопулярніших ОСРЧ у світі, будучи розгорнута в понад 6,2 мільярда пристроїв, включаючи побутову електроніку, медичні пристрої, програми для передачі даних і SoC [12].

ThreadX поширюється з використанням маркетингової моделі, в якій надається вихідний код, а самі ліцензії безкоштовні. Дистрибутив програмного забезпечення містить підготовлені конфігурації та демонстрації для кожного порту та компілятора, що дозволяє швидко проектувати додаток.

Технічні особливості:

– Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+

- Підтримувані процесори і платформи: ARC, ARM, Blackfin, CEVA, C6x, MIPS, NXP, PIC, PowerPC, RISC-V, RX, SH, SHARC, TI, V850, Xtensa, x86, Coldfire, others

- Існуючі компілятори розробки: C++, C.

μC/OS – Операційна система для мікроконтролерів (MicroC/OS, або скорочено μC/OS) — це операційна система реального часу (RTOS), розроблена у 1991 році. Вона містить ядро реального часу з використанням пріоритетної обробки переривань та механізму передбачення навантаження, написане переважно мовою програмування C. Призначена для використання у вбудованих системах.

MicroC/OS дозволяє визначити кілька функцій мовою C, кожна з яких може виконуватися як незалежний потік або завдання. Кожне завдання виконується з своїм пріоритетом і виконується так, ніби воно повністю володіє центральним процесором. Завдання з нижчим пріоритетом можуть бути витіснені завданнями з вищим пріоритетом у будь-який час. Завдання з вищим пріоритетом використовують служби операційної системи (наприклад, затримка або подія), щоб дозволити виконувати завдання з нижчим пріоритетом. Служби ОС надаються для керування завданнями та пам'яттю, обміну даними між завданнями та визначенням часу.

Особливості операційної системи [13]:

- Портативність. Пропонуючи максимально можливу простоту використання, ядра μC/OS постачаються з повним вихідним кодом і детальною документацією. Ядра μC/OS працюють на значній кількості процесорних архітектур.

- Масштабованість. Ядра μC/OS дозволяють виконувати значну кількість завдань і об'єктів ядра. Обсяг пам'яті ядер можна зменшити, щоб містити лише функції, необхідні для вашої програми, як правило, 6–24 КБ простору коду та 2–5 КБ простору даних.

- Надійність. Ядра μC/OS можуть включати функцію відладки, яка скорочує час розробки. Ядра забезпечують широку перевірку діапазону вхідних даних, включаючи перевірку показників, переданих при викликах API, перевірку параметрів управління і перевірку на рівні завдань із ISR, а також аргументів в межах допустимого діапазону.

- Ефективність. Ядра Micrium також містять цінну статистику часу виконання, що робить внутрішні елементи програми доступними для спостереження. За допомогою цієї інформації можна визначити вузькі місця в продуктивності та оптимізувати використання процесора ще на початку циклу розробки.

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатися на базі: Microsoft Windows Vista, 7, 8 і 10+, Linux, Mac OS X

- Підтримувані процесори і платформи: Nios II SoC FPGA (Cortex-A), Blackfin ADSP-CM4xx (Cortex-M), ARM7, ARM9, ARM11, Cortex-A5, Cortex-A7, Cortex-A8, Cortex-A9, Cortex-A15, Cortex-A17, Cortex-A53, Cortex-A57, Cortex-R4, Cortex-R5, Cortex-R7, Cortex-M0, Cortex-M1, Cortex-M3, Cortex-M4(F), Cortex-M7, PSoC 4, PSoC 5, eSi-RISC, M14K, XMC4000, PIC24, PIC32, SmartFusion2, STM32F, STR9, MSP430, MSP432, Hercules RM, Hercules TMS570, Zynq-7000, Zynq Ultrascale+ MPSoC

Існуючі компілятори розробки: C++, C

VxWorks — операційна система реального часу, що розробляється компанією Wind River Systems (США), орієнтована на використання у комп'ютерах, що працюють в системах жорсткого реального часу. VxWorks є системою із крос-засобами розробки прикладного програмного забезпечення.

Як і більшість інших ОС реального часу, VxWorks включає багатозадачне ядро з витісняючим планувальником і швидким відгуком на переривання, засоби міжпроцесної взаємодії та синхронізації, а також файлову систему і мережеву підсистему (стек протоколів TCP/IP). У комплект поставки входять засоби для крос-компіляції, моніторингу продуктивності (WindView), віддаленого символічного налагодження, а також емуляції різних процесорів. Додатково поставляється значна кількість різних стеків протоколів, графічних підсистем та ін. як від самої Wind River Systems, так і від третіх фірм. Кількість підтримуваних VxWorks вбудовуваних платформ є однією з найбільших серед операційних систем реального часу [14].

VxWorks має архітектуру клієнт-сервер і, як і більшість ОС жорсткого реального часу, побудована за технологією мікроядра. На нижньому рівні ядра (WIND Microkernel)

виконуються лише базові функції планування задач та управління комунікацією/синхронізацією між завданнями. Всі інші функції ОСРЧ вищого рівня - управління пам'яттю, мережеві засоби і т. д. - реалізуються через найпростіші функції нижнього рівня. За рахунок такої ієрархічної організації досягається швидкодія та детермінованість ядра системи, також це дозволяє легко будувати необхідну конфігурацію операційної системи.

VxWorks можна скомпонувати як для систем із жорсткими апаратними обмеженнями, так і для систем із розвинутою функціональністю. Окремі модулі системи можуть бути масштабованими. При складанні системи можна відключати певні функції системи, не потрібні в даний момент, також можна прибирати специфічні об'єкти синхронізації ядра, якщо в них немає потреби. Але, незважаючи на те, що система конфігурується, не можна сказати, що в ній реалізований компонентний підхід, тому що всі модулі побудовані над базовим ядром і не можуть бути використані в інших середовищах.

Ядро VxWorks має такі властивості:

- кількість завдань обмежується лише пам'яттю;
- має 256 рівнів пріоритетів задач;
- планування завдань організовано двома способами: витіснення за пріоритетами та циклічне;
- взаємодія завдань відбувається через черги повідомлень, семафори, події та канали (для взаємодії між процесами), сокети та віддалені виклики процедур (для мережевої взаємодії), поділ пам'яті (використовується для поділу даних) та сигнали (для управління винятковими ситуаціями);
- забезпечується кілька видів семафорів для управління критичними системними ресурсами
- двійкові, обчислювальні та взаємовиключні з пріоритетним успадкуванням; можливе детерміноване перемикання контексту.

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows 7, 8 і 10+, Linux, Mac OS X

- Підтримувані процесори і платформи: Motorola 680x0 и CPU32, PowerPC, Intel 386 / 486/ Pentium, Intel 960, Sparc, Mips R3000/4000, AMD 29K, Motorola 88110, HP PA-RISC, Hitachi SuperH, DEC Alpha

Існуючі компілятори розробки: C11 і C++17, Boost C++ libraries, Rust, Python

Zephyr – ОС Zephyr походить від Virtuoso RTOS для цифрових сигнальних процесорів (DSP). Операційна система Zephyr використовує підтримку дерева пристроїв (DTS) лише під час компіляції коду. Потужні інструменти конфігурації дозволяють гнучко включати лише ті функції, які дійсно потрібні в конкретних програмах. Об'єм пам'яті може становити всього 8 Кб. Інша особливість операційної системи Zephyr полягає в тому, що вона має лише один адресний простір, що означає, що код програми та ядро об'єднані в одній двійковій компіляції.

Створення ланцюжка інструментів: Будучи по суті кросплатформним проектом, операційна система Zephyr, природно, використовує систему збірки CMake. Він також широко використовує інструмент командного рядка під назвою «West», який використовується для створення, перепрограмування та налагодження програм, а також менеджер репозиторію Zephyr.

Підтримка давачів: операційна система Zephyr має розширену систему підтримки сенсорів з високим рівнем абстракції. Процес проходить успішно під час ввімкнення датчиків, які вже підтримуються операційною системою Zephyr. При цьому підтримується ряд плат і давачів, однак процес ускладнюється, якщо новий давач, якого немає у списку, потрібно ввімкнути на платі користувача.[15]

Технічні особливості:

- Засоби розробки можуть запускатись на базі: Microsoft Windows 7, 8 і 10+, Linux, Mac OS X

- Підтримувані процесори і платформи: ARM (Cortex-M0, -M1, -M3, -M4, -M7, -M23, -M33, -R4, -R5, -R82, -A9, -A53), ARC, MIPS, Nios II, RISC-V, Xtensa, SPARC, x86, x86-64

Існуючі компілятори розробки: C і C++, Python

Основні характеристики операційних систем реального часу зведені в таблиці 1.

Таблиця 1 Основні характеристики основних ОСРЧ

Назва	Ліцензія	Код	Платформа	Примітки
Deos	Proprietary	closed	x86, PowerPC, MIPS	Придатна для авіаційних застосунків, підтримка мови Ada
embOS	Proprietary	closed, available to customers, free object code for non-commercial use	ARM7/9/11, ARM Cortex-A/R/M, AVR, AVR32, C16x, CR16C, ColdFire, H8, HCS12, M16C, M32C, MSP430, NIOS2, PIC18/24/32, R32C, R8C, RISC-V, RL78, RH850, RX100/200/600/700, RZ, SH2A, STM8, ST7, V850, 78K0, 8051	Підтримка малопотужних процесорів
FreeRTOS	MIT	open source	ARM, AVR, AVR32, ColdFire, ESP32, HCS12, IA-32, Cortex-M3-M4-M7, Infineon XMC4000, MicroBlaze, MSP430, PIC, PIC32, Renesas H8/S, RISC-V, RX100-200-600-700, 8052, STM32, TriCore, EFM32	Підтримка малопотужних процесорів
Integrity	Proprietary	closed	ARM, XScale, Blackfin, ColdFire, MIPS, PowerPC, x86	Придатна для авіаційних застосунків, підтримка мови Ada, підтримка FPGA, цифрових сигнальних процесорів
Keil RTX	Apache 2.0	open source	ARM	
LynxOS	Proprietary	source available	Motorola 68010, x86/IA-32, ARM, Freescale PowerPC, PowerPC 970, LEON	Придатна для авіаційних застосунків, підтримка мови ObjectAda
MQX	Proprietary	complimentary source available	Freescale Power, ColdFire, Kinetis Cortex ARM, List of Freescale products	
Nucleus	Proprietary	source provided	ARM (Cortex-M3-M4-R4-R4F-A8-A9, ARM7-9-11), PowerPC, MIPS32-16e, microMIPS, ColdFire, SuperH	
Neutrino	Proprietary	some source provided	ARM, MIPS, PPC, SH, x86, XScale	
PikeOS	Proprietary	available to customers	PPC, x86, ARM, MIPS, SPARC-LEON	Підтримка мови Perl, розширені можливості віртуалізації
ThreadX	Proprietary	partial source available	ARC, ARM/Thumb, AVR32, BlackFin, 680x0-ColdFire, H8-300H, Luminary Micro Stellaris, M-CORE, MicroBlaze, PIC24dsPIC, PIC32, MIPS, V8xx, Nios II, PowerPC, Renesas RX100, RX200, RX600, RX700, Synergy, SH, SHARC, StarCore, STM32, StrongARM, TMS320C54x, TMS320C6x, x86/x386, XScale, Xtensa/Diamond, ZSP	Підтримка цифрових сигнальних процесорів
μC/OS	GNU GPL	open source	AVR, ARM, MIPS32, MSP430, Intel i386, Linux386	Підтримка малопотужних процесорів, підтримка FPGA, цифрових сигнальних процесорів

VxWorks	Proprietary	open source	ARM, IA-32, Intel 64, MIPS, PowerPC, SH-4, StrongARM, xScale	Значна кількість мов програмування, якими можна здійснювати розробку
Zephyr	Apache 2.0	open source	ARM (Cortex-M0, -M3, -M4, -M23, -M33, -R4, -R5, -A53), x86, ARC, RISC-V, Nios II, Xtensa, SPARC	Підтримка списку давачів

Результати досліджень характеристик найбільш розповсюджених ОСРЧ, придатних для створення систем і пристроїв технічної діагностики показали, що визначення типу операційної системи повинне здійснюватися на основі потреби забезпечення необхідної швидкодія обробки вхідних даних і обчислювальної потужності мікропроцесора системи діагностування. Крім того, значну роль грає мобільність і автономність системи, що прямо пов'язана із споживаною електричною потужністю, і визначає потребу в наявності автономного живлення. Також грає роль собівартість пристрою, що буде включати також вартість ліцензії ОСРЧ. Від цього залежить також вибір елементної бази, з високою або невеликою швидкодією, об'ємом пам'яті і т.д. У спеціальних випадках визначальною є галузь застосування, яка накладає додаткові обмеження на надійність функціонування операційної системи і вимагає наявності сертифікації безпеки, які визначаються спеціальними стандартами. Потреба використання типових давачів та вимірювальних перетворювачів і накладені обмеження на час розробки системи, визначає вибір операційної системи з будованою підтримкою таких давачів.

Висновки. Таким чином, у випадку потреби розробки системи діагностування для нафтогазового комплексу за умови обмеженого часу доцільно використовувати ОСРЧ Zephyr, яка має підтримку широкого списку вимірювальних сенсорів та перетворювачів. Для випадку об'єктів ядерної енергетики доцільно використання ОСРЧ типу LynxOS, Integrity, Deos, які мають потрібну сертифікацію, і засоби які забезпечують безпечну поведінку у випадку несприятливого середовища виконання. У разі, якщо розроблювана система не містить високочастотних сигналів, (наприклад не є приладом ультразвукової та радіочастотної

діагностики), повинна бути виконана мінімально дешево, слід використовувати ОСРЧ μ C/OS, FreeRTOS, embOS. У випадку потреби проектування системи яка вимагає широкої масштабованості, корпоративну підтримку, із значними обчислювальними ресурсами, і проект забезпечений значними фінансовими ресурсами, слід використати операційну систему ThreadX. Цей вибір доцільний, також, у випадку потреби обробляти середньо-швидкісну вхідну інформацію (сигнали до частот 300кГц). У випадку, якщо слід працювати із високочастотними сигналами, доцільно використовувати операційні системи Integrity, μ C/OS, які підтримують роботу з програмованими логічними матрицями FPGA.

Література / References

1. Comparison of real-time operating systems – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_real-time_operating_systems (дата доступу 08.05.2022)
2. I. Ferguson. What Are the Most Popular Real-Time Operating Systems? – Режим доступу: <https://www.lynx.com/embedded-systems-learning-center/most-popular-real-time-operating-systems-rtos> (дата доступу 08.05.2022)
3. Deos, a Time & Space Partitioned, Multi-core Enabled, RTOS Verified to DO-178C/ED-12C DAL A. – Режим доступу: https://www.ddci.com/products_deos_do_178c_arinc_653/ (дата доступу 08.05.2022)
4. embOS — The leading RTOS (real-time operating system) – Режим доступу: <https://www.segger.com/products/rtos/embos/> (дата доступу 08.05.2022)
5. FreeRTOS. Real-time operating system for microcontrollers. – Режим доступу: <https://www.freertos.org/> (дата доступу 08.05.2022)

6. INTEGRITY RTOS. – Режим доступу: <https://www.ghs.com/products/rtos/integrity.html> (дата доступу 08.05.2022)
7. RTX Real-Time Operating System. – Режим доступу: <https://www.keil.com/arm/rl-arm/kernel.asp> (дата доступу 08.05.2022)
8. LynxOS. – Режим доступу: <https://www.lynx.com/products/lynxos-posix-real-time-operating-system-rtos> (дата доступу 08.05.2022)
9. MQX Real-Time Operating System (RTOS). – Режим доступу: <https://www.nxp.com/design/software/embedded-software/mqx-software-solutions/mqx-real-time-operating-system-rtos:MQXRTOS> (дата доступу 08.05.2022)
10. Nucleus RTOS. The Real-time Operating System for Today's Advanced Designs. – Режим доступу: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/embedded/nucleus-rtos.html> (дата доступу 08.05.2022)
11. PikeOS RTOS & Hypervisor. – Режим доступу: <https://www.sysgo.com/pikeos> (дата доступу 08.05.2022)
12. Azure RTOS ThreadX documentation. – Режим доступу: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/rtos/threadx/> (дата доступу 08.05.2022)
13. Micrium Real-Time Kernel. – Режим доступу: <https://www.silabs.com/developers/micrium-os/micrium-real-time-kernel> (дата доступу 08.05.2022)
14. VxWorks. The Leading RTOS for the Intelligent Edge. – Режим доступу: <https://www.windriver.com/products/vxworks> (дата доступу 08.05.2022)

УДК 681.518.5

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-78-87

**ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
ТРАНСПОРТУВАННЯ РІДКИХ ПРОДУКТІВ НА ЗАСАДАХ СИСТЕМ
ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ***О. В. Кучмистенко, Р. О. Олексин, М. В. Шавранський, О. І. Белей, О. Ю. Мірзосєва,
Р. Б. Стасюк**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, kafatp@nung.edu.ua*

В роботі досліджується проблеми контролю, моніторингу та керуванню об'єктів транспортування рідких продуктів, а саме трубопроводи, насоси та вузлами обліку. На сьогоднішній час кількість трубопроводів малого і середнього діаметрів найбільш поширена серед постачальників рідких продуктів тому отримати повністю автономні транспортні системи які оснащені системами моніторингу та керування є досить привабливими.

При дослідженні існуючих підходів контролю та керування трубопровідними системами можна зауважити той факт, що промислові транспортні системи забезпечені системами контролю та керування які мають достатнє забезпечення технічними засобами автоматизації. Проте остаточну автоматизацію на безлюдній основі так і не отримали оскільки особливість таких транспортних систем потребують постійного нагляду і контролю. Насамперед це пов'язано з тим, що експлуатація такого обладнання супроводжується значними величинами параметрів технологічного процесу і зношенням основного і допоміжного обладнання. Вихід з цієї ситуації можна намітити за рахунок розробки більш надійного обладнання транспортних систем з використанням новітніх технологій і відповідних систем моніторингу та керування об'єктів транспортування рідких продуктів на засадах систем обчислювального інтелекту.

Сучасні можливості у розробці систем автоматизованого керування значно випереджують бажання проектувальників фахівців з експлуатації трубопровідних систем це насамперед пов'язано з виникненням нових технологій і засад обчислювального інтелекту. Тому рух у напрямку вдосконалення підходів до організації підходів систем транспортування є перспективним і має кінцеву мету, яка полягає у подальшому удосконаленню та створенню систем автоматизованого порадника при прокладанні трубопроводу та систем ефективного моніторингу та керування при транспортуванні рідких продуктів.

Ключові слова: трубопровідна транспортна система, система автоматичного моніторингу і керування, об'єкт керування.

The paper examines the problems of control, monitoring and management of facilities for the transportation of liquid products, namely pipelines, pumps and metering units. To date, the number of small and medium-diameter pipelines is the most common among suppliers of liquid products, so get fully autonomous transport systems that are equipped with monitoring and control systems are quite attractive.

When studying the existing approaches to control and management of pipeline systems, it can be noted that industrial transport systems are equipped with control and management systems that have sufficient technical means of automation. However, the final automation on a deserted basis has not been received because the peculiarities of such transport systems require constant supervision and control. This is primarily due to the fact that the operation of such equipment is accompanied by significant parameters of the technological process and the wear of the main and auxiliary equipment. The way out of this situation is to develop more reliable equipment for transport systems using the latest technologies and appropriate systems for monitoring and managing the transportation of liquid products on the basis of computational intelligence systems.

Modern possibilities in the development of automated control systems are far ahead of the desires of designers of specialists in the operation of pipeline systems, this is primarily due to the emergence of new technologies and principles of computational intelligence. Therefore, the movement towards improving approaches to the organization of transport system approaches is promising and has the ultimate goal, which is to further improve and create automated guidance systems for pipeline laying and effective monitoring and control systems for transportation of liquid products.

Keywords: pipeline transport system, automatic monitoring and control system, control object.

Вступ. Однією з найважливіших завдань системи моніторингу та керування об'єктів транспортування рідких продуктів є виявлення факту зміни тиску та ідентифікація причини такої зміни. Вирішення цього питання дозволяє вирішити питання повної автоматизації транспортування рідких продуктів та намітити клас обладнання для його реалізації.

Для якісної роботи будь-якої системи, трубопровід не виняток, потрібен постійний контроль, моніторинг технологічних параметрів та коректне керування процесом транспортування з підтримкою справності та цілісності всіх елементів системи. Велика протяжність прокладання та віддаленість місць пролягання транспортних систем значно ускладнює обслуговування та контроль стану трубопроводів. Саме тому, щоб уникнути економічних втрат, аварій, неполадок, необхідно застосовувати методи дистанційного моніторингу стану трубопроводів та їх ефективне керування.

Постановка завдання: продовження теоретичних досліджень в напрямку розвитку трубопровідних систем, що будуються на засадах штучного інтелекту для моніторингу та керування об'єкта транспортування рідких продуктів.

Метою даної роботи є створення системи моніторингу та керування об'єктів транспортування рідких продуктів з використанням хмарних

технологій та гібридних систем обчислювального інтелекту.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та керування ділянкою трубопроводу в автоматичному режимі на засадах хмарних технологій з використанням гібридних систем обчислювального інтелекту.

Результати: досягнення вказаної мети забезпечується вирішенням таких завдань: аналіз методів і способів сучасних систем моніторингу та керування трубопровідних систем; Теоретичні дослідження у напрямку удосконалення існуючих методів моніторингу і керування; вибір способу реалізації сформульованих завдань за допомогою інтелектуальних технологій на засадах систем обчислювального інтелекту.

При будівництві унікальних трубопровідних систем (водопостачання, продуктопроводів, нафтопроводів та ін.) завдання забезпечення конструктивної безпеки та високої експлуатаційної надійності набувають особливо високий пріоритет. Одним з нових елементів забезпечення безпеки таких трубопровідних систем є розробка і впровадження автоматизованих систем моніторингу технічного стану та експлуатації цих систем.

Обладнання системи моніторингу та керування (СМтаК) поділяють за типами обладнання що використовується та принципами дії (рис. 1.1.).



Рисунок 1 – Класифікація СМтаК за принципами дії і типам застосовуваного обладнання.

До періодичного контролю стану трубопроводу відносять візуальне спостереження труби лінійними обхідниками і методи з використанням діагностичних засобів. Візуальне спостереження дозволяє виявити вихід перекачуваного продукту на поверхні землі [1]. За допомогою внутрішньотрубних дефектоскопів можна виявити з великою ймовірністю всі дефекти в трубопроводі, але цей метод відрізняється істотною дорожнечою. Також у періодичного контролю стану трубопроводу є істотний недолік - це відсутність оперативності.

До другої категорії відносяться методи, які здійснюють безперервний контроль над станом трубопроводу в режимі реального часу, як правило, за допомогою засобів автоматики і

телемеханіки. Вони можуть розділятися на два типи:

- методи, які здійснюють контроль над технологічними параметрами. До окремої категорії відносяться параметричні методи, побудовані на основі аналізу зміни гідравлічних параметрів технологічного процесу при виникненні витоків [2].

- методи, які здійснюють контроль над додатковими параметрами (довжина хвилі Бреґга, акустична емісія і т.д.).

Для взаємного усунення недоліків параметричні методи, як правило, використовують спільно. На рисунку 1.2 показана схема інформаційних потоків параметричної СМтаК.

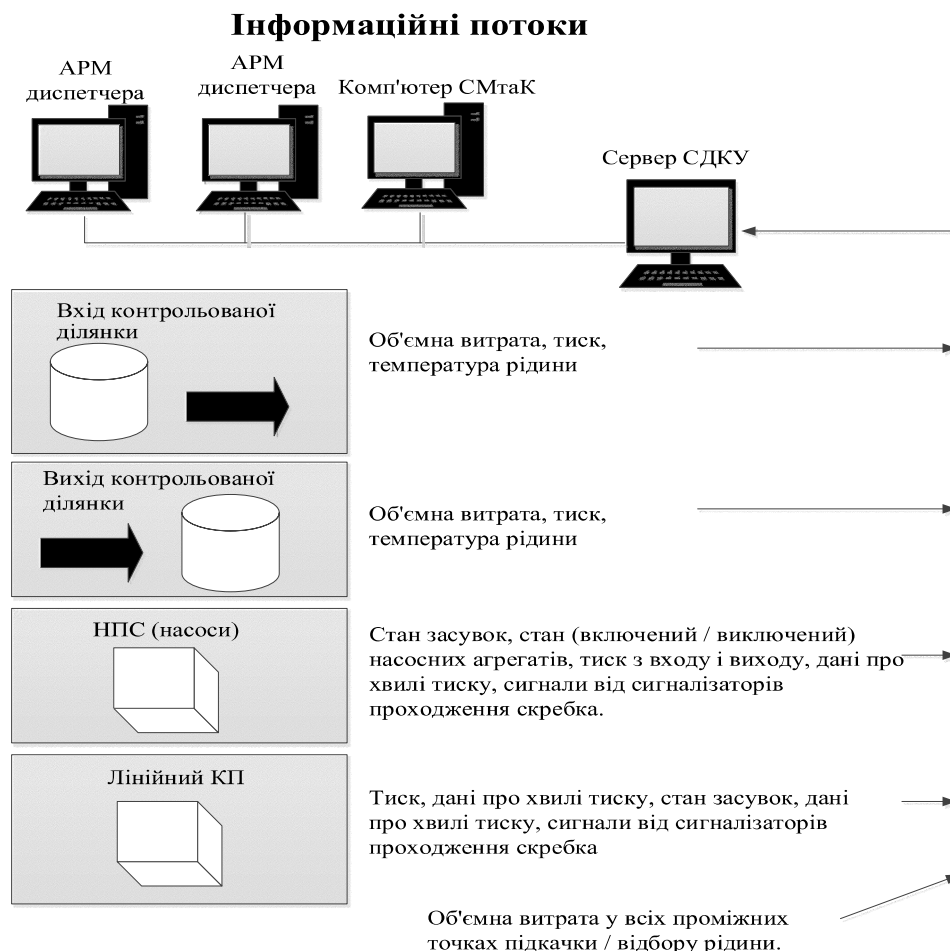


Рисунок 2 – Схема інформаційних потоків параметричної СМтаК

На рисунку 1.3 показано типове рішення параметричної СМтаК. Допускається установка на кожному КП (контрольованому пункті) по одному датчику тиску. На кожному КП використовується один датчик тиску (P1), при його виході з ладу СМтаК сама переходить на роботу по другому датчику (P2). У таблиці 1.1 показані характеристики

параметричної СМтаК. Як видно з таблиці, параметричні системи недостатньо точні.

Недоліки параметричної СМтаК: низька точність визначення місця утворення просочувань, помилкові спрацьовування, неточність математичної моделі, утрудненість застосування при перехідних режимах.

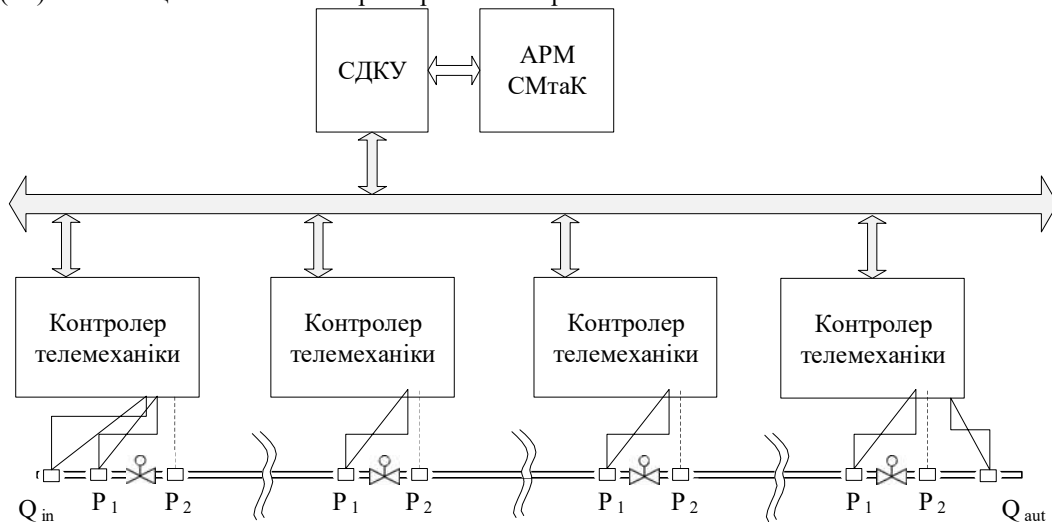


Рисунок 3 – Типове рішення параметричної СМтаК

Відповідно до теорії неусталених фізичних процесів, в момент утворення зміни тиску рідини у трубопроводі виникають хвилеподібні зміни цього параметру. Хвиля зміни тиску доходить до контрольних точок по обидві сторони від місця збурення. Час прибуття сигналів від датчиків фіксується на АРМ центрального диспетчерського пункту. Обчислювальна процедура аналізує результати надходить від датчиків з урахуванням: часу надходження сигналів, відстані до датчиків, швидкості руху хвилі зміни тиску, експлуатаційних параметрів транспортування і обчислює місце де відбулася така технологічна подія. Різниця $(t_1 - t_2)$ моментів підходу хвиль говорить про зміщення місця технологічної події по відношенню до центру контрольованої ділянки. Координата X місця освіти витoku знаходиться через різницю моментів підходу хвиль тиску до початку і кінця ділянки трубопроводу за допомогою формули:

$$X = \frac{L}{2} + \frac{C}{2} \cdot (t_1 - t_2) \quad (1.1)$$

де L - довжина діагностується ділянки трубопроводу; C - швидкість звуку.

Для реалізації даного алгоритму спеціальна програма функціонує в контролері на контрольованому пункті (КП) або на верхньому рівні. Для її функціонування потрібно мати показники датчиків тиску з періодом часу не більше 0,01 секунди. Для виявлення хвилі тиску застосовуються цифрові фільтри, кореляційний аналіз даних. Якщо хвиля зафіксована, то відправляється сигнал на АРМ верхнього рівня СМтаК.

Остаточне рішення приймає система верхнього рівня. Характеристики методу залежать від динамічних характеристик датчиків, рівня зашумленості, точності синхронізації часу, можливості контролера переробляти інформацію з необхідною швидкістю, точності визначення швидкості звуку.

Рисунок 1.4 демонструє типове рішення СМтаК по хвилі тиску. Тут показані: КП1-КП4 - контрольовані пункти, контролер (модуль) СМтаК, Д1-Д8 - датчики надлишкового тиску, Global Positioning System (GPS) - антена навігаційної системи, L1 - відстань між датчиками не менше 5 м. L2 - одно 5 км при відстані між КП1 і КП2 (КП3 і КП4) більше 10

км. При відстані між КП1 і КП2 (КП3 і КП4) менше 10 км L2 дорівнює половині відстані між КП1 і КП2 (КП3 і КП4). КП має бути встановлено не менш трьох. Допускається

використання на одному КП по одному датчику тиску. У таблиці 1.2 показані характеристики СМтаК по хвилі тиску.

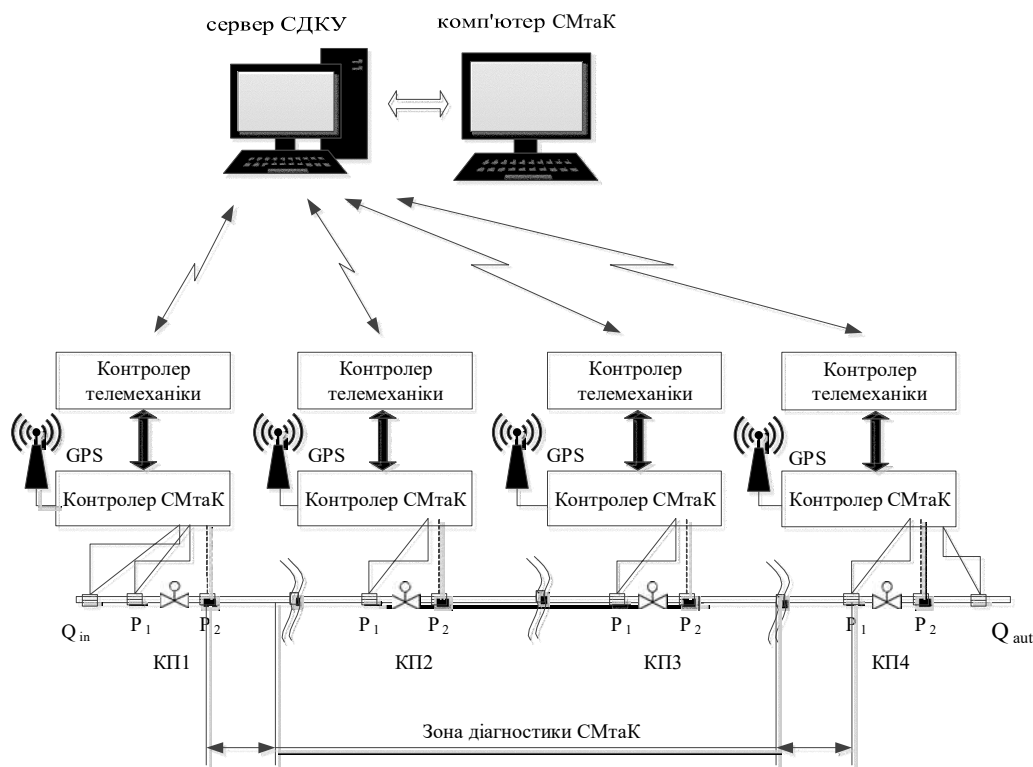


Рисунок 4 – Типове рішення СМтаК по «хвилі тиску»

Цей метод є більш точним, ніж параметричні, але, тим не менш, його точність не висока (близько 2,8 км при повільному темпі розвитку технологічної події).

На точність впливають стохастичні коливання тиску, викликані роботою насосних агрегатів, і час розвитку витoku. Чим повільніше розвивається зміна тисків, то більше зменшується точність визначення місця виникнення технологічної події. При слабкому розвитку витoku система не здатна її виявляти взагалі.

Для підвищення точності, надійності, оперативності вищеписані СМтаК використовуються спільно, в так званій, комбінованій СМтаК.

Комбінована система виявлення відхилень від норм технологічного режиму - це програмноапаратний комплекс, що функціонує спільно з СДКУ, робота якого заснована на використанні в якості вихідних даних

технологічних параметрів роботи трубопроводу, виміряних з високою частотою (більше 10 Гц) і застосовані для виявлення відхилень від норм технологічного режиму за математичною моделлю і алгоритмів виявлення хвилі тиску.

Комбіновані СМтаК працюють як на стаціонарних, так і на нестационарних режимах роботи трубопроводу.

СМтаК дозволяє визначити наявність відхилень від норм технологічного режиму, час його виникнення, витрату через отвір витікання та координати місця утворення.

Комбінована СМтаК може бути виконана за двома варіантами: з обробкою тисків в контролерах СМтаК і без обробки тисків в контролерах СМтаК.

При створенні комбінованої СМтаК за першим варіантом на середньому рівні через 10-20 км на КП лінійної телемеханіки встановлюються додаткові контролери (модулі) СМтаК («хвильові» КП) - далі за текстом «контролери СМтаК», що обробляють дані

вимірювань тиску. Інформація про витік з «хвильових» КП надходить в систему телемеханіки спорадично, щодо подій і далі разом зі стандартними даними вимірів (витрати, тиску, стану засувок і насосів) передаються по OPC (OLE for Process Control) технології на верхній рівень комбінованої СМтаК, де функціонують всі алгоритми параметричної СМтаК і алгоритми верхнього рівня СМтаК по хвилі тиску.

Структурна схема комбінованої СМтаК (варіант 1, з установкою додаткових

контролерів СМтаК для обробки тисків) представлена на рисунку 1.5.

При створенні комбінованої СМ СМтаК ТАК за варіантом 2, на середньому рівні в контролерах телемеханіки (контролерах СМтаК), через певні інтервали часу створюються пакети, що містять результати вимірювань тисків з інтервалом не більше 0,01 секунди. Пакети передаються на верхній рівень системи телемеханіки разом з іншими параметрами (витрата, тиск, стану засувок, насосів) в програму первинної обробки СМтаК і далі - на верхній рівень комбінованої СМтаК.

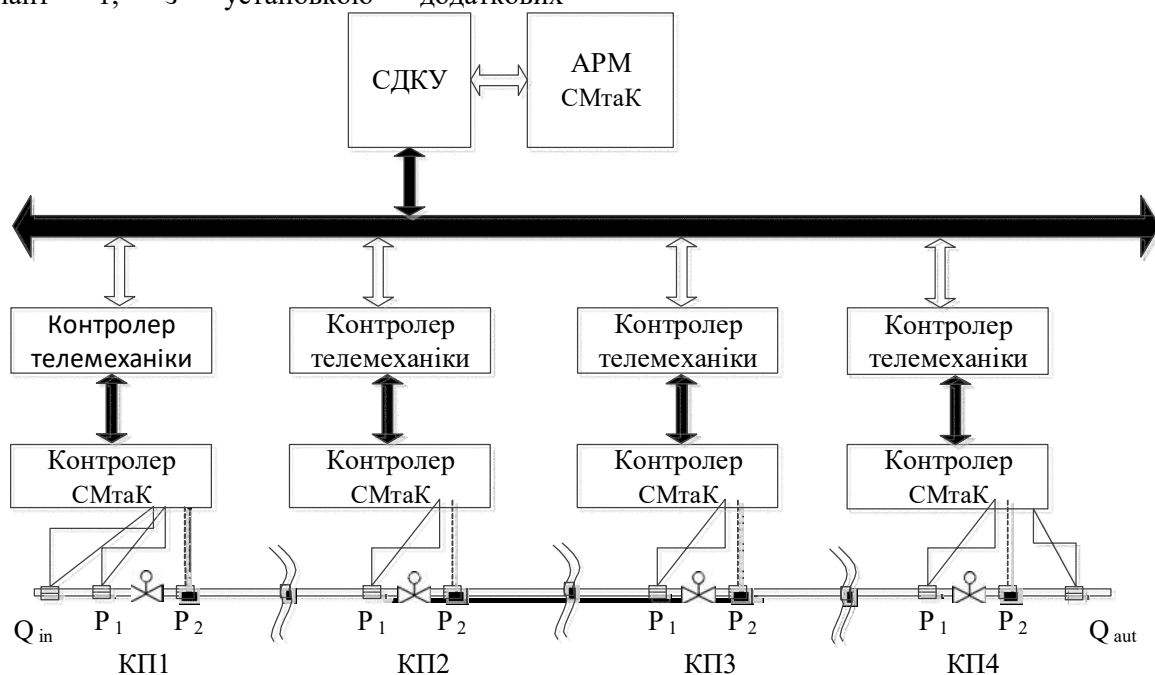


Рисунок 5 – Комбінована СМтаК з обробкою вимірних тисків в додаткових контролерах СМтаК

Структурна схема комбінованої СМтаК, варіант 2 (без обробки тисків в контролерах СМтаК) представлена на рисунку 1.6.

Цей варіант не вимагає обробки тисків в контролерах СМтаК, але в цьому випадку пред'являються підвищені вимоги до каналу передачі даних.

Незважаючи на одночасну роботу декількох методів, комбінована СМтаК, тим не менш, має недоліки. Дуже повільний розвиток зміни відхилень від норм технологічного режиму «нейтралізує» можливість розрахунку її місцезнаходження за методом «хвилі тиску». А розрахунки координати витіку за методом «аналізу профілю» або з

використанням математичної моделі мають велику похибку при виявленні незначного витіку.

Для визначення зміни відхилень від норм технологічного режиму в трубопроводі на основі аналізу технологічних тимчасових рядів (ТВР) датчиків тиску, встановлених на початку і в кінці ділянки цього трубопроводу, можна застосовувати адаптивні фільтри з налаштовувати диференціальними і інтегральними властивостями [3].

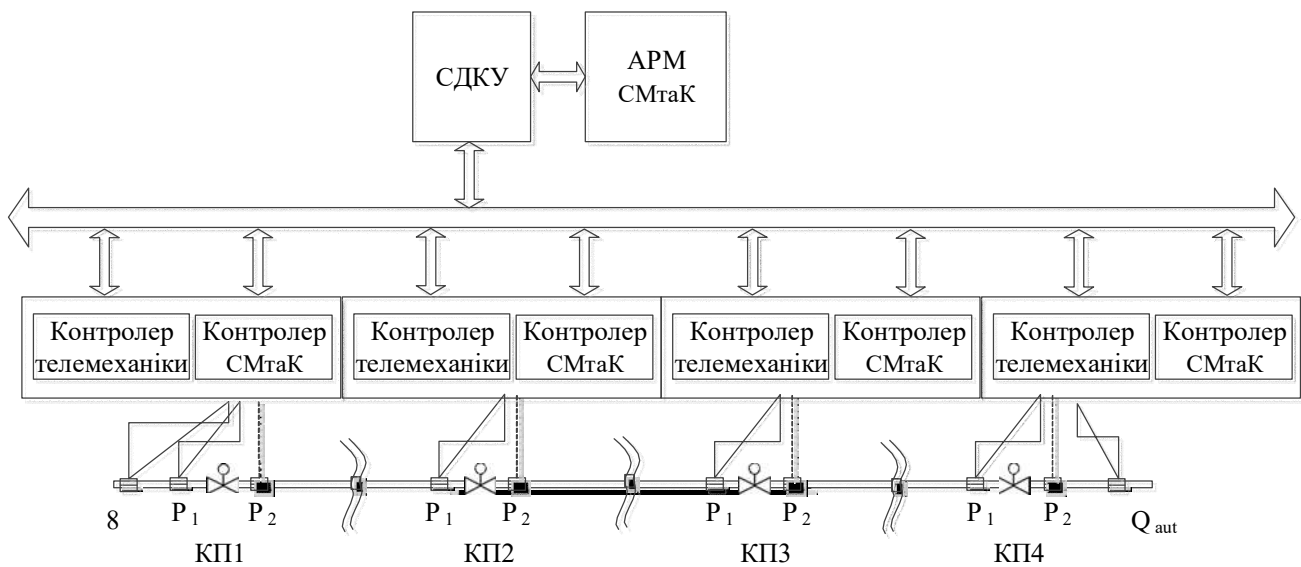


Рисунок 6 – Комбінована СМтаК без обробки вимірних тисків в контролерах з передачею пакетів вимірних тисків на верхній рівень

При раптовому відхиленні тиску в момент часу t_y і швидкого його розвитку на даній ділянці трубопроводу, довжиною L , відбувається різке зниження витрати рідини в трубопроводах в місці утворення витоку, що знаходиться на відстані l_y від початку ділянки трубопроводу. Воно супроводжується стрибкоподібною зміною тиску, яке зі швидкістю звуку в рідині поширюється від місця освіти витоку до початку ділянки трубопроводу у вигляді біжучої хвилі, що має форму φ ,

$$p(l, t) = e^{-a(t-t_y)} \varphi [c(t-t_y) + (l-l_y)] \quad (1.3)$$

і до його кінця у вигляді прямої біжучої хвилі, що має ту ж форму φ

$$p(l, t) = e^{-a(t-t_y)} \varphi [c(t-t_y) + (l-l_y)] \quad (1.4)$$

де a - коефіцієнт загасання хвилі; l - відстань від початку ділянки трубопроводу до точки контролю тиску.

Форма хвиль тиску (рисунок 1.7) може бути попередньо обчислена при вирішенні хвильового рівняння моделі ділянки трубопроводу

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{c^2}{s} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \frac{c^2}{2D} \frac{\partial (\lambda, \rho, \nu^2)}{\partial x} \quad (1.5)$$

де $\rho = \rho(l, t)$ і $\nu = \nu(l, t)$ - розподілу щільності і швидкості руху потоку вздовж трубопроводу, що має діаметр D і коефіцієнт гідравлічного спротиву λ ; $f(l, t)$ - розподілом зовнішнього відбору продукції з ділянки трубопроводу через отвір, що має площу перерізу s .

Знаючи час реєстрації передніх фронтів біжучих хвиль тиску (викликаних різким розвитком витоку) в контрольованих точках на кінцях ділянки трубопроводу, t^H і t^K відповідно, можна обчислити місце освіти витоку з умов, що показують досягнення передніми фронтами біжучих хвиль цих точок контролю:

$$c(t^H - t_y) - l_y = 0 \quad (1.6)$$

$$c(t^K - t_y) - (L - l_y) = 0 \quad (1.7)$$

Перетворюючи ці рівняння і враховуючи усереднене час руху хвилі по ділянці трубопроводу між двома точками контролю тиску 1 і 2 певної довжини l_{12} на початку і / або в кінці ділянки трубопроводу t_{12}^{cp} , відстань до місця освіти витоку можна визначити за формулою

$$l_y = \frac{L}{2} - l_{12} \frac{(t^H - t^K)}{t_{12}^{cp}} \quad (1.8)$$

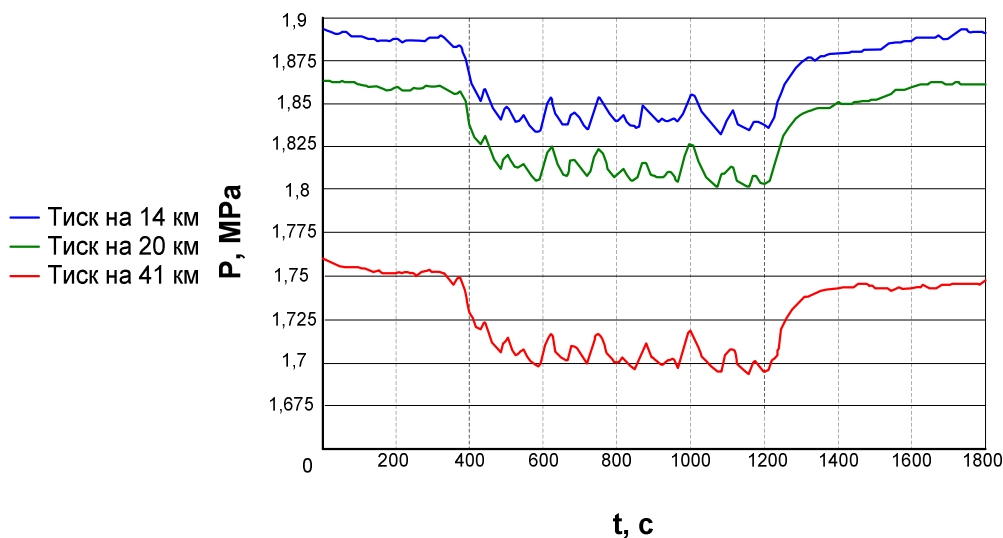


Рисунок 7 – Хвилі тиску в трубопроводі

При відомих значеннях L і l_{12} точність обчислення l_y в залежить як від похибки обчислення співвідношення $\frac{(t^H - t^K)}{t_{12}^2}$, так і від характеристик форми хвилі тиску φ , на основі яких обчислюється час підходу передніх фронтів біжучих хвиль тиску в точки контролю на кінцях ділянки трубопроводу, t^H і t^K відповідно.

Локально форма кривої тиску $p(l, t)$ поряд з контрольованою точкою, що знаходиться на відстані l від початку ділянки трубопроводу, може бути визначена досить точно за допомогою перших членів ряду Тейлора-Маклорена [4]

$$p(l, t) = x_0(t) + x_1(t)l + x_1(t)l^2, \quad (1.9)$$

де параметри ряду $x_0(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ визначаються як диференціальні параметри форми хвилі тиску:

- параметр $x_0(t)$ визначається ковзаючим середнім значенням тиску в точці контролю з усереднюються функцією $\omega_\varepsilon(t)$

$$x_0(t) = \int_{-\infty}^t \omega_\varepsilon(t - \hat{t}) p(l, \hat{t}) d\hat{t}, \quad (1.10)$$

- параметр $x_1(t)$ знаходиться як оцінка похідної

$$x_0(t) = \int_{-\infty}^t \frac{d}{dt} \omega_\varepsilon(t - \hat{t}) p(l, \hat{t}) d\hat{t}, \quad (1.11)$$

- параметр $x_2(t)$ відповідає оцінці другої похідної

$$x_0(t) = \int_{-\infty}^t \frac{d^2}{dt^2} \omega_\varepsilon(t - \hat{t}) p(l, \hat{t}) d\hat{t}. \quad (1.12)$$

Функції інтелектуальної системи визначення біжучої хвилі на всіх

контрольованих точках l ділянки трубопроводу можуть бути забезпечені спеціалізованим аналізатором нейромережевої системи обробки інформації (COI), який розпізнає форми хвилі φ на виділеному інтервалі часу (у виділеному вікні). Для цього аналізатор порівнює поточну траєкторію зміни тиску в просторі коефіцієнтів x_0, x_1, x_2 з траєкторією, характерною для хвилі тиску, викликаній нормальним вимиканням (*off*) і подальшим включенням (*on*) насоса, який здійснює транспортування рідини у ділянці трубопроводу (рисунок 1.8).

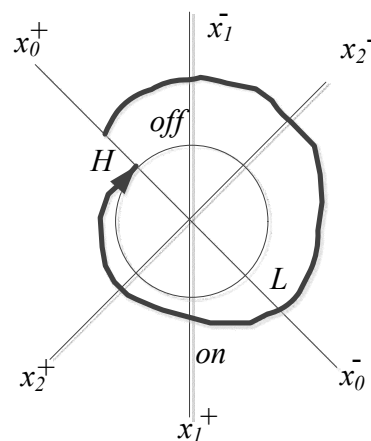


Рисунок 8 – Представлення хвилі тиску в просторі параметрів

Аналізатор реалізує типову схему обробки інформації (рисунок 1.9) і включає в себе блок попереднього аналізу сигналів і блок

подальшого аналізу сигналів і образів, які мають в своєму складі:

- адаптивний фільтр корисних сигналів, який шляхом обробки даних датчиків тиску в кожній контрольованій точці трубопроводу, визначає значення вектора коефіцієнтів хвилі тиску $x=(x_0, x_1, x_2)$ в тимчасовому вікні певної тривалості,

- блок визначення ознак витoku за параметрами вектора коефіцієнтів $x = (x_0, x_1, x_2)$, визначених у окремих контрольованих точках,

- блок короточасної пам'яті дослідчених даних для підготовки масиву виміряних і розрахованих значень тиску (активного способу очікуваного стану трубопроводу),

- блок порівняння параметрів активного способу з збереженими еталонними образами, можливих хвиль тиску і визначення витoku в трубопроводах;

- блок довготривалої пам'яті для зберігання еталонних образів хвиль тиску.

Навчання нейронної мережі цього аналізатора відбувається з урахуванням кореляційних властивостей шумів, на основі зібраних статистичних вимірах про зміну тиску в трубопроводах.

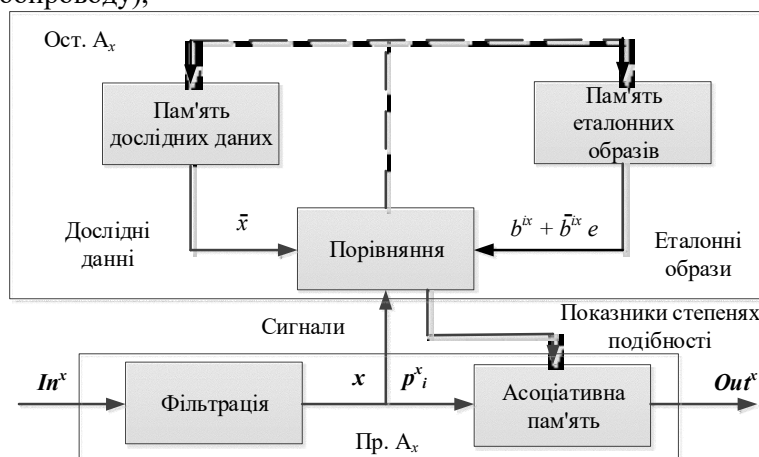


Рисунок 9 – Схема обробки інформації в інтелектуальній нейронмережі

Метаінтеграція нейронних мереж локальних аналізаторів даних реального часу, що характеризують стан окремо обслуговуючих; ділянок інженерної мережі, до яких підключені групи джерел постачання рідких продуктів, здійснюється шляхом управління модулями адаптації цих локальних аналізаторів. При цьому швидкість навчання нейронних мереж локальних аналізаторів регулюється урахуванням показників чистої продуктивності по цих джерелах, які враховують обсяг постачання рідких продуктів, умовні її втрати через наявність неприпустимих дисбалансів потоків у вузлах інженерної мережі і витрати енергії на транспортування.

Недоліки: як видно, описаний метод використовує час приходу передніх фронтів біжучих хвиль тиску, які виникають тільки при

динамічних змінах параметрів транспортування, тобто дуже повільна динаміка зміни тисків по трубопроводу, що ускладнює можливість точного розрахунку і ідентифікації таких подій.

На даний момент не існує універсального єдиного методу, здатного досить точно визначити місце розташування місця зміни і при цьому не вимагає великих витрат на реалізацію і експлуатацію. Кожен з існуючих методів не позбавлений недоліків (таблиця 1.1).

Таким чином, підвищення ефективності автоматизованих систем при моніторингу та керування трубопроводами є актуальною науково-технічною проблемою.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика методів виявлення зміни відхилень від норм технологічного режиму в трубопроводі

Назва методу	Візуальний огляд трубопроводу	Використання внутрішньо-трубних дефектоскопів	Метод по «хвилі тиску»	Параметричні методи
Переваги	Простота реалізації, низька вартість	Виявляє дрібні тріщини в трубопроводі	Простота реалізації, низька вартість	Простота реалізації, низька вартість
Точність методу	~ ± 100 м	~ ± 0,01 м	~ ± 300 м	~ ± 5 км
Економічна складова	Не потрібні витрати на впровадження	Один запуск обходиться близько кілька мільйонів гривень	Не потрібні витрати на впровадження	Не потрібні витрати на впровадження
Примітка	Впроваджено на діючих трубопроводах Відсутність оперативності, визначає тільки видимі витоки	Впроваджено на діючих трубопроводах Відсутність оперативності, дорожняча експлуатації	Впроваджено на діючих трубопроводах Не здатний виявити уповільнені витоки	Впроваджено на діючих трубопроводах Низька точність при визначенні місця розташування витоків

Висновки.

Розроблено автоматизовану систему моніторингу та керування при нестационарних режимах в умовах зашумленості. Метод обробки поточних даних заснований на математичних розрахунках тиску в середині ділянки по відомим значенням тиску в крайніх точках технологічного ділянки, що відрізняється тим, що обчислення виконуються за допомогою попередньо навченої нейронної мережі. Це дозволяє спрогнозувати шуми і зміну тиску в середині ділянки, тим самим підвищити чутливість системи виявлення таких відхилень від норм технологічного режиму при нестационарних процесах і в умовах зашумленості та дасть можливість керувати трубопровідною системою в автоматичному режимі.

Список використаних джерел

1. Семенцов Г.Н. Фаззі-модель для імітаційного моделювання несанкціонованого витікання нафти з нафтопроводу / Г.Н. Семенцов, О.В. Кучмистенко // Академический вестник. – Кривой Рог. – 2004. - № 13. – С. 84-86.
2. Галлямов А.К. Методы диагностирования состояния внутренней поверхности магистральных трубопроводов / Галлямов А. К, Юкин А. Ю., Мастобаев Б. И. – М.: ВНИИОЭНГ, 1983. – 47 с.
3. Sementsov G.N., Chugur I.I. Fuzzy identification of rock layers with anomalous

pressure.// Proceeding of Third Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) – Zittay (Germany)/ - 2003. – P. 570-573.

4. Ковардаков А.В. Построение математической модели малых утечек с учётом реальных свойств объектов магистрального трубопровода / А. В. Ковардаков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, 2011, №1 с. 48-54.

References

1. Sementsov GN Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline / G.N. Sementsov, OV Kuchmistenko // Academic Bulletin. - Krivoy Rog. - 2004. - № 13. - P. 84-86.
2. Gallyamov AK Methods for diagnosing the state of the inner surface of main pipelines / Gallyamov AK, Yukin A. Yu., Mastobaev BI - M.: VNIIOENG, 1983. - 47 p.
3. Sementsov GN, Chugur II Fuzzy identification of rock layers with anomalous pressure.// Proceeding of the Third Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) - Zittay (Germany) / - 2003. - P. 570-573.
4. Kovardakov A.V. Construction of a mathematical model of small leaks taking into account the real properties of the objects of the main pipeline / AV Kovardakov // Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products, 2011, №1 p. 48-54.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 528.332.551.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-88-96

ГЕОМОРФОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОРФОДИНАМІЧНИХ ЗМІН РЕЛЬЄФУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*О. Я. Кравець, Б. С. Незамай, В. І. Михайлів**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ,
вул. Карпатська, 15; e-mail: pta@nung.edu.ua*

Виконано аналіз методів створення геоморфологічних карт на основі цифрової моделі рельєфу. Наведено математичну основу морфометричного аналізу рельєфу. За допомогою пакету програм Surfer розроблено цифрову модель рельєфу верхньої частини басейну ріки Бистриця Солотвинська, а також карти крутизни та експозиції схилів, карти пластики рельєфу, які розділяють позитивні та негативні форми рельєфу, візуалізують гребневі та кільові лінії рельєфу. Для кожної точки моделі за розробленими алгоритмами і програмами визначено мінімальні віддалі до орографічних ліній – вододілів, тальвегів гідрографічної мережі. За цими даними було складено карти довжин схилів, карти віддаленості від гідрографічної мережі, карти довжин стоку. За координатами точок на гребневих лініях побудовано карту вершинної поверхні, а за координатами точок кільових ліній рельєфу – карту ізобазит. За цими картами і картою рельєфу побудовано карти залишкового рельєфу та глибини розчленування рельєфу. За цифровою моделлю рельєфу визначено наступні характеристики басейну ріки, а саме: площу басейну, довжину, середню ширину та ухил басейну, довжину гідрографічної мережі, об'єм гірських порід, що лежить вище базисної поверхні, площі позитивних та негативних форм рельєфу. За запропонованим алгоритмом розроблено програму мовою Object Pascal в середовищі Borland Delphi. За ЦМР визначено характер розподілу висот для частини басейну ріки Бистриця Солотвинська. Обчислено середню висоту, дисперсію, стандарт, коефіцієнти варіації, коефіцієнти ексцесу та асиметрії. Складено графік розподілу висот, який показує, що розподіл близький до нормального. Розроблені карти дозволяють визначати ділянки можливих зсувів, розраховувати ступінь ерозійності схилів, здійснювати моніторинг морфодинамічних змін рельєфу.

Ключові слова: геоморфометрія, зсуви, пластика рельєфу, структурні лінії рельєфу, морфоізографа.

The analysis of methods of creation of geomorphological maps on the basis of digital model of a relief is executed. The mathematical basis of morphometric relief analysis is given. With the help of the Surfer software package, a digital relief model of the upper part of the Bystritsa Solotvynska River basin was developed, as well as maps of slope steepness and exposure, relief plastic maps separating positive and negative landforms, visualizing ridge and keel relief lines. For each point of the model according to the developed algorithms and programs the minimum distances to orographic lines - watersheds, thalwegs of a hydrographic network are defined. According to these data, maps of slope lengths, distance maps from the hydrographic network, and runoff length maps were compiled. A map of the vertex surface is constructed from the coordinates of points on the ridge lines, and an isobasite map is constructed from the coordinates of the points of the keel lines of the relief. Maps of residual relief and depth of relief dissection were built on the basis of these maps and the relief map. The digital relief model determines the following characteristics of the river basin, namely: basin area, length, average width and slope of the basin, length of hydrographic network, volume of rocks above the base surface, area of positive and negative landforms. According to the proposed algorithm, the program was developed in the Object Pascal language in the Borland Delphi environment. The nature of the distribution of heights for the part of the Bystritsa Solotvynska river basin was determined by the DEM. Average height, variance, standard, coefficients of variation, coefficients of excess and asymmetry are calculated. A graph of the distribution of heights, which shows that the distribution is close to normal. The developed maps allow to determine the areas of possible landslides, to calculate the degree of erosion of the slopes, to monitor morphodynamic changes in the terrain.

Key words: geomorphometry, shifts, relief plasticity, structural relief lines, morphoisograph

Вступ

Предметом геоморфології є дослідження елементів рельєфу (схили, улоговини, вододіли), форми рельєфу (гори, долини, сідловини) і групи форм, які створюють природні геоморфологічні комплекси. За геоморфологічними картами досліджуються складові частини рельєфу.

Морфометрія має важливе значення для геоморфології в цілому, дозволяючи вирішувати задачі як походження, так і вік рельєфних форм і їх класифікацію. Морфометричні характеристики використовують в картографії, гідрології та інших прикладних науках. Вони надають числові дані про основні елементи рельєфу.

До морфометричних карт, які характеризують різні показники рельєфу, належать карти інтенсивності розчленування рельєфу, карти глибини розчленування рельєфу, карти крутизни схилів земної поверхні, карти віддаленості від вододілів, карти віддаленості від гідрографічної мережі, карти довжин схилів та інші.

Важливими для морфометричного аналізу території є карти крутизни схилів і карти ухилів гідрографічної мережі. За цими картами визначають райони аномальних ухилів рік. Ці дані використовуються для детального аналізу факторів, які впливають на повздовжній профіль ріки, включаючи такі, як неоднорідність літологічного складу порід, особливості гідрологічного режиму ріки, тектонічний фактор.

Морфологічні карти надають об'єктивну інформацію для вирішення практичних народногосподарських задач в гідрології, сільському господарстві, геології. За даними картами досліджуються ерозійні процеси, проектується гідромеліоративні заходи, вивчаються умови поверхневого стоку, розробляються методи прогнозування і розрахунків дощових паводків. Ці карти дають можливість досліджувати найновіші тектонічні рухи, інтенсивність геоморфологічних процесів, виявляти зсувонебезпечні райони.

В наукових дослідженнях використовують метод морфодинамічного аналізу, який направлений на динамічну інтерпретацію

рельєфу, вивчення рельєфоутворюючих процесів.

Традиційно морфометричні і морфологічні карти складають за топографічними картами складними технологіями, інформація при цьому часто буває суб'єктивною і неточною. Нові можливості в процесі складання морфометричних карт надає цифрова модель рельєфу. Вона описує поле рельєфу та похідні від нього поле ухилів і поле напрямків ухилів математичними методами, які дозволяють кількісно оцінити всі параметри рельєфу з необхідною точністю.

Метою дослідження є вдосконалення методики створення морфологічних і морфометричних карт.

Практична значущість результатів дослідження полягає в тому, що результати досліджень можуть бути використані при створенні морфометричних карт, для аналізу зсувних та ерозійних процесів.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження виконано з використанням пакету програм Surfer і цифрової моделі рельєфу частини басейну ріки Бистриця Солотвинська, що знаходиться в Івано-Франківській області.

Аналіз літературних джерел. Однією з основних задач геоморфології є класифікація і типізація форм рельєфу, встановлення зв'язку з геологічними процесами. Якщо раніше геоморфологія мала переважно описовий характер, то тепер ній частіше використовують математичні методи. Геоморфологічне картографування є універсальним джерелом інформації про рельєф.

Серед геоморфологічних карт найбільше кількісних характеристик надають морфографічні і морфометричні карти. Це карти базисних, вершинних поверхонь, залишкового рельєфу, горизонтального і вертикального розчленування рельєфу. За ними визначають об'єми, обмежені формами поверхонь, площі окремих форм і розміри річкових долин, звивистість і ухили рік, щільність гідрографічних мереж і багато іншого. Проблеми геоморфологічного і морфометричного картографування висвітлюються в працях Девдаріані А. С., Ласточкіна А. Н., Спірідонов А. І. [1-3].

До основних геоморфологічних параметрів належать абсолютна висота топографічної поверхні та градієнти поля висот – перша і друга похідні функції висот, а також кривизна горизонталей. Крім основних геоморфологічних параметрів пропонується визначати комплексну горизонтальну і вертикальну розчленованість рельєфу за величиною дисперсії абсолютних висот, за сумарною довжиною горизонталей, за середніми ухилами, за відношенням площі топографічної поверхні до її горизонтальної проекції.

Важливим в дослідженні рельєфу є метод пластики рельєфу, який полягає у виділенні опуклих та увігнутих форм поверхні шляхом проведення по точках нульової кривизни лінії, яку називають морфоізографою. Морфоізограф є межею між позитивними і негативними, дивергентними і конвергентними формами рельєфу [4].

Карти пластики рельєфу дають можливість визначати інтенсивність ерозійних процесів, виділяти гребневі та кільові лінії рельєфу, визначати місця локалізації можливих зсувних процесів [5-7].

Результати досліджень.

При цифровому моделюванні рельєфу описується функцією поля висот і похідних від неї [8]:

$$z = Z(x, y). \quad (1)$$

Диференціюючи формулу (1) одержимо ухили поверхні z по осях x і y :

$$i_x = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad i_y = \frac{\partial z}{\partial y}. \quad (2)$$

$$K_{II} = \frac{\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 - 2\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2}{\left[\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (6)$$

Лінія, яка проходить по точках з нульовою кривизною, називається нульовою морфоізографою. Вона розмежовує дивергентні та конвергентні форми рельєфу.

Максимальне значення ухилу буде:

$$i_{\max} = \sqrt{i_x^2 + i_y^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}. \quad (3)$$

Напрямок лінії найбільшого схилу визначиться за формулою:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{i_y}{i_x}\right) = \arctg\left(\frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\frac{\partial z}{\partial x}}\right), \quad (4)$$

де α – кут між віссю y і напрямком найбільшого схилу.

Похідні $\frac{\partial z}{\partial x}$ і $\frac{\partial z}{\partial y}$ визначаються в кожній

точці моделі за значеннями z в сусідніх точках.

Наведені вище формули описують первинне поле висот і вторинні поля ухилів і експозицій схилів. Ці аналітичні морфометричні поля рельєфу дозволяють вирішувати багато інженерних задач з високою точністю. Вони надають якісну кількісну інформацію про рельєф при використанні перших похідних вихідного поля висот.

Для більш детального аналізу кривизни топографічної поверхні визначають похідні вищого порядку (оператор Лапласа):

$$\nabla^2 z = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{z_e - 2z + z_w}{\Delta x^2} + \frac{z_n - 2z + z_s}{\Delta y^2}. \quad (5)$$

Планова кривизна K_{II} , яка характеризує міру зміни експозиції схилу, визначається за формулою:

Профільна кривизна K_H , яка характеризує міру зміни крутизни схилу визначається так:

$$K_H = \frac{\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) \cdot \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}{\left[\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (7)$$

Карти профільної кривизни визначають напрям схилу з найбільшою крутістю та швидкістю стікання водного потоку. Ці карти також розділяють дивергентні та конвергентні форми рельєфу.

За цифровою моделлю рельєфу складено карти крутизни схилів, планової та профільної кривизни з орографічними лініями рельєфу. Результати моделювання наведено на рисунках (1-3).

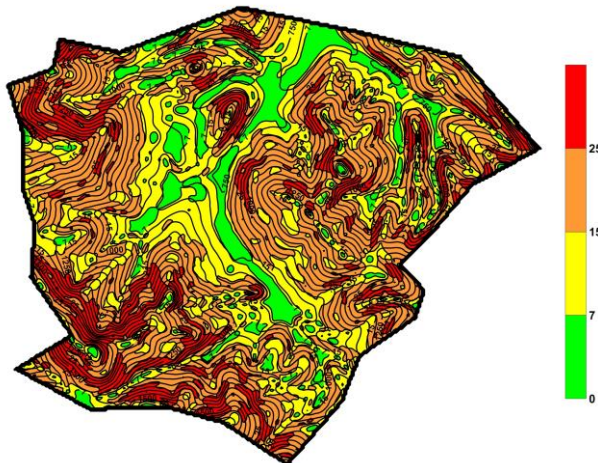


Рисунок 1 - Карта крутизни схилів

Планова кривизна є мірою кривизни ізоліній горизонталей на карті. Негативні значення градієнтів характеризують розбіжність потоку води на поверхні, а позитивні – збіжність потоку. Лінія, яка проведена по точках, в яких градієнти дорівнюють нулю, і буде нульовою морфоізографою.

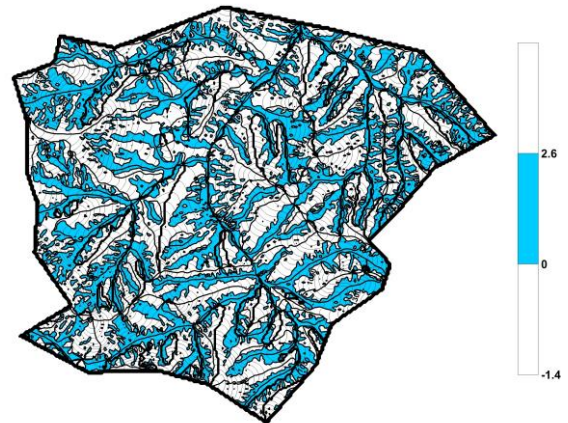


Рисунок 2 - Карта планової кривизни

Профільна кривизна визначає швидкість зміни нахилу в напрямку градієнта в кожному вузлі сітки. Карти профільної кривизни автоматично визначають напрям схилу, а також швидкість зміни нахилу вздовж цього напрямку.

На картах планової і профільної кривизни блакитним і рожевим кольором відповідно показано конвергентні потоки. На шкалах наведено відповідні градієнти.

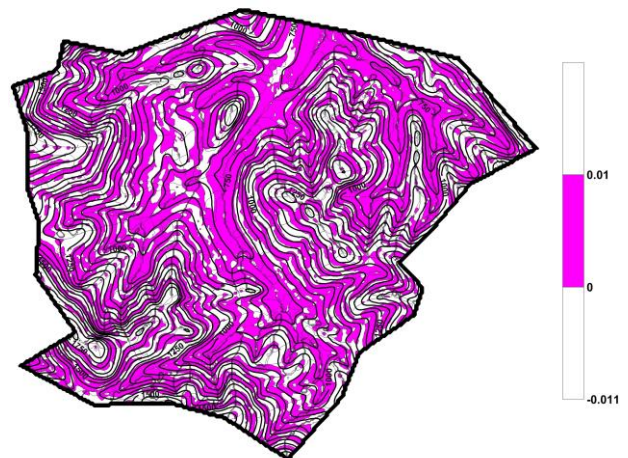


Рисунок 3 - Карта профільної кривизни

Морфометричні і морфографічні карти зображають рельєф за певними ознаками. При створенні таких карт визначають щільність розчленування рельєфу, глибину розчленування, віддалі до орографічних ліній [9].

За ЦМР розроблено алгоритм побудови морфометричних і морфографічних карт, який полягає в наступному:

- за ЦМР створюють карту експозиції схилів, яка візуалізує структурні лінії рельєфу;

- визначають координати точок на структурних лініях і формують масиви координат точок на лініях позитивних і негативних форм рельєфу, тобто вододільних лініях X_B, Y_B, Z_B і лініях гідрографічної мережі, включаючи сухі водостоки X_G, Y_G, Z_G (кільових лініях);

- для кожної точки ґрид-моделі з координатами X, Y, Z обчислюють віддалі до всіх точок на структурних лініях за формулами:

$$L_B = \sqrt{(X - X_B)^2 + (Y - Y_B)^2 + (Z - Z_B)^2}, \quad (8)$$

$$L_G = \sqrt{(X - X_G)^2 + (Y - Y_G)^2 + (Z - Z_G)^2};$$

- вибирають найменші віддалі до вододілів L_{Bmin} і до гідрографічної мережі L_{Gmin} , визначають суму цих віддалей

$$L_{min} = L_{Bmin} + L_{Gmin};$$

- формують масиви мінімальних віддалей і їх сум;

- за значеннями мінімальних віддалей L_{Bmin} створюють карти довжин стоку або віддалей до вододілів;

- за значеннями L_{Gmin} - карти віддалей до гідрографічної мережі;

- за значеннями L_{min} - карти довжин схилів;

- за координатами точок на вододільних лініях X_B, Y_B, Z_B створюють карти вершинного рельєфу, а за координатами точок на структурних лініях негативних форм рельєфу X_G, Y_G, Z_G - карти ізобазит, які відповідно до класифікації Хортоні можуть бути різних порядків;

- за різницями висот карт вершинного рельєфу та топографічної поверхні $H_B - H$ створюють карту глибини розчленування рельєфу, а за різницями висот топографічної поверхні та базисних поверхонь $H - H_G$ створюють карти залишкового рельєфу, при

цьому визначають об'єм гірських порід, що лежать вище базисних поверхонь; аналогічно створюють карти різниць вершинних і базисних поверхонь різних порядків;

- для кожної точки гідрографічної мережі за координатами сусідніх точок визначають ухили i , за якими створюють карти ухилів гідрографічної мережі.

Морфометричні карти створюють в межах басейнів рік або річкових систем.

За запропонованим алгоритмом розроблено програму мовою Object Pascal в середовищі Borland Delphi і створено карти частини басейну ріки Бистриця Солотвинська.

Результати моделювання наведено на рисунках (4-10) [10].

Карта віддаленості від вододілів, яку наведено на рисунку 4, створено за значеннями мінімальних віддалей точок ґрид-моделі від точок, розміщених на вододільних лініях. Ізолінії віддалей до вододілів є ізолініями довжин стоку - величин, які використовують в формулах розрахунків ерозійних процесів.

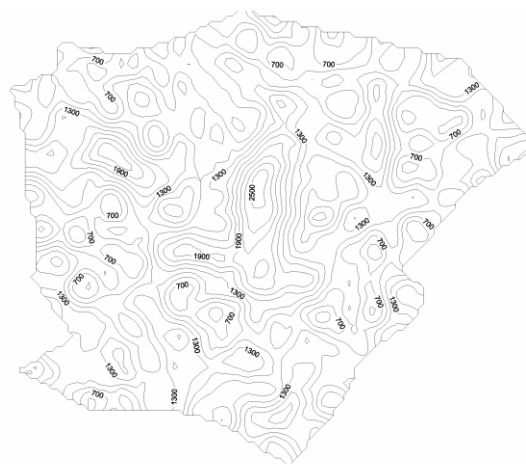


Рисунок 4 – Карта віддаленості від вододілів

Аналогічно створено карту рівних віддалей до гідрографічної мережі, яку показано на рисунку 5. Ізолінії віддалей до водостоків використовують при розрахунках повеневих і паводкових стоків.

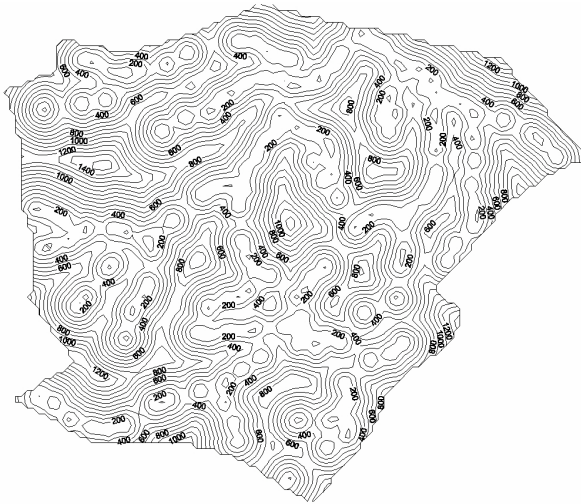


Рисунок 5 – Карта віддаленості від гідрографічної мережі

Важливою для морфометричного аналізу рельєфу є карта довжин схилів, яку подано на рисунку 6.

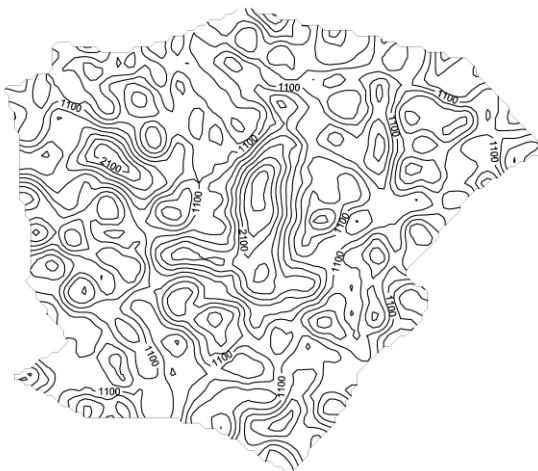


Рисунок 6 – Карта довжин схилів

На рисунку 7 наведено карту вершинного рельєфу, яку побудовано за висотами точок вододільних ліній.

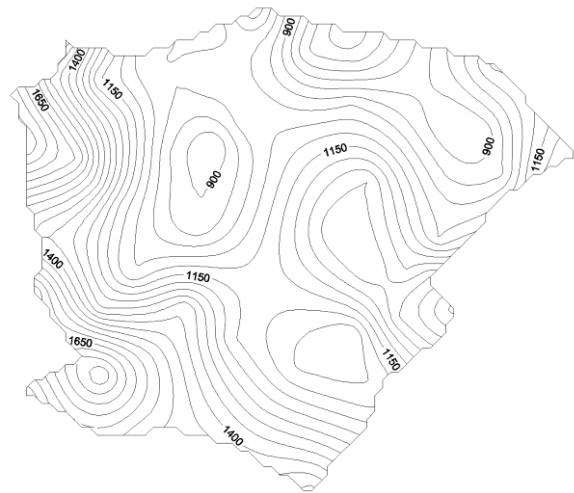


Рисунок 7 – Карта вершинного рельєфу

Аналогічно побудовано карту ізобазит, яку наведено на рисунку 8. При її створенні використовувались координати точок гідрографічної мережі.

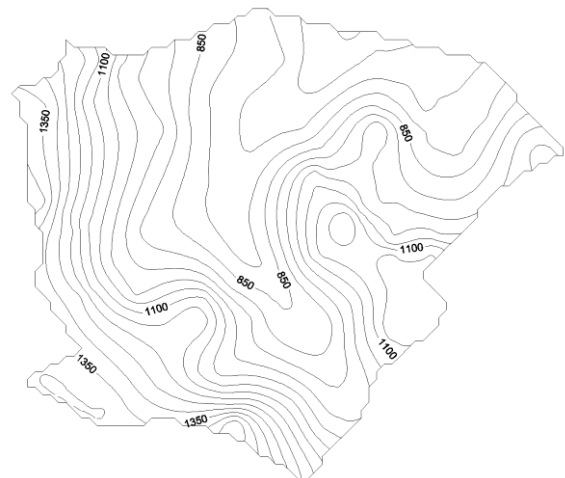


Рисунок 8 – Карта ізобазит

За різницями висот топографічної і базисної поверхонь створено карту залишкового рельєфу, яку показано на рисунку 9.

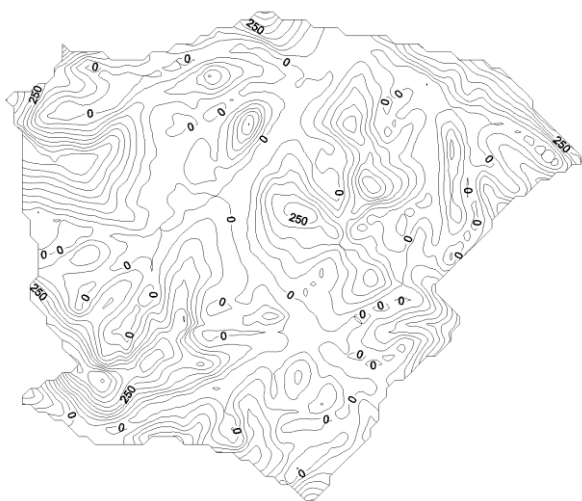


Рисунок 9 – Карта залишкового рельєфу

Карта глибини розчленування рельєфу, яку подано на рисунку 10, побудовано за різницями висот точок вершинного рельєфу і топографічної поверхні.



Рисунок 10 – Карта глибини розчленування рельєфу

Крім наведених карт для частини басейну ріки Бистриця Солотвинська за ЦМР було визначено наступні морфометричні характеристики:

- площа басейну $F = 113,7 \text{ км}^2$;
- площа опуклих форм рельєфу $F_O = 65,2 \text{ км}^2$;
- площа увігнутих форм рельєфу $F_V = 48,5 \text{ км}^2$;
- довжина басейну $L = 17,2 \text{ км}$;

- середня ширина басейну $B = \frac{F}{L} = 6,5$

км;

- середній ухил басейну $\nu = 19,5^\circ$;
- довжина гідрографічної мережі $l = 34,4 \text{ км}$;
- коефіцієнт щільності гідрографічної мережі

$$d = \frac{\sum l}{F} = 0,31;$$

- об'єм гірських порід, що лежать вище базисної поверхні $V = 10,6 \cdot 10^9 \text{ м}^3$;
- середній ухил басейну, визначений за відношенням площі реальної топографічної поверхні до площі горизонтальної проекції $\nu = 20,3^\circ$.

Для детальної характеристики рельєфу важливо крім середніх, максимальних і мінімальних висот знати функцію розподілу висот.

За ЦМР визначено характер розподілу висот для частини басейну ріки Бистриця Солотвинська. Обчислені середня висота H_C , дисперсія S^2 , стандарт, коефіцієнти варіації $V = \frac{S}{H_C}$, коефіцієнти ексцесу E і асиметрії A .

Деякі з цих даних наведено в таблиці 1.

На рисунку 11 наведено графік розподілу висот. Суцільною лінією показано розподіл висот вихідних точок, а пунктиром – розподіл висот точок ґрид-моделі.

Таблиця 1 – Розподіл висот

	Грид	Вих.
Кількість точок, тис	8,5	22
Hmin	555	560
Hmax	1820	1818
Hmax-Hmin	1264	1258
Hсер	1022	1064
Медіана	981	1040
σ_H	261	249
Δ_H	214	205
Коеф. варіації	0,25	0,23
Асиметрія	0,56	0,48
Ексцес	-0,28	-0,35

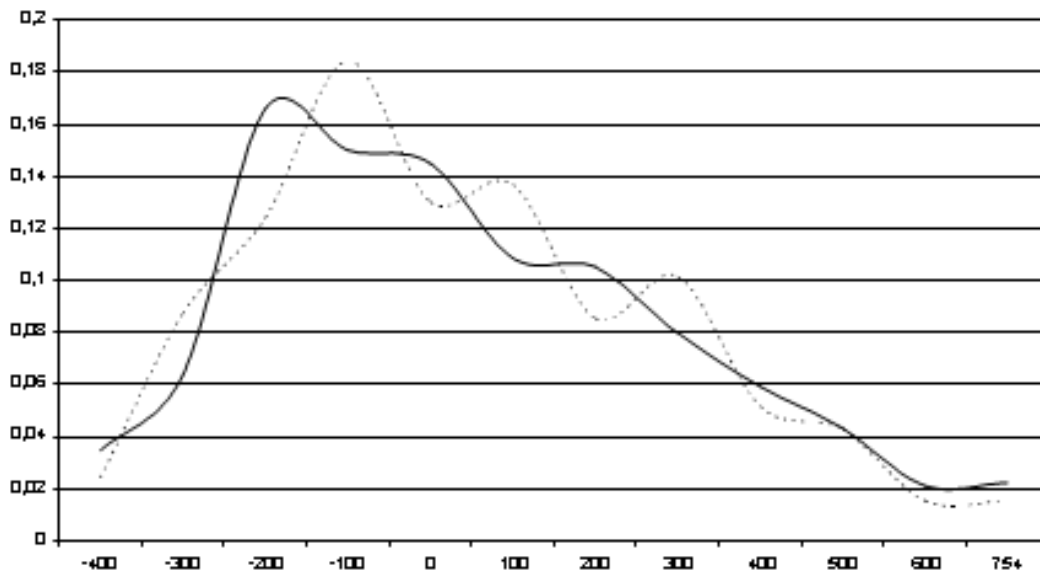


Рисунок 11 – Розподіл висот

Результати досліджень підтверджують, що закон розподілу висот в основному близький до нормального (за критерієм асиметрії та ексцесу).

Висновки. Запропонований метод створення морфометричних карт надає об'єктивну кількісну інформацію про рельєф і дозволяє виконати його класифікацію. Розроблені карти можуть бути джерелом більш повних даних про геоморфологічні умови зсувонебезпечних районів та місць можливого поширення ерозійних процесів. Виконані дослідження показують, що цифрова модель рельєфу може бути основою для створення моделі водно-ерозійних та зсувних процесів.

Застосування геоінформаційних технологій для створення таких моделей дозволяє підвищити точність та оперативність одержання даних про геодинамічні явища та їх аналізу, що дозволить вчасно прогнозувати, виявляти та реагувати на розвиток цих негативних процесів.

Список використаних джерел

1. Девдариани А.С. Математический анализ в геоморфологии. – М.: Недра, 1967. – 155 с.

2. Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности (принципы и методы статистической геоморфологии). – Л.: Недра, 1991. – 340 с.

3. Спиридонов А.И. Геоморфологическое картографирование. – М.: Недра, 1975. – 182 с.

4. Степанов И. Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты / И. Н. Степанов. – М.: Наука, 2005. – 230 с.

5. Пазинич Н. В. Морфодинамічний аналіз рельєфу в межах міських агломерацій (на прикладі правобережної частини м. Києва. У науково-практична конференція «Моніторинг навколишнього середовища. Науково-методичне, нормативне, технічне, програмне забезпечення». (м. Коктебель. 20-24 вересня, 2010 р.). АР Крим, Коктебель, 2010. С. 65–68.

6. Волошин В. Математично-картографічне забезпечення моніторингових дослідження ерозійнонебезпечних земель із застосуванням методу оцінювання пластики рельєфу. [Електронний ресурс] / В. Волошин, П. Король, О. Рудик // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК, Західне геодезичне товариство Українського товариства геодезії і картографії, Національний університет «Львівська політехніка», – Л.:

Видавництво Львівської політехніки, 2013. – Випуск 1 (25). – С. 96–99. – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua/handle/ntb/18863>.

7. Дмитрук Ю. М. Картографічне моделювання ґрунтового покриву та ерозійних процесів методом пластики рельєфу [Текст] / Ю. М. Дмитрук, О. В. Стужук // Геополітика і екогеодинаміка регіонів. – 2014. – Т. 10. – Вип. 1. – С. 41–43.

8. Кравець О.Я., Кравець Я.С., Ребега О.І. Дослідження морфометричних характеристик рельєфу на основі ЦМР.// Наукові вісті інституту менеджменту та економіки „Галицька академія”. Технічні науки. Вип. 18/2. Івано-Франківськ, 2011. – С. 15-18.

9. Кравець О. Я. Вплив рельєфу земної поверхні на гідрологічні та ерозійні процеси в Прикарпатті: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спец. 05.24.02 „Фотограмметрія і картографія” / О. Я. Кравець. — Львів, 2006. — 19 с.

10. Кравець О.Я., Рудий Р.М., Кравець Я.С. Визначення морфометричних характеристик рельєфу для класифікації сільськогосподарських угідь.// Збірник наукових праць „Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва” НУ „Львівська політехніка”, Львів, 2005. – С. 362-366.

References

1. Devdaryany A.S. Matematycheskyi analiz v heomorfolohyy. – M.: Nedra, 1967. – 155 s.

2. Lastochkyn A.N. Relief zemnoi poverkhnosti (pryntsyup y metodi statystycheskoi heomorfolohyy).– L.: Nedra, 1991. – 340 s.

3. Spyrydonov A.Y. Heomorfolohycheskoe kartohrafirovanye. – M.: Nedra, 1975. – 182 s.

4. Stepanov Y. N. Teoryia plastyky reliefa y novye tematycheskye karty / Y. N.Stepanov. – M. : Nauka, 2005. –230 s.

5. Pazynych N. V. Morfodynamichniy analiz reliefu v mezhakh miskykh ahlomeratsii (na prykladi pravoberezhnoi chastyny m. Kyieva. V naukovu-praktychna konferentsiia «Monitorynh navkolyshnoho seredovyshcha. Naukovometodychne, normatyvne, tekhnichne, prohramne zabezpechennia». (m. Koktebel. 20-24 veresnia, 2010 r.). AR Krym, Koktebel, 2010. S. 65–68.

6. Voloshyn V. Matematychno-kartohrafichne zabezpechennia monitorynhovykh doslidzhennia eroziinonebezpechnykh zemel iz zastosuvanniam metodu otsiniuvannia plastyky reliefu. [Elektronnyi resurs] / V. Voloshyn, P. Korol, O. Rudyk // Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva: zbirnyk naukovykh prats Zakhidnoho heodezychnoho tovarystva UTHK, Zakhidne heodezychne tovarystvo Ukrainskoho tovarystva heodezii i kartohrafi, Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnik», – L.: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2013. – Vypusk 1 (25). – S. 96–99. – Rezhyim dostupu: <http://ena.lp.edu.ua/handle/ntb/18863>.

7. Dmytruk Yu. M. Kartohrafichne modeliuvannia gruntovoho pokryvu ta eroziinykh protsesiv metodom plastyky reliefu [Tekst] / Yu. M. Dmytruk, O. V. Stuzhuk // Heopolityka y ekoheodynamika rehioniv. – 2014. – Т. 10. – Vyp. 1. – С. 41–43.

8. Kravets O.Ia., Kravets Ya.S., Rebeha O.I. Doslidzhennia morfometrychnykh kharakterystyk reliefu na osnovi TsMR.// Naukovi visti” instytutu menedzhmentu ta ekonomiky „Halytska akademiia”. Tekhnichni nauky. Vyp. 18/2. Ivano-Frankivsk, 2011.

9. Kravets O. Ya. Vplyv reliefu zemnoi poverkhnii na hidrolohichni ta eroziini protsesy v Prykarpatti: avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk: spets. 05.24.02 „Fotogrammetriia i kartohrafiia” / O. Ya. Kravets. — Lviv, 2006. — 19 s.

10. Kravets O.Ia., Rudyi R.M., Kravets Ya.S. Vyznachennia morfometrychnykh kharakterystyk reliefu dlia klasyfikatsii silskohospodarskykh uhid.// Zbirnyk naukovykh prats „Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva” NU „Lvivska politekhnik”, Lviv, 2005. – С. 362-366.

УДК 504.064

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-97-102

ДІАГНОСТИКА ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ СЛУЖБ

М.В. Крихівський, В.І. Михайлів, Л.В. Саманів*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019 м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, mykhailo.krykhivskiy@nung.edu.ua*

Промислове виробництво, військові дії, життєдіяльність населення та тварин спричиняють суттєвий вплив на навколишнє середовище. Відбуваються зміни екосистем, які часто несуть небезпеку для людей, і можуть бути незворотними. Для сталого розвитку необхідне розумне коригування політики в системі екологічної безпеки. Тому екологічні служби мають застосовувати комп'ютерні технології, інформаційне моделювання, інтелектуальні інформаційні системи з елементами штучного інтелекту.

Об'єктивне розуміння ситуації та процесів в екосистемах передбачає великі обсяги інформації, різноманітність інформаційних і математичних моделей, міждержавні договори та законодавство. Сьогодні екологічні служби переважно зайняті обліком викидів в атмосферу. Важливим представляється аналіз, прогнозування та розумні впливи на процеси в екосистемах в контексті антропогенної діяльності. Різні сприйняття цієї проблеми призводять до різних підходів, які призводять до різних результатів.

Наукові дослідження в галузі екологічної безпеки для екологічних служб головно зосереджені на вивченні та документуванні забрудненості навколишнього середовища, викидах промислового та побутового характеру. Менше уваги приділяється змінам, що зазнають екосистеми, а ще менше – інформаційному моделюванню для забезпечення діяльності адміністративних органів з метою впливу на суспільство для покращення стану довкілля. Тому інформаційне та математичне моделювання, прогнозування змін екосистем є актуальним.

Дослідження направлене на розвиток методів діагностування інформаційного забезпечення, розроблення інструментів об'єктивізації служб екологічного контролю у контексті концепції інформаційного моделювання та прогнозування. Запропоновано математичні моделі для покращення інформаційного забезпечення діяльності в розрізі розумних змін існуючих ситуацій екологічних і соціальних систем.

Рекомендується використовувати інформаційні моделі в діяльності екологічних служб з використанням обчислювальної техніки як з метою професійної роботи, так і з метою діагностики стану. Як комплексний підхід запропоновано враховувати користь і ризики, що поєднує майбутні здобутки та можливі втрати від прийняття управлінського рішення. Дослідження базується на формалізації нечіткості, неточності, невизначеності стану та процесів екологічних і соціальних системах.

Процес прийняття рішення базується на нормуванні користі та ризиків за заданими альтернативами. Ці альтернативи враховують як загальноприйняті правила, міжнародні угоди та закони із законодавчими актами, так і закони природи. Це дає змогу врахувати багатогранність інформації екологічних служб та покращити ефективність їх діяльності для сталого розвитку і дозволить використовувати обчислювальну техніку для оброблення інформації, об'єктивності.

Математична модель може бути використана для створення інформаційної системи екологічних служб. Для її реалізації вистачить комп'ютера з посередніми обчислювальними можливостями для загального користування.

Ключові слова: діагностика інформаційного забезпечення; прийняття рішення екологічними службами, нечіткий стан екосистеми, нечіткий екологічний процес, інформаційна модель екологічної безпеки.

Industrial production, military operations, the vital activity of the population and animals have a significant impact on the environment. Ecosystem changes are occurring that often pose a danger to humans and may be irreversible. For sustainable development, a reasonable adjustment of policy in the system of environmental security is necessary. Therefore, environmental services should use computer technology, information modeling, intelligent information systems with elements of artificial intelligence.

An objective understanding of the situation and processes in ecosystems involves large amounts of information, a variety of information and mathematical models, interstate agreements and legislation. Today, environmental

services are mainly engaged in accounting for emissions into the atmosphere. It is important to analyze, predict and reasonably influence the processes in ecosystems in the context of anthropogenic activities. Different perceptions of this problem lead to different approaches leading to different results.

Scientific research in the field of environmental safety for environmental services is mainly focused on the study and documentation of environmental pollution, industrial and domestic emissions. Less attention is paid to the changes undergoing ecosystems, and even less attention is paid to information modeling to support the activities of administrative bodies with the aim of influencing society to improve the state of the environment. Therefore, information and mathematical modeling, forecasting changes in ecosystems is relevant.

The study is aimed at developing methods for diagnosing information support, developing tools for objectifying environmental control services in the context of the concept of information modeling and forecasting. Mathematical models are proposed to improve the information support of activities in the context of reasonable changes in the existing situations of ecological and social systems.

It is recommended to use information models in the activities of environmental services for the use of computer technology both for professional work and for diagnosing the condition. As an integrated approach, it is proposed to take into account the benefits and risks that combine future achievements and possible losses from making a management decision. The study is based on the formalization of fuzziness, inaccuracy, uncertainty of the state and processes in ecological and social systems.

The decision-making process is based on the normalization of benefits and risks for given alternatives. These alternatives take into account both accepted rules, international agreements and laws with legislative acts, as well as the laws of nature. This makes it possible to take into account the versatility of information from environmental services and improve the efficiency of their activities for sustainable development and will allow the use of computers for information processing, objectivity.

The mathematical model can be used to create an information system for environmental services. To implement it, a computer with mediocre computing capabilities for general use is enough.

Key words: diagnostics of information support; decision-making by environmental services, fuzzy state of the ecosystem, fuzzy ecological process, information model of ecological safety.

Вступ

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів здійснює керівництво службами екологічної безпеки на територіях та в населених пунктах України. Пріоритетами його діяльності є [1]:

- запобігання та контроль промислового забруднення;
- управління відходами;
- зміна клімату;
- лісове господарство;
- біорізноманіття та охорона земельних ресурсів;
- природоохоронні території;
- прісноводні ресурси та морські території;
- рибне господарство;
- надра;
- ядерна безпека та зона відчуження;
- моніторинг довкілля;
- цифрова трансформація;
- публічна адміністративна реформа.

Міністерство є головним органом у системі центральних органів виконавчої влади, відповідальним за формування та реалізацію державної політики у сфері охорони

навколишнього природного середовища, навколишнього середовища та біологічної, генетичної та радіаційної безпеки в межах своєї компетенції.

Контроль екологічного стану України здійснює Державна екологічна інспекція, до складу якої входять підрозділи, які відповідальні за екологічний та радіаційний контроль митної території України, екологічний контроль повітряних, водних і земельних ресурсів, поводження з відходами та небезпечними хімічними речовинами, фонди заповідників, флору та фауну, екологічне управління, аналіз, планування інспекційної діяльності та зв'язків з громадськістю, контрольно вимірювальний лабораторний контроль.

Основні показники якості довкілля визначаються стандартами та можуть бути розділені на три категорії:

- санітарія та гігієна (гранично допустимі концентрації небезпечних речовин – хімічні, біологічні, фізичні впливи). Вони акумулюють впливи на здоров'я людини;
- екологічні стандарти (норми викидів, норми скидів небезпечних речовин), які

визначають вимоги до джерел забруднення чи шкідливого впливу, а також технічні, будівельні та містобудівні правила, що містять вимоги щодо охорони навколишнього середовища;

– допоміжні.

Крім стандартів якості довкілля, існує норматив максимально допустимого екологічного навантаження – величина техногенного впливу на природні ресурси або природні комплекси, що не призводить до руйнування функцій навколишнього середовища.

Найефективнішим способом підвищення рівня екологічної безпеки є управління нею, тобто підвищення екологічної безпеки у встановленому масштабі та за встановлених умов. Проте зрозуміло, що для планування, контролю та сприяння покращенню екологічної безпеки (управління цим збільшенням), перш за все необхідно створити доцільне інформаційне забезпечення екологічних служб. Для цього має бути доступна повна і достовірна інформація про умови навколишнього середовища в кількісному вигляді, який найбільш зручно використовувати в сучасних системах прийняття рішень.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Про діагностику інформаційних моделей екологічної безпеки й екології в цілому можна прочитати здебільшого в розрізі політики або економіки. З точки зору техніки, а ще більш обчислювальної техніки, дослідження цього виміру забезпечення життєвих норм ще далекі від досконалості. Тому нам представляється важливим проблеми інформаційного забезпечення служб, що займаються екологічними проблемами.

Інформаційне забезпечення екологічних служб використовується для отримання достовірної інформації про фактичний стан компонентів екосистеми, процеси, що відбуваються на ньому, необхідні втручання для антропогенних процесів, кількісні та якісні характеристики навколишнього середовища [2]. Проте, інформація про екологічний стан є багаторівневою. На рівні підприємства джерелами інформації є засоби екологічного контролю підприємства, система моніторингу навколишнього середовища, комплекс

нормативно правових документів щодо лімітів забруднення: статистичні звіти, квартальні звіти; дозволи на водокористування; дозволи на землекористування; сертифікати та дозволи на виробничу діяльність; документи про допустимість шкідливих речовин у техногенних забрудненнях; екологічні паспорти промислових підприємств [3].

Контроль за виконанням вимог для сталого розвитку та забезпечення ефективного виконання комплексних екологічних заходів вимагає від різних екологічних служб уточнення операційної взаємодії та ефективності діагностики, оброблення відповідної інформації [4]. Глибоке розуміння тем і методів екологічної діагностики дозволяє розробити основні характеристики різних етапів діагностичної роботи [5]:

- проведення досліджень та попереднє оцінювання досягнутого рівня діагностики;
- вимірювання взаємозв'язків між показниками і факторами та на цій основі виявлення можливості зміни стану екосистем;
- остаточна діагностика розрахунків резервів ефективності відповідно до екологічної доцільності.

До екологічної технічної діагностики в автоматизованих умовах висуваються такі вимоги: системність, комплексність, ефективність, точність, прогресивність, динамічність. Аналітичний процес за допомогою комп'ютера можна описати в такому порядку: постановка проблеми та її формальний опис; накопичення інформації; оброблення даних; аналіз; використання отриманої інформації [6].

Формальний опис задачі діагностики базується на єдиному принципі побудови специфікації умови забезпечення необхідних умов [7]. Це полегшує подальшу алгоритмізацію та програмування; чітко визначає фактичну потребу в аналізі вхідних даних; усуває повторюваність завдання діагностики та полегшує групування їх у блоки для одночасного оброблення.

Діагностичні задачі екології у формальній формі є об'єктом математичного моделювання. Постановка проблеми та її формальний опис дають змогу визначити вихідні дані для відбору та аналізу інформаційної бази [8].

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

Сучасний розвиток інформаційного забезпечення діячів діагностики екологічного стану довкілля не відповідає необхідним потребам, а прийняття управлінських рішень є ускладненим. У практику екологічного менеджменту впроваджуються лише окремі елементи інформаційного моделювання, які сприяють автоматизації процесу прийняття рішень, але не враховують цілісність. Відсутність спеціалізованих інформаційно пошукових, експертних та інформаційно обчислювальних систем не дозволяє інтелектуалізувати процес управління з метою оптимізації.

Діагностика екосистеми часто передбачає оцінку змін, особливо незворотних. Питання цього діагнозу є актуальним, оскільки належне функціонування підприємств і міст стає все більш важливим у зв'язку з посиленням антропогенного впливу на навколишнє середовище.

Тому важливим є розроблення інформаційних систем та окремих їх компонентів, які математично діагностують інформаційний рівень моделювання екології. Особливо це стосується процедур з інтелектуальними технологіями.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є розроблення нових математичних підходів з визначення оптимальної моделі діагностики рівня інформаційного забезпечення екологічних служб для прийняття ними оптимальних управлінських рішень. У ході теоретичного аналізу інформації щодо досягнення мети поставлені та розв'язані такі задачі:

- розроблення теоретичних основ математичного моделювання інтелектуальних частин інформаційних систем для формування комплексної екологічної діагностики навколишнього середовища;
- формування інтелектуальної системи діагностики з урахуванням специфіки функціонування інформаційних систем екологічних служб.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Важливими в роботі працівників екологічних служб є принципи побудови інформаційних систем з «ручним», механізованим або автоматизованим оброблення інформації. Ступінь автоматизації може бути найрізноманітнішим: всі розрахунки виконуються «вручну», окремі види робіт автоматизуються за допомогою автономного робочого місця (АРМ) експертів, АРМ фахівців інтегровані в локальну мережу; існує автоматична система управління (АСУ), яка об'єднує всі локальні мережі експертних робочих місць у єдиний інформаційний простір; діюча інформаційна система, що об'єднує всі інші інформаційні системи в єдиний інформаційний простір.

Коли наявна обчислювальна техніка та засоби зв'язку утворюють єдину комп'ютерну мережу для програмного забезпечення аналізу, найбільш ефективно використовувати в роботі аналітика АРМ. У цьому випадку фахівці можуть використовувати спеціальне програмне забезпечення для автоматизації аналітичних розрахунків та прийняття рішень.

Для інтелектуалізації розрахунків пропонується інформаційна аналітична система, яка може бути використана екологічними службами. Основна частина цієї системи використовує семантичну мережу, яка є орієнтованим зваженим графом з розміченими вершинами та ребрами. Вершини позначають об'єкти (сутності) екосистеми або їх деякий стан, а ребра – взаємозв'язки з вагами. На множинному рівні граф \tilde{G} визначений впорядкованою парою (кортежем) множин $\tilde{G} = (\tilde{V}, \tilde{D})$, де \tilde{V} – множина вершин, а \tilde{D} – множина впорядкованих пар (d_{ij}, m) , відповідно, d_{ij} – дуга, а m – вага. Скінченний орієнтований зважений граф \tilde{G} для реалізації математичних операцій за допомогою комп'ютера описано матрицею суміжності \tilde{S} і вектором ваг D .

Деякі об'єкти (стани об'єктів) екосистеми або деякі відношення можуть бути нечіткими або не визначеними, тому граф \tilde{G} є нечітким (розпливчастим). Множини \tilde{V} – нечітка множина, елементи якої визначені парою, (v, μ_v) , де v – елемент множини \tilde{V} , μ_v – значення функції належності цього елемента до множини \tilde{V} . Рядки та стовпці матриці суміжності \tilde{S} визначені

парою (v, μ_{vi}) , де i – номер рядка чи стовпця, а μ_{vi} – значення функції належності до множини \check{V} вершини з номером i . Значення функції μ_{vi} для всіх i обмежені відрізком $[0,1]$. Значення елементів матриці \check{S} , які є значеннями функції належності μ_A , також обмежені відрізком $[0,1]$, а значення елементів вектору D обмежені відрізком $[-1,1]$.

У випадку, коли потужність множини всіх станів екосистеми S обмежена, існує натуральне число $n \in \mathbb{N}$, для якого $|\check{S}| < n$. Якщо для \check{S} не існує такого числа $n \in \mathbb{N}$, що $|\check{S}| < n$ і $|\check{S}| = |\mathbb{N}|$, то \check{S} є зліченною, тому її елементи можна пронумерувати, тобто задати номери станам реальної системи, яка моделюється.

Інтелектуальний модуль інформаційної системи має враховувати всі можливі альтернативи. Елементи множини B фактично є виборами із альтернатив. Корисності альтернатив кожного стану реальних екосистем, які можна описати множинами, визначаються послідовностями:

- $[k_i]_1^m$ для кількості альтернатив, меншої від $m + 1$;
- $[k_i]_1^n$ для зліченної кількості альтернатив.

Об'єднання всіх альтернатив у множину A є множиною альтернатив прийняття рішення. Для зчисленної множини альтернатив корисності станів кожної альтернативи в реальних екосистемах можна задати послідовностями:

- $[k_j]_1^n$ для кількості альтернатив, меншої від $n + 1$;
- $[k_j]_1^\infty$ для необмеженої кількості альтернатив.

Прийняття рішення полягає у знаходженні номера найкориснішої альтернативи. У формальному описі проблеми задані множини виборів A й альтернатив B . Потужність множини виборів $|A| = n$, а потужність множини альтернатив $|B| = m$. Корисність кожної альтернативи задана дійсною послідовністю $[q_i]_1^n$.

Розв'язком задачі прийняття рішення є альтернатива із B . Задавши корисності матрицею кожній альтернативі буде відповідати номер рядка. Прийняття рішення визначається номером рядка, тобто натуральним числом, яке менше або рівне $m \in \mathbb{N}$.

При відображенні множини альтернатив у множину дійсних чисел кожна альтернатива буде мати число, яке є нормою прийняття

рішення. Норма корисності альтернатив ставить у відповідність кожній альтернативі число з відрізка $[0;1]$.

У випадку нескінченної кількості альтернатив модуль корисності можна визначити як $\|k\| = (k, k)^{1/2}$, де (k, k) – скалярний добуток, для якого справедливі властивості скалярного добутку евклідового простору. Для скінченної послідовності модуль $\|[k_j]_1^n\|$ визначається через скалярний добуток так: $\|[k_j]_1^n\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n k_j^2}$. Норма модуля корисності $\|[k_j]_1^n\|$ альтернативи m -кількості альтернатив є значення модуля n -вимірного простору, розділене на максимальне значення із цих модулів $\|a_i\| = \|[k_j]_1^n\| = [k_j]_1^n / \max_i [k_j]_1^n$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Важливо врахувати ризики прийняття рішення, тому пропонується норма ризиків. Для цього необхідно знайти сумарне значення ризику альтернатив за допомогою формули: $ra_i = \sum_{j=1}^n r_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, m$ де r_{ij} – ризики, які визначаються формулою $\|r_{ij}\| = \|\max_i k_{ij} - k_{ij}\|$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$. Норма ризику $\|ra_i\|$ ($i = 1, 2, \dots, m$) альтернативи є фактично її сумарним ризиком, розділеним на максимальне значення із сумарних ризиків всіх альтернатив $\|ra_i\| = ra_i / \max_i ra_i$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Висновки

Для ефективної роботи екологічних служб необхідно використовувати комп'ютери та системи аналізу інформації з різним за інформаційним забезпеченням рівнем робочих місць. Найбільш продуктивною буде робота, коли буде наявною інформаційна мережа.

У результаті теоретичних досліджень розроблено математичне забезпечення комплексної діагностики інформаційного забезпечення екологічних служб, що є інтелектуальною основою для прийняття ефективного управлінського рішення. Запропоновані теоретичні та практичні результати основи формування математичного моделювання інформації у екосистемах.

Список використаних джерел

1. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: офіційний портал. Режим доступу <https://mepr.gov.ua> (дата доступу 08.05.2022)
2. Білобран О. Управління в сфері охорони довкілля та природокористування в Україні: проблеми та шляхи вирішення / О. Білобран. – К.: ВЕГО «Мама-86», 2003. – 160 с.
3. ГІС-технології оцінки екологічного ситуації для управління екологічною безпекою / О.М. Адаменко [та ін.] // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 1(2). – С.78-81.
4. Данилишин Б.М. Наукові основи прогнозування природно-техногенної (екологічної) безпеки України / Б.М. Данилишин, В.В. Ковтун, А.В. Степаненко. – К.: Лекс дім, 2004. – 552 с.
5. Мариняк Я.О. Основи моделювання стану довкілля / Я.О.Мариняк.– Тернопіль, 2000.– 132 с.
6. Волошин В.В. Проблеми поліпшення стану навколишнього середовища та їх програмне забезпечення / В.В.Волошин [та ін.] // Український географічний журнал. – 1993 .– № 1. – С.9-13.
7. Адаменко О.М. Стратегія створення системи екологічної безпеки Івано-Франківської області: матеріали науково-практичної конференції «Івано-Франківщина – поступ у майбутнє». – Івано-Франківськ, 2004. – С.11-12.
8. Даланы Л. Охрана окружающей среды населенных пунктов и ее концепция / Л. Даланы; пер. с венгер. – М.: Прогресс, 1990. – 68 с.

References

1. Ministry of ecology and natural resources of Ukraine: official portal. Access by <https://mepr.gov.ua> (date of acquaintance 05/08/2022)
2. Bilobran O. Management in the field of environmental protection and nature management in Ukraine: problems and solutions / O. Bilobran. - K .: ВЕГО «Мама-86», 2003. - 160 с.
3. GIS-technologies for assessing the environmental situation for environmental safety management / O.M. Adamenko [etc.] // Oil and gas energy. - 2007. - № 1 (2). - P.78-81.
4. Danilishin BM Scientific bases of forecasting of natural-technogenic (ecological) safety of Ukraine / B.M. Danilishin, VV Kovtun, A.V. Stepanenko. - K .: Lex House, 2004. - 552 p.
5. Marinyak Ya.O. Fundamentals of environmental modeling / Ya.O. Maryniak. - Ternopil, 2000. - 132 p.
6. Voloshin VV Problems of improving the state of the environment and their software / VV Voloshin [etc.] // Ukrainian Geographical Journal. - 1993.– № 1. - P.9-13.
7. Adamenko OM Strategy of creation of the system of ecological safety of Ivano-Frankivsk region: materials of the scientific-practical conference "Ivano-Frankivsk region - progress into the future". - Ivano-Frankivsk, 2004. - P.11-12.
8. Dalanyi L. Environmental protection of settlements and its concept / L. Dalanyi; lane with Hungarian. - M .: Progress, 1990. - 68 p.

УДК [622.673.1: 681.514.54]
DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-103-108

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАПАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КІЛ

В.В. Лопатін

*Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України
вул. Сімферопольська 2а, м Дніпро, 49005. тел. (0562) 46-01-51, факс (0562)46-24-26
e-mail vlop@ukr.net, nanu@igtm.dp.ua*

У статті отримано нові наукові знання про процес запалювання вибухонебезпечної суміші низьковольтним вимірювальним колом (НВК), на основі яких у перспективі могли б розробити досконаліший галузевий документ, наприклад, новий ДСТУ або ДЕСТ.

Прямий спосіб електровимірювальної оцінки іскробезпеки досконаліший, оскільки дозволяє безпосередньо визначити максимум енергії електричного розряду за час, встановлений критерієм, тобто параметр, що визначає займисту здатність електричного розряду електричного ланцюга НВК. Труднощі реалізації такого підходу полягають в складності створення електричної моделі розряду, що копіює реальний розряд у НВК, яка повністю відповідає б реальному іскроутворенню і враховувала б найбільш небезпечні шахтні умови вугільного вибою.

Пропонується спосіб непрямого контролю вимірювання параметра, що визначає запальну здатність електричного розряду НВЦ. Отримано просту аналітичну залежність, що дозволяє з достатньою для практики точністю оцінити запальну здатність НВЦ від його довжини. Запропоновано спосіб класичного моделювання запальної здатності НВЦ, а також оригінальний спосіб імітаційного моделювання. У статті показано апробацію даних досліджень на двох зарубіжних конференціях та інтерес до них зарубіжних колег в Австралії та Іраку.

Ключові слова: низьковольтне вимірювальне коло (НВЦ), оцінка іскробезпеки, запальна здатність, математична модель, класичне та імітаційне моделювання, спосіб непрямого контролю.

The article obtained new scientific knowledge about the process of ignition of an explosive mixture by a low-voltage measuring circuit (LVC), on the basis of which a more advanced industry document could be developed in the future, for example, a new DSTU or DEST. A method is proposed for indirect control of the measurement of a parameter that determines the incendiary ability of the LVC electric discharge.

The direct method of electrical measurement of intrinsic safety is more perfect, as it allows you to directly determine the maximum energy of the electric discharge for the time set by the criterion, ie the parameter that determines the flammability of the electric discharge of the electrical circuit. The difficulty of implementing this approach is the difficulty of creating an electric model of the discharge, which copies the real discharge in the NEC, which would fully correspond to the real sparking and would take into account the most dangerous mine conditions of coal face.

A simple analytical dependence has been obtained, which makes it possible to estimate the incendiary ability of an LVC on its length with sufficient accuracy for practice. A method for the classical modeling of the incendiary ability of the LVC is proposed, as well as an original method for simulation. The article shows the approbation of research data at two foreign conferences and the interest of foreign colleagues in Australia and Iraq in them.

Keywords: low-voltage measuring circuit (LVC), intrinsic safety assessment, incendiary ability, mathematical model, classical and simulation modeling, indirect control method.

Вступ

Як відомо, [1, 2, 3] існує електровимірювальна оцінка іскробезпеки низьковольтного вимірювального кола (НВК), та можливі два способи вимірювання: прямий і непрямий спосіб вимірювання параметра, який

визначає запальну здатність електричного розряду НВК.

Прямий спосіб досконаліший, оскільки дозволяє безпосередньо визначити максимум енергії електричного розряду за критеріальний час, тобто параметр, що визначає займисту здатність електричного розряду електричного

ланцюга НВК. Труднощі реалізації такого підходу полягають в складності створення електричної моделі розряду, що копіює реальний розряд у НВК, яка повністю відповідала б реальному іскроутворенню і враховувала б найбільш небезпечні шахтні умови вугільного вибою.

Для прямого (приладового) контролю за наявності напруги від 12 В існує один дуже рідкісний прилад типу "ПОШУК 5А". Контроль здійснюється за допомогою світлодіодних індикаторів, які забезпечують ступінчасту індикацію. Його параметри: тривалість розряду, що моделюється, мкс 100; 300; 1000 ± 5%; кількість електрики, що протікає за моделлю розряду, А×мкс 1;3;10;30;100 ± 3%; вхідний опір 20 МОм; похибка визначення енергії розряду "ПОШУК 5А" ± 5%.

"ПОШУК 5А" має функції визначення полярності, цілісності чи урвища кола, знаходження фазного провідника, звукову сигналізацію. Час збереження заряду 9-12 годин. Заряджання приладу від мережі 220 В відбувається протягом 20 секунд. Виконаний у зручному для візуального та звукового контролю ударостійкому пластиковому корпусі. Електрична міцність ізоляції приладу становить щонайменше 2000 вольт.

З наведених характеристик "ПОШУК 5А" цілковито очевидно, що для наших цілей, щодо безпечного використання вимірювальних низьковольтних кіл (НВК) в вугільних шахтах, він цілком не годиться. Таким чином для прямого (приладового) контролю нині відсутня технічна можливість його здійснити.

Тому автором пропонується свій спосіб непрямого контролю вимірювання параметра, який визначає запалювальну здатність електричного розряду НВК. Для реалізації цього непрямого способу оцінка може бути побудована за принципом реакції електричного кола НВК на модель електричного розряду. По реакції електричного кола НВК і встановленого зв'язку визначають максимум енергії електричного розряду, що виділяється з оцінюваного кола НВК за критеріальний час. Запропонований автором спосіб докладніше описаний у роботах [4, 5].

Більш детально та докладно з питання виявлення умов та параметрів що до

математичної моделі запальною здатності вид НВК показано у роботах автора [2-7].

Проте ще не було вирішено важливі питання виявлення умов та параметрів моделі, що до математичної запальною здатності вид НВК.

Виклад основного матеріалу і результати дослідження.

Низьковольтне вимірювальне коло (НВК) за своєю суттю є індуктивно-ємнісним електричним колом з розподіленими параметрами. Залежно від параметрів НВК при випробуваннях на іскробезпеку поводить як чиста індуктивність, як чиста ємність або як індуктивно-ємнісне коло. Фундаментально та детально це було досліджено у роботах [3-5].

Автор неодноразово висловлював свою точку зору на математичні моделі та моделювання. Однак, як показує практика та публікації, далеко не всі дослідники та вчені її поділяють. Створюють моделі заради моделі і не можуть відповісти навіть і кому вона потрібна. Тому висловлю свою точку зору вкотре. На мою думку модель створюється з єдиною метою - відповіді на конкретні питання до об'єкту, що моделюється, під цілком певним «кутом зору», причому обраний «кут зору» і визначає вибір моделі.

Зі сказаного випливають наступні етапи побудови математичної моделі:

1. Чітко формуються основні питання моделі, відповіді на які ми хочемо отримати з її допомогою.

2. Безжально відсівають все другорядне і залишають лише мінімально достатні, вплив яких суттєвий при пошуку відповіді на поставлені питання.

3. Формують конкретні гіпотези про функціонування, причому мають бути наведені теоретичні доводи на користь їх прийняття у сенсі правдоподібності.

4. Гіпотези виражаються у формі математичних співвідношень, які поєднуються у формальний опис моделі.

З погляду автора на цьому побудова моделі закінчена.

Далі слід дослідження моделі (співвідношень) за допомогою аналітичних або обчислювальних методів, які і призводять до відшукування відповідей на запропоновані питання. Такий підхід суттєво зменшує

створення неадекватних моделей, що потім вимагають покращення або взагалі заміни моделі. Тридцятирічна наукова практика автора підтверджує ефективність методу пропонуваного вище.

Найгірший випадок з погляду іскробезпеки, це коли НВК виявляє себе як чиста індуктивність. Тому при аналізі енерговіддачі ми справедливо замінюємо НВК індуктивністю. Оскільки аналіз впливу НВК необхідно робити залежно від довжини НВК, введемо позначення:

$$\zeta = L_{noz}/R_{noz}, \quad (1)$$

де L_{noz} – погонна індуктивність НВК (мкГн/м), R_{noz} – погонний опір НВК (мкОм/м).

Справедливо рахувати для даного моделювання, що постійна часу характеризує тип застосованого кабелю НВК і не залежить від його довжини. Як відомо з роботи [3], тривалість електричного розряду, при якій запальна енергія мінімальна, являє собою час формування мінімального ядра полум'я від енергії електричного кола НВК. Експериментально показано, що величина мінімальної запальної енергії становить 0,15 мДж для 8,5% метано-повітряної суміші. Для полегшення моделі зробимо так, щоб ця величина була безрозмірною, віднесемо її до часу формування мінімального ядра полум'я ВШС β :

$$\phi = \zeta/\beta. \quad (2)$$

Характерна особливість, що під час займання ВШС електричними розрядами з тривалістю більшою, ніж час формування мінімального полум'я, критерієм запальної здатності електричного розряду буде його потужність (енергія розряду за час формування мінімального ядра полум'я).

Дослідження процесу формування мінімального ядра полум'я ВШС автором дуже докладно та фундаментально було розглянуто у роботах [3-5].

Змоделюємо енерговіддавання з НВК (з лінійною характеристикою навантаження), до якого підключений новий додатковий НВК. У цьому випадку електрична енергія розряду, визначена за розглянутою вище лінійною струмовою моделлю для НВК за час розряду T , дорівнюватиме:

$$A_{лин} = I_{ком}ET/6, \quad (3)$$

де $I_{ком}$ – комутуючий струм лінійного джерела живлення НВК до підключення додаткової НВК (мА), E – е.р.с. лінійного джерела живлення НВК (В), T – час розряду (мкс).

Після підключення додаткової НВК енергія електричного розряду НВК, з урахуванням індуктивності і за той же час, дорівнюватиме:

$$A_{НВК} = I_1ET/6 + L_{noz} (I_1^2/2) = \\ = I_{ком}ET/6 \{I_1/I_{ком} + I_1/I_{ком} [3L_{noz}/(R + R_{noz})T]\}, \quad (4)$$

де R – обмежувальний опір омичного джерела живлення електричного кола НВК без фідера (Ом),

$$I_1 = E/(R + R_{noz});$$

$$I_{ком} = E/R, I_1/I_{ком} = R/(R + R_{noz}).$$

Оскільки максимум електричної енергії розряду НВК за критеріальний час визначає його запалювальну здатність, то зміна цих величин дозволяє судити про зміну запалюючої здатності НВК при підключенні фідера різної довжини або додаткової НВК.

Однак, ще не було вирішено важливі питання виявлення параметрів щодо математичної моделі запальною здатності вид НВК.

Крім цього, з ряду причин не досліджувалися наявність нових додаткових параметрів, що надають істотний вплив на моделі математичної запальною здатності вид НВК, які раніше не враховувалися або не бралися до уваги.

З погляду автора за своєю суттю питання запальної здібності НВК носить характер імітаційного моделювання, яке відрізняється від описаного автором вище класичного математичного моделювання. Насамперед відмінність стосується в тому, що другим пунктом запропонованого автором способу імітаційного моделювання здійснюється декомпозиція об'єкта на більш прості, а потім в один блок об'єднуються «споріднені» компоненти вектору стану. Саме блоковий принцип дає можливість при побудові запропонованим автором способом імітаційної моделі встановлювати потрібні пропорції між точністю опису кожного блоку, забезпеченістю його достатньої інформацією та необхідністю досягнення мети імітаційного моделювання,

якщо ми хочемо досягти високого рівня адекватності моделі реальному об'єкту. Запропонований автором блоковий принцип побудови імітаційної моделі (за принципом розщеплення) дає принципово нову можливість верифікувати кожен блок до його включення в загальну модель, а також тому, що вона може включати залежності складнішого характеру, що не описуються простими математичними співвідношеннями. Це є новизною, чого не беруть до уваги мої опоненти бо цього ніколи не було у моїх попередників.

Для моделювання різної довжини НВК введемо позначення

$$\kappa = R_{noz} / (R + R_{noz}). \quad (5)$$

Як очевидно, коефіцієнт характеризуватиме довжину фідера НВК, і може змінюватися від 0 (фідер відсутній) і до 1 (обмежувальний опір омичного джерела живлення R буде нехтує мало порівняно з омичним опором фідера). Пропонована модель дозволяє, змінюючи від 0 до 1, змодельовати всі випадки різної довжини фідера НВК.

Вираз (4) при підстановці в нього виразів (3) і (5) набуде вигляду:

$$A_{нвк} = A_{омич} (1 - \kappa) \times (1 + 3\kappa\phi). \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що НВК може суттєво характеризуватись коефіцієнтом l який дорівнює:

$$l = (I_1 E T / 6) / (I_1^2 L_{noz} / 2).$$

Тоді отримуємо нову математичну модель запальною здатності вид низьковольтних вимірювальних кіл (НВК).

$$\begin{aligned} A_{НВК} &= (I_1 E T / 6) [(1+l)/l] = \\ &= (I_{ком} E T / 6) (I_1 / I_{ком}) [(1+l)/l] = \\ &= A_{омич} (1 - \phi) [(1+l)/l]. \end{aligned} \quad (7)$$

Зіставляючи математичні вирази (6) та (7), отримаємо

$$[(1+l)/l] = 1 + 3\kappa\phi. \quad (8)$$

З математичного висловлювання (8) можна зробити висновок, що штучно введені автором коефіцієнти набувають наочності та простоти їх оцінки

$$l = 1 / 3\kappa\phi, \quad (9)$$

$$\kappa = 1 / 3l\phi, \quad (10)$$

та зручні у використанні.

ВИСНОВКИ

Таким чином, з отриманих математичних виразів (9) та (10) видно, що задаючись коефіцієнтом l , можна не заморочуватись складними обчисленнями а елементарно, з достатньою для практики точністю, визначити значення коефіцієнта ϕ – непряму характеристику довжини фідера НВК.

Проведений глибокий та детальний аналіз виконаного автором математичного моделювання дозволяє зробити такі висновки:

1. Найбільшу небезпеку (збільшення електричної енергії розряду) від НВК має місце саме в низьковольтних колах (мінімальний коефіцієнт $n = E / U_{зап}$).

2. Найбільшу небезпеку має місце при рівності обмежувального опору джерела живлення та омичного опору НВК.

3. Оскільки коефіцієнт ϕ визначається параметрами НДЦ і ВШС, то один і той же НВК залежно від ВШС може бути як елементом, що не обмежує іскробезпечну потужність у навантаженні, так і значно її знижує.

4. Додатковий НВК суттєво знижує іскробезпечну потужність електричного розряду додатково до втрат на омичному опорі НВК при її характеристиці $\phi > 0,7$.

5. Додатковий НВК повинен бути ретельно проаналізований та досліджений перш ніж бути рекомендованим та впровадженим у вугільних шахтах України.

6. З викладеного може виникнути питання: а чи не замінює запропонований автором метод імітаційного моделювання методи оптимізації? Автор на нього відповідає однозначно – ні, не замінює, але дуже суттєво доповнює та посилює.

Ці наукові розробки автором вимог та моделювання запальною здатності вид низьковольтних вимірювальних кіл (НВК) пройшли апробацію на двох зарубіжних гірничих конференціях [6, 7] і отримали в 2022 році велику зацікавленість зарубіжних колег.

Отримані нові наукові знання про процес формування вибуху газоповітряної суміші від запалювання вибухонебезпечної суміші низьковольтним вимірювальним колом могли б розробити більш досконалий галузевої документ, наприклад новий ДСТУ або ДЭСТ, в порівнянні з використовуваними в

Акредитованих сертифікаційних центрах і численних інших діючих та існуючих в Україні. Проте злиденне фінансування абсолютно не дозволяє це здійснити навіть у найближчому майбутньому

Наприклад, виконані особисто автором фундаментальні наукові дослідження: оригінальне математичне моделювання та моделі електричних сигналів були включені до складової частини ДСТУ 7302:2013 «СТАТИЧНА ЕЛЕКТРИКА Терміни та визначення основних понять», яке було прийнято та набуло чинності (наказ Мінекономрозвитку України від 14 жовтня 2013 р. № 1231).

Список використаних джерел

1. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытания: ГОСТ 22782.5-1985. – [Введен 1980-01.-01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1985. – 70 с.
2. Лопатін, В.В. Наукові основи розроблення системи контролю технічного стану жорсткого армування шахтних стовбурів: дис. доктора техн. наук: 05.11.13./ Лопатін В.В.- Івано-Франківськ 2013. - 392с.
- 3 Лопатін, В.В. Розробка вимог та моделювання процесу запалювання вибухонебезпечної суміші низьковольтним вимірювальним коло/ Лопатін В.В.- Методи та прилади контролю якості. Науково технічний журнал - Івано - Франківськ - № 2 (47), 2021, С. 78-89
4. Лопатін, В.В. Контроль технічного стану та підвищення ресурсу штангової насосної установки [Текст]: монографія/ В.В. Лопатін, Б.В. Копей, І.Б. Копей; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу; Ін-т геотехн. механіки ім. М.С. Полякова НАН України.-ІФНТУНГ, 2020.- 378с.
5. Лопатін, В.В. Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості [Текст]: монографія/ В.В. Лопатін, Б.В. Копей, О.І. Стефанишин; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу; Ін-т геотехн. механіки ім. М.С. Полякова НАН України.-ІФНТУНГ, 2010.-392с.

6. Lopatin V.V. Development of a mathematical model of the ignition capacity of low-voltage measuring circuits [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin /7IYGEC — 7TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS CONFERENCE/ 29 Apr 2022 - 01 May 2022 Sydney, Australia Режим доступу до ресурсу:

<https://icsmge2022.org/7iygec/>.- Назва з екрану.

7. Lopatin V.V. Développement d'un modèle mathématique de la capacité d'allumage des circuits de mesure basse tension [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin/ IRAQ 2022 — THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING/ 17 May 2022 - 19 May 2022 Baghdad, Iraq, Asia Режим доступу до ресурсу:

<https://ocs.uobaghdad.edu.iq/index.php/ICGEI/ticgei>.- Назва з екрану.

References

1. Elektroborudovaniye vzryvozashchishchennoye s vidom vzryvozashchity «Iskrobezopasnaya elektricheskaya tsep'». Tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniya: GOST 22782.5-1985. – [Vveden 1980-01.-01]. – M.: Izd.-vo standartov, 1985. – 70 s.
2. Lopatin, V.V. Naukovi osnovy rozroblennya systemy kontrolyu tekhnichnoho stanu zhorstkoho armuvannya shakhtnykh stovburiv: dys. doktora tekhn. nauk: 05.11.13./ Lopatin V.V.- Ivano-Frankivs'k 2013. - 392s.
3. Lopatin, V.V. Rozrobka vymoh ta modelyuvannya protsesu zapalyuvannya vybuhonebezpechnoyi sumishi nyz'kovol'nyim vymiryuval'nyim kolo/ Lopatin V.V.- Metody ta pryklady kontrolyu yakosti. Naukovo tekhnichnyy zhurnal - Ivano - Frankivs'k - № 2 (47), 2021, S. 78-89
4. Lopatin, V.V. Kontrol' tekhnichnoho stanu ta pidvyshchennya resursu shtanhovoyi nasosnoyi ustanovky [Tekst]: monohrafiya/ V.V. Lopatin, B.V. Kopey, I.B. Kopey; Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu; In-t heotekhn. mekhaniky im. M.S. Polyakova NAN Ukrayiny.- IFNTUNH, 2020.-378s.
5. Lopatin, V.V. Mobil'ni vymiryuval'ni systemy v naftohazoviy ta hirnychiy promyslovosti [Tekst]: monohrafiya/ V.V. Lopatin, B.V. Kopey, O.I. Stefanyshyn; Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t

nafty i hazu; In-t heotekhn. mekhaniky im. M.S. Polyakova NAN Ukrayiny.-IFNTUNH, 2010.-392s.

6. Lopatin V.V. Development of a mathematical model of the ignition capacity of low-voltage measuring circuits [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin /7IYGEC — 7TH INTERNATIONAL YOUNG GEOTECHNICAL ENGINEERS CONFERENCE/ 29 Apr 2022 - 01 May 2022 Sydney, Australia Режим доступу до ресурсу: <https://icsmge2022.org/7iygec/>.- Назва з екрану.

7. Lopatin V.V. Développement d'un modèle mathématique de la capacité d'allumage des circuits de mesure basse tension [Електронний ресурс]/ V.V. Lopatin /IRAQ 2022 — THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL ENGINEERING/ 17 May 2022 - 19 May 2022 Baghdad, Iraq, Asia Режим доступу до ресурсу: <https://ocs.uobaghdad.edu.iq/index.php/ICGEE/ticgei>.- Назва з екрану.

УДК 658.5

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-109-114

ПРОГНОЗУВАННЯ ОБ'ЄМНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ НАГНІТАЧА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

М. І. Козуляк, В. М. Гарасимів, Д. М. Магас

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: viraharasymiv78@gmail.com

В даній роботі розглянуто методи прогнозування значень об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача, в основі яких лежить підхід кластеризації. Їхня перевага над існуючими методами прогнозування полягає в тому, що вони враховують хаотичну складову експериментальних даних та включають в себе сучасні інформаційні технології (нечітку логіку, нейронні мережі, генетичні алгоритми). Завдяки великій кількості ітераційних підходів значення похибки цільової функції поступово зменшується до бажаного значення, що забезпечує досить хорошу якість прогнозування.

Метод прогнозування на основі алгоритму Fuzzy C-Means, який базується на розв'язанні нечітких с-середніх, реалізовано в програмному середовищі Matlab. Для даного методу кількість кластерів рівна двадцяти, а кількість ітераційних підходів коливається в межах ста. Обчислено величину середньоквадратичного відхилення, яка рівна 0.036816.

Також розглянуто інший метод прогнозування значень об'ємної продуктивності відцентрового нагнітача, який побудовано на основі алгоритму субтрактивної нечіткої кластеризації. Нечіткі правила синтезовано автономно із експериментальних даних, а для побудови нечіткої бази правил використано модель типу Сугено. Для кожної точки розраховано значення потенціалу, що показує можливість формування кластера в його околиці. Центри кластерів вибрано ітераційно серед точок з максимальними потенціалами. Встановлено, що значення середньоквадратичного відхилення для даного методу рівне 0.024289. Отримані результати підтверджують хорошу степінь збіжності експериментальних значень до прогнозованих.

Експериментальні дані, які використовувалися для апробації запропонованих методів, отримано при експлуатації відцентрового нагнітача типу 16 ГЦ2-395/53-76С у Долинському лінійному виробничому управлінні магістральними газопроводами за листопад місяць 2014 року.

Ключові слова: відцентровий нагнітач, об'ємна продуктивність, кластеризація, прогнозування, алгоритм Fuzzy C-Means, алгоритм субтрактивної нечіткої кластеризації.

Methods for predicting the volumetric productivity of a centrifugal supercharger, which is based on the clustering approach, are performed in this paper. Their advantage over existing forecasting methods is that they take into account the chaotic component of experimental data and include modern information technology (fuzzy logic, neural networks, genetic algorithms). Due to the large number of iterative approaches, the value of the error of the objective function is gradually reduced to the desired value, which provides a fairly good quality of forecasting.

The prediction method based on the Fuzzy C-Means algorithm, which is based on solving fuzzy c-means, is implemented in the Matlab software environment. For this method, the number of clusters is twenty, and the number of iterative approaches ranges from one hundred. The value of the standard deviation equal to 0.036816 is calculated.

Another method for predicting the volumetric performance of a centrifugal supercharger, which is based on the subtractive fuzzy clustering algorithm, is also considered. Fuzzy rules were synthesized autonomously from experimental data, and a Sugeno-type model was used to construct a fuzzy rule base. For each point, the value of the potential is calculated, which shows the possibility of forming a cluster in its vicinity. The centers of the clusters are selected iteratively from the points with maximum potentials. It is established that the value of the standard deviation for this method is 0.024289. The obtained results confirm a good degree of convergence of the experimental values to the predicted ones.

Experimental data used for testing of the proposed methods were obtained during the operation of the centrifugal supercharger type 16 ГЦ2-395/53-76С of Dolyna linear production administration of gas transmittal pipelines in November 2014.

Keywords: centrifugal supercharger, volumetric productivity, clustering, forecasting, Fuzzy C-Means algorithm, subtractive fuzzy clustering algorithm.

Вступ

На даний час збільшується запит підприємств та організацій на системи управління, аналізу та прогнозування, які зможуть не лише накопичувати дані, а сприяти досягненню нових вказівок та знань у відповідності зі стандартами Data Mining.

Методи, які традиційно використовуються для прогнозування, базуються на побудові єдиної моделі, в якій число параметрів являється досить малим і залежить від числа експериментальних даних. Досвід показує, що таку модель одержати досить складно, а іноді є неможливим.

Тому на даний час актуально використовувати методи прогнозування, які враховують хаотичну складову даних із використанням сучасних підходів кластеризації. Існуючі сучасні підходи можна поділити на три основні групи відповідно до теорій штучного інтелекту, на які вони опираються [1]. До першої групи відносяться нейронні мережі, які є універсальними адаптивними апроксиматорами, що можуть виявляти та апроксимувати локальні тенденції у поведінці даних. До другої групи віднесемо нечіткі та нейронно-нечіткі підходи, які використовуються для побудови надійних та логічно прозорих моделей прогнозування. Третя група – це методи розподіленого штучного інтелекту: генетичні алгоритми, метод «мурашиних колоній», інтелект рою. Також ці методи можна застосувати для пошуку величин ваг в нейронних мережах.

Аналіз літературних джерел

На сьогодні вирішення багатьох задач прогнозування та моделювання у різноманітних сферах науки реалізується із використанням методів кластеризації. Результуючі значення методів прогнозування із використанням часових рядів є актуальними для розв'язання задач планування, в економіці, торгівлі, керування, а також широко застосовуються для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень [2-4].

Основоположниками теорії прогнозування з використанням інтелектуальних підходів є Н. Вінер, Н. А. Колмогоров, Р. Калман [5]. Для формалізації невизначеності класична теорія прогнозування використовує методи статистики та випадкових процесів.

Оскільки більшість процесів містять у собі хаотичну складову, то виникає необхідність розробки методів прогнозування, які дають можливість об'єднати у собі множину моделей, що відповідатимуть різним патернам, які міститимуться в експериментальних даних [6]. Тому серед багатьох методів набули популярності методи прогнозування, які базуються на основах кластеризації, де моделі формуються на основі кластерів послідовності експериментальних значень.

Основна частина

Для забезпечення надійної та ефективної роботи ГПА (газоперекачувального агрегату) в умовах його експлуатації диспетчери КС (компресорної станції) контролюють теплотехнічні характеристики агрегату: потужність і к. к. д. (коефіцієнт корисної дії) ГТД (газотурбінного двигуна), продуктивність, політропний к.к.д., потужність ВЦН (відцентрового нагнітача), наявну приведену потужність ГТД, коефіцієнт технічного стану ГТД за потужністю, коефіцієнт навантаження ГТД, коефіцієнт технічного стану ВЦН за політропним к.к.д., коефіцієнт режиму ВЦН [7]. З метою зменшення ризику при прийнятті рішень використовують прогнозування теплотехнічних характеристик ГПА, точність якого залежить від використаних ресурсів та методів прогнозування. У випадку, коли розглядають об'єкти, які працюють в умовах хаотичної та випадкової невизначеності теорія прогнозування використовує апарат статистики та випадкових процесів.

Для апроксимації нелінійних залежностей використано нечітку логіку, основу якої становлять правила «ЯКЩО вхід, ТО вихід». Точність та якість нечіткої моделі залежить від форми і взаємного розташування функцій належності. Тому при використанні нейромережових нечітких систем, налаштування параметрів нечіткої моделі в значній мірі автоматизується, нейронна (адаптивна) мережа виступає в якості механізму налаштування параметрів нечіткої моделі. Нечіткі множини є параметрами нечіткої моделі, а структура правил та їхня кількість визначають структуру моделі.

В даний роботі використано експериментальні дані, які були зібрані на КС «Долина», отриманих при експлуатації

відцентрового нагнітача природного газу 16 ГЦ2-395/53-76С за листопад місяць 2014 року.

Об'ємна продуктивність компресора за умовами всмоктування в м³/хв визначалася за формулою:

$$Q_{ec} = A_k \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot Z_1 \cdot R \cdot T_1}{P_1}}, \quad (1)$$

де A_k – коефіцієнт конфузору (паспортні дані), м²;

ΔP – перепад тиску на конфузори, МПа;

Z_1 – коефіцієнт стисливості компримуємого газу на вході в нагнітач;

R – газова стала газу, кДж/(кг·К);

T_1 – температура на вході в нагнітач, К;

P_1 – тиск газу на вході в нагнітач, МПа.

Спочатку синтезуються нечіткі правила з експериментальних даних з використанням субтрактивної кластеризації. На другому етапі налаштовуються параметрів нечіткої моделі за допомогою ANFIS-алгоритму. Субтрактивна кластеризація може використовуватися як швидкий автономний метод синтезу нечітких правил з даних. За результатами нечіткої кластеризації можна синтезувати нечіткі правила різних баз знань (синглтонної, Мамдані, Сугено). Ідея методу полягає в тому, що спочатку визначають точки, які можуть бути центрами кластерів. Для кожної точки розраховується значення потенціалу, що показує можливість формування кластера в її околиці. Після цього ітераційно вибираються центри кластерів серед точок з максимальними потенціалами.

Важливою перевагою застосування кластеризації для синтезу нечіткої моделі є те, що правила бази знань виходять об'єктно-орієнтованими.

У системі Matlab для розв'язання задачі нечіткої кластеризації реалізовано два алгоритми:

- алгоритм FCM (Fuzzy Classifier Means) - спеціальна функція системи Matlab, яка використовує алгоритм розв'язання методом нечітких с-середніх;

- алгоритм субтрактивної нечіткої кластеризації.

Метою FCM-алгоритму кластеризації є автоматична класифікація множини об'єктів, тобто даний алгоритм визначає кластери і

відповідно до них здійснює класифікацію об'єктів. Кластери представляються нечіткими множинами. Границі між кластерами також є нечіткими. Степінь належності об'єкта визначається відстанню від нього до відповідних кластерних центрів. Даний алгоритм ітераційно обчислює центри кластерів і нові степені належності об'єктів.

Для множини експериментальних значень $K=336$ вхідних векторів x_k та N виділених кластерів c_j припустимо, що ступінь належності будь-якого вектору x_k до відповідного кластеру c_j рівна $\mu_{jk} \in [0,1]$, де j – номер кластера, а k – номер вхідного вектора.

Запишемо умови нормування для μ_{jk} :

$$\sum_{j=1}^N \mu_{jk} = 1, \forall k = 1, \dots, K; \quad (2)$$

$$0 < \sum_{k=1}^N \mu_{jk} \leq K, \forall j = 1, \dots, N.$$

Метою алгоритма є мінімізація суми усіх зважених відстаней:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|x_k - c_j\| \rightarrow \min, \quad (3)$$

де q – фіксований параметр, заданий перед ітераціями.

Із врахуванням умови (3) необхідно розв'язати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \mu_{jk}} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|x_k - c_j\| \right) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial c_j} \left(\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \|x_k - c_j\| \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Відповідно до умов (2) розв'язок системи (4) запишемо у такому вигляді:

$$c_j = \frac{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q \cdot x_k}{\sum_{k=1}^K (\mu_{jk})^q}, \quad (5)$$

$$\mu_{jk} = \frac{1}{\|x_k - c_j\|^{\frac{1}{q-1}} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{\|x_k - c_j\|^{\frac{1}{q-1}}} \right)}. \quad (6)$$

Реалізація алгоритму FCM включає виконання наступних кроків.

Крок 1. Ініціалізація. Тут вибираємо необхідну кількість кластерів N , кількість ітерацій та фіксований параметр q . Оскільки $2 < N < K$, то припустимо, що $N=20$. Кількість ітерацій рівна 100, а фіксований параметр $q=1.5$. Початкова матриця належності рівна $U^{(0)} = (\mu_{jk})^{(0)}$.

Крок 2. Обчислення значень центрів кластерів $c_j^{(t)}$. На ітераційному кроці t при відомій матриці $\mu_{jk}^{(t)}$ виконуємо обчислення $c_j^{(t)}$ із використанням формули (5).

Крок 3. Визначення значень функції належності μ_{jk} . Якщо $x_k \neq c_j$ обчислюємо $\mu_{jk}^{(t)}$, враховуючи відомі значення $c_j^{(t)}$. В іншому випадку:

$$\mu_{jk}^{(t+1)} = \begin{cases} 1, & l = j, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Крок 4. Зупинка алгоритму. Алгоритм нечіткої кластеризації зупиняється у випадку виконання наступної умови:

$$|U^{(t+1)} - U^t| \leq \varepsilon,$$

де $\varepsilon = 10^{-5}$ - задана точність виконання алгоритму.

Результат виконання писаного вище алгоритму показано на рисунку 1.

Для оцінювання точності прогнозування розраховано середньоквадратичне відхилення прогнозованих значень від розрахованих значень об'ємної продуктивності за такою формулою [2]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1, n} (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (7)$$

де $n=336$ - кількість досліджень;

y_i - розрахункові значення об'ємної продуктивності нагнітача, $\text{м}^3/\text{с}$;

\hat{y}_i - прогнозовані за алгоритмом FCM значення об'ємної продуктивності нагнітача, $\text{м}^3/\text{с}$.

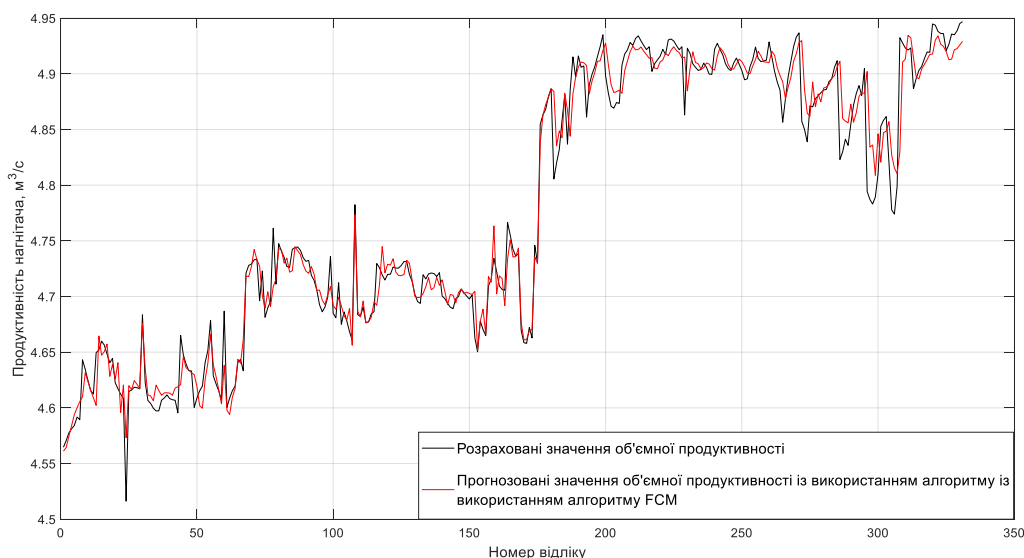


Рисунок 1 – Розрахункові та прогнозовані за алгоритмом FCM значення об'ємної продуктивності нагнітача

Одержали значення середньоквадратичного відхилення рівне 0.036816.

Для реалізації алгоритму субтрактивної нечіткої кластеризації використано пакет Matlab Fuzzy Logic Toolbox, який автоматично синтезує

нечітку базу знань, використовуючи експериментальні дані, для моделі типу Сугено. В результаті генеруються правила, які відповідають областям найбільшої концентрації експериментальних даних. Даний алгоритм реалізований у вигляді функції genfis2.

Результат виконання алгоритму субтрактивної нечіткої кластеризації показано на рисунку 2.

Процес екстракції правил із експериментальних даних у функції *genfis2* можна поділити на два етапи. Спочатку

використовуємо функцію *subclust* для визначення кількості правил. Потім із використанням МНК (методу найменших квадратів) визначається частина «...то...» для кожного правила.

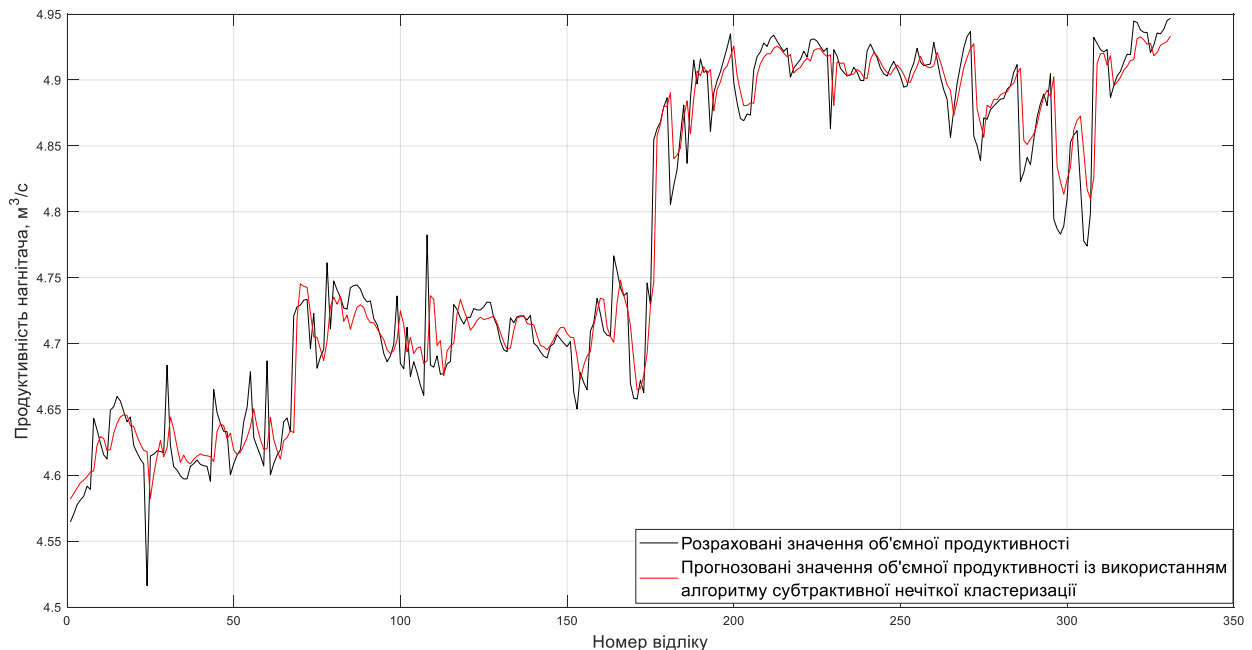


Рисунок 2 – Розрахункові та прогнозовані за алгоритмом субтрактивної нечіткої кластеризації значення об'ємної продуктивності нагнітача

Одним із вхідних параметрів функції є вектор r , який визначає розміри області правил за кожною координатою. Відомо, що значення вектора r повинно знаходитися в межах $[0,1]$ так, як під час виконання функції *subclust* дані масштабуються на одиничний гіперкуб. Вибір радіуса r помітно впливає на результат прогнозування. Якщо прийняти невелике значення r , то нечітка база знань буде більш повною, але чутливо до виключень і неточностей. Якщо прийняти значення радіуса досить великим, то можливо втратити деякі правила під час синтезу моделі. За рекомендаціями праці [8] вибираємо $r=0.55$. Кількість підходів вибрано 100.

Для оцінювання точності прогнозування використано формулу (7) та одержано значення середньоквадратичного відхилення рівне 0.024289.

Висновки

В даній роботі запропоновано метод прогнозування значень об'ємної продуктивності нагнітача, основою якого є алгоритм Fuzzy C-Means. Обчислено величину середньоквадратичного відхилення, яка рівна 0.036816.

Також виконано прогнозування значень об'ємної продуктивності нагнітача із застосуванням методу на основі алгоритму субтрактивної нечіткої кластеризації. Нечіткі правила синтезовано автономно із експериментальних даних, а для побудови нечіткої бази правил використано модель типу Сугено. Встановлено, що значення середньоквадратичного відхилення для даного методу рівне 0.024289. Отримані результати підтверджують хорошу якість прогнозування значень об'ємної продуктивності нагнітача.

Список використаних джерел

1. Wang J., Chi D., Wu J., Lu H. Chaotic time series method combined with particle swarm optimization and trend adjustment for electricity demand forecasting. *Expert Systems with Applications*. 2011. № 38. P. 8419-8429.
2. Громов А.В., Воронин И.М., Гатыло В.Р., Прокопало Е.Т. Оценнка гиперпараметров в задачах прогнозирования на основе кластеризации. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. 2016. № 16. С. 25-46.
3. Widiputra H., Kho H., Pears R., Kasabov N. A novel evolving clustering algorithm with polynomial regression for chaotic time-series prediction. *Neural Inf Process*. 2009. Vol. 5864. P. 114-121.
4. Пахомова В.М., Дмитрієв С.Ю. Розробка підсистеми оперативного прогнозування простоїв прибуваючих поїздів на основі ANFIS-системи. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. №4. С. 46-55.
5. Chatfield C. *The Analysis of Time Series : An Introduction, Sixth Edition*. CRC Press. 2009. 352 p.
6. Phu L., Anh D.T. Mostif-based method for initialization the K-means clustering for time series data. *Springer*. 2011. Vol. 7106. P. 11-20.
7. Довідник інженера диспетчерської служби / за заг. ред. канд. техн. наук Ю.В. Пономарьова та М.П. Химка. Київ : УЦЕБОПнафтогаз, 2009. 245 с.
8. Ремнева В.В. Особенности применения критериев оценки качества разбиения в алгоритме кластеризации Fuzzy C-Means. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті*. 2013. № 1. С. 157-158.

References

1. Wang J., Chi D., Wu J., Lu H. Chaotic time series method combined with particle swarm optimization and trend adjustment for electricity demand forecasting. *Expert Systems with Applications*. 2011. № 38. P. 8419-8429.
2. Hromov A.V., Voronyn Y.M., Hatylo V.R., Prokopalo E.T. Otsennka hyperparametrov v zadachakh prohozyrovanyya na osnove klasteryzatsyy. *Pytannya prykladnoyi matematyky i matematychnoho modelyuvannya*. 2016. № 16. S. 25-46.
3. Widiputra H., Kho H., Pears R., Kasabov N. A novel evolving clustering algorithm with polynomial regression for chaotic time-series prediction. *Neural Inf Process*. 2009. Vol. 5864. P. 114-121.
4. Pakhomova V.M., Dmitriyev S.YU. Rozrobka pidsystemy operatyvnoho prohozuvannya prostoyiv prybuyayuchykh poyizdiv na osnovi ANFIS-systemy. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. 2013. №4. S. 46-55.
5. Chatfield C. *The Analysis of Time Series : An Introduction, Sixth Edition*. CRC Press. 2009. 352 p.
6. Phu L., Anh D.T. Mostif-based method for initialization the K-means clustering for time series data. *Springer*. 2011. Vol. 7106. P. 11-20.
7. Dovidnyk inzhenera dyspetchers'koyi sluzhby / za zah. red. kand. tekhn. nauk YU.V. Ponomar'ova ta M.P. Khyinka. Kyiv : UTSEBOPnaftohaz, 2009. 245 s.
8. Remneva V.V. Features of application of partition quality evaluation criteria in Fuzzy C-Means clustering algorithm. *Modern information and innovative technologies in transport*. 2013. № 1. pp. 157-158.

УДК 681.5.015:622.24

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-115-126

ЧИСЛОВИЙ МЕТОД ОБЧИСЛЕННЯ КРИТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОЛОТО ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН

М. І. Горбійчук, Д. Р. Кропивницький

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

В роботі розглядається вплив осевого навантаження на долото на форму бурової колони. Визначено, що збільшення даного параметру до критичного значення приведе до деформації бурової колони, що в свою чергу може спричинити аварійну ситуацію. Для визначення критичного значення осевого навантаження було побудовано багатокутник сил, що діють на нижньому кінці бурильної колони, що визначається координатою, яка є точкою максимального прогину бурильної колони, та побудовано математичні залежності у вигляді системи диференціальних рівнянь (форма Коші). В середовищі MatLab було розроблено алгоритм визначення заданої координати x , який включає в себе розв'язок системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта та побудову інтерполяційного поліному Лагранжа. Побудовано графічні залежності зміни прогину бурильної колони при різних значеннях згинаючого моменту. Було показано, що зі збільшенням навантаження на долото зростає крутий момент, внаслідок чого інтенсивність викривлення бурильної колони збільшується.

За результатами обчислень синтезовано емпіричні моделі визначення точки максимального прогину бурильної колони у вигляді полінома 2-го порядку, параметри яких обчислено за методом найменших квадратів. Адекватність моделей перевірено за допомогою коефіцієнта кореляції. Обчислені значення коефіцієнта кореляції є близькими до одиниці, тому можна стверджувати, що запропонована емпірична модель адекватно описує «експериментальні» дані.

Було проведено серію машинних експериментів при різних значеннях максимальної степені полінома і визначено, що при степені полінома рівній 3, емпірична модель, яка з високою точністю описує результати даних, а кількість членів полінома становить - 20.

В роботі було визначено, що при бурінні свердловини критичне навантаження на долото можна обчислити за двома факторами – точкою максимального прогину бурильної колони та довжиною, яка визначається різницею між точкою максимального прогину та точкою нейтрального перерізу.

Ключові слова: навантаження на долото, бурильна колона, метод Рунге-Кутта, метод найменших квадратів, емпірична модель.

The paper considers the effect of axial load on the bit on the shape of the drill string. It is determined that increasing this parameter to a critical value will lead to deformation of the drill string, as a result it can cause an accident. To determine the critical value of the axial load, a polygon of forces acting at the lower end of the drill string was constructed, determined by the X_2 coordinate that is the point of maximum deflection of the drill string, and mathematical dependences were made as a system of differential equations (Cauchy form). An algorithm for determining a given x coordinate has been developed in the MatLab environment, which includes solving a system of differential equations using the Runge-Kutta method and building an interpolation Lagrange polynomial. Graphical dependences of drill string deflection change at different values of bending moment are developed. It has been shown that increasing load on the bit makes the torque to increase, as a result of which the intensity of the curvature of the drill string increases.

Based on the results of calculations, empirical models for determining the point of maximum deflection of the drill string in the form of a polynomial of the 2nd order were synthesized, the parameters of which were calculated by the method of least squares. The adequacy of the models was checked using a correlation coefficient. The calculated values of the correlation coefficient are close to 1, so it can be claimed that the proposed empirical model adequately describes the "experimental" data.

A series of machine experiments was performed at different values of the maximum degree of the polynomial and it was determined that for the degree of the polynomial equal to 3, the empirical model, which is a function $f(a, x)$ describes the results with high accuracy and the number of polynomial members is 20.

It was determined that when drilling a well, the critical load on the bit can be calculated by two factors - the point of maximum deflection of the drill string and the length, which is determined by the difference between the maximum deflection point and the neutral section point.

Keywords: bit load, drill string, Runge-Kutta method, least squares method, empirical model.

Вступ

Буріння нафтових і газових свердловин є складним процесом, який можна розділити на декілька етапів. Одним з найбільш енерговитратних етапів є процес поглиблення свердловини. На сьогоднішній день, в Україні реалізується програма глибокого буріння, довгостроковою метою якої є перехід на нові глибинні горизонти понад 7 тис. м, що є значним внеском у досягненні енергетичної безпеки України [1]. При цьому, головним фактором, який впливає на покращення техніко-економічних показників процесу поглиблення нафтових і газових свердловин є визначення оптимальних параметрів режиму буріння – частоти обертання та осьового навантаження на долото.

Мета роботи

Метою роботи є знаходження критичного значення осьового навантаження на долото, яке діє на низ бурильної колони і є одним з параметрів, який впливає на її напружено-деформований стан.

Викладення основного матеріалу

Розв'язування задачі оптимального керування вимагає знання обмежень на керуючі впливи. При роторному способі буріння – це частота обертання ротора і осьове навантаження на долото. Граничне значення частоти обертання ротора елеватора зумовлене його енергетичною характеристикою.

Осьове навантаження на долото визначається [1] як різниця між зусиллям на крюку G_h і вагою бурильної колони в рідині G_g з врахуванням сумарної сили тертя F_{fr} бурильної колони об стінки свердловини

$$G = G_h - G_g + F_{fr}. \quad (1)$$

Оскільки верхня частина бурильної колони утримується тальновою системою, а її нижня частина упирається об вибій свердловини, то існує нейтральний переріз [2], де не має ні стиску, ні розтягу. Положення такого перерізу змінюється під впливом гідростатичного тиску, що створюється буровим насосом.

Якщо знехтувати силою тертя, то із формули (1) випливає, що вага в промивній рідині частини бурильної колони, яка розміщена нижче нейтрального січення, створює навантаження на долото.

До певного критичного значення осьового навантаження на долото бурильна колона зберігає свою початкову форму. Збільшення осьового навантаження на долото приводить до згинання бурової колони і при певному значенні осьового навантаження на долото вона доторкнеться до стінки свердловини (рис. 1).

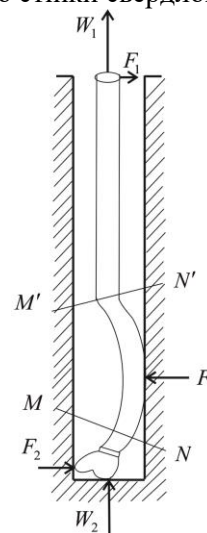


Рисунок 1 – Схематичне зображення свердловини при критичному осьовому навантаженні на долото.

На рис. 1 прийняті такі позначення: W_1, F_1 - вертикальна і горизонтальна реакції елеватора; W_2 - вертикальна складова реакції вибою свердловини або навантаження на долото; F - горизонтальна реакція стінки свердловини; F_2 - горизонтальна складова реакції вибою.

Виберемо таку систему координат. Вісь X направимо вниз в сторону вибою свердловини. Її початок розмістимо в точці O нейтрального перерізу. Координату Y , яка характеризує відхилення осі колони від свого недеформованого стану, направимо горизонтально від точки O зліва направо.

Для визначення критичного осьового навантаження на долото (рис. 2,а) складемо багатокутник сил [2], які діють на частину колони, що розміщена нижче перерізу MN (рис.1).

Прогин колони відбувається під дією сили зсуву F_{sf} , яка виникає внаслідок дії згинаючого моменту M_{bm} . Між силою зсуву F_{sf} і згинаючим моментом існує таке співвідношення [3]:

$$F_{sf} = \frac{dM_{bm}}{dX}. \quad (2)$$

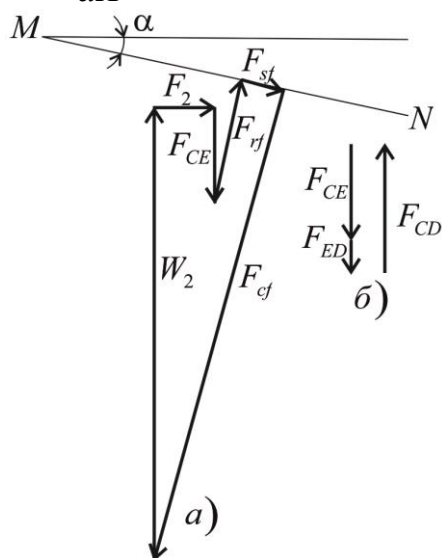


Рисунок 2 – Багатокутник сил, що прикладені до колони нижче січення MN

Величина згинаючого моменту зумовлена жорсткістю колони і обчислюється за такою формулою:

$$M_{bm} = EJ \frac{d^2Y}{dX^2}, \quad (3)$$

де E – модуль Юнга для матеріалу колони бурильних труб; J – момент інерції поперечного перерізу труби.

Сила F_{CE} є векторною сумою сил (рис. 2, б) F_{ED} і F_{CD} . Отже,

$$F_{CE} = F_{CD} - F_{ED}, \quad (4)$$

де F_{CD} – вага частини колони, що розміщена нижче перерізу MN ; F_{ED} – вага рідини, що

витіснена частиною колони, яка розміщена нижче перерізу MN .

Силу F_{CE} визначимо як вагу частини колони, яка розміщена нижче перерізу MN , помножену на коефіцієнт k_G . Оскільки $F_{CD} = V\rho_s g$, $F_{ED} = V\rho_a g$ і $F_{CE} = k_G V\rho_s g$, де V – об'єм частини труби нижче перерізу MN ; ρ_s і ρ_a – густини матеріалу труби і промивальної рідини, то рівняння (4) наб уде такого вигляду:

$$k_G V\rho_s g = V\rho_s g - V\rho_a g.$$

Звідси

$$k_G = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}.$$

Сила виштовхування F_{rf} перпендикулярна перерізу MN [2].

Складемо векторне рівняння (рис. 2, а)

$$W_2 + F_2 + F_{CE} + F_{rf} + F_{st} + F_{cf} = 0. \quad (5)$$

Вектори, що є складовими рівняння (5), спроєкуємо на лінію MN (рис. 2, а), прийнявши за додатний напрямок від точки M до точки N . У результаті приходимо до такого скалярного рівняння:

$$F_{st} + (W_2 - F_{CE}) \sin\alpha + F_2 \cos\alpha = 0. \quad (6)$$

Зауважимо, що в (6) значення кута α відраховуємо за годинниковою стрілкою. Тому $\sin(-\alpha) = -\sin\alpha$, що і зумовлює кінцевий вигляд формули (6).

У реальних умовах буріння кут α є досить малим. Тому мають місце такі співвідношення: $\cos\alpha \approx 1$ і $\sin\alpha \approx \text{tg}\alpha$.

З врахуванням останніх співвідношень рівняння (6) набуде такого вигляду:

$$F_{st} + (W_2 - F_{CE}) \text{tg}\alpha + F_2 = 0. \quad (7)$$

Позначимо через P вагу погонного метра колони в повітрі. Тоді вага погонного метра колони у рідині буде такою:

$$p_f = k_G P. \quad (8)$$

Визначимо координати точок початку X_1 і кінця X_2 бурильної колони (рис. 3)

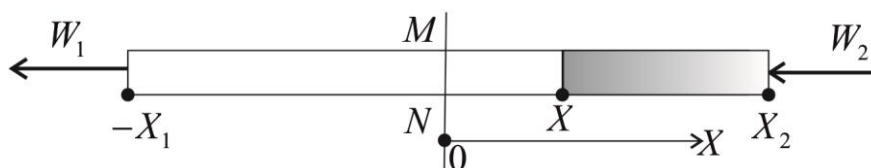


Рисунок 3 – Прив'язка координати X до нейтрального перерізу бурової колони.

Очевидно, що

$$X_1 = -\frac{W_1}{p_f}, \quad X_2 = \frac{W_2}{p_f}.$$

Вагу колони, що розміщена нижче нейтрального перерізу X (рис. 3), обчислимо за такою формулою:

$$k_G W = p_f (X_2 - X),$$

де W – вага частини колони, що розміщена нижче нейтрального перерізу X , у повітрі. Оскільки

$$F_{CE} = k_G W, \text{ то} \\ F_{CE} = p_f (X_2 - X).$$

Значення F_{CE} підставимо в (7) і врахуємо, що $W_2 = p_f X_2$. Тоді

$$F_{st} + p_f X \operatorname{tg} \alpha + F_2 = 0.$$

Враховуючи те, що $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dY}{dX}$, а із формул

(2) і (3) випливає, що $F_{st} = EJ \frac{d^3 Y}{dX^3}$, то отримаємо таке диференціальне рівняння:

$$EJ \frac{d^3 Y}{dX^3} + p_f X \frac{dY}{dX} + F_2 = 0.$$

Перейдемо до безрозмірних величин:

$$x = \frac{X}{m} \quad \text{і} \quad y = \frac{Y}{m}.$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} + \frac{p_f m^3}{EJ} x \frac{dy}{dx} + \frac{m^2}{EJ} F_2 = 0.$$

(9) нелінійне диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 z}{dx^2} + xz + f_2 = 0,$$

розв'язано шляхом представлення функції z у вигляді нескінченного степеневого ряду змінної x . У результаті отримали сімейство розв'язків,

Значення виберемо таким, щоб $\frac{p_f m^3}{EJ} = 1$.

Звідси знаходимо, що $m = \left(\frac{EJ}{p_f} \right)^{1/3}$. Якщо

тепер врахувати значення m , то тепер врахувати значення m , то

$$\frac{m^2}{EJ} F_2 = \frac{F_2}{m p_f}.$$

З врахуванням вибраного значення m диференціальне рівняння (9) набуде такого вигляду:

$$\frac{d^3 y}{dx^3} + x \frac{dy}{dx} + f_2 = 0, \quad (10)$$

де $f_2 = \frac{F_2}{m p_f}$.

Якщо p_f має розмірність $[H/m]$; модуль Юнга $E - [H/m^2]$, а момент інерції $J - [m^4]$, то розмірність $m - [m]$.

Оскільки в рівняння (10) перший і другий доданки безрозмірні, то величина f_2 також повинна бути безрозмірною величиною. Дійсно, якщо розмірність $F_2 - [H]$, а добуток $m p_f$ має розмірність $[H]$, то f_2 - безрозмірна величина.

У роботі [2] рівняння (10) розв'язано шляхом пониження порядку диференціального рівняння

(10), ввівши нову змінну $z = \frac{dy}{dx}$. Отримане

нелінійне диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 z}{dx^2} + xz + f_2 = 0,$$

розв'язано шляхом представлення функції z у вигляді нескінченного степеневого ряду змінної x . У результаті отримали сімейство розв'язків,

кожен із яких виражається через функції Бесселя дробових порядків. Перехід від функції z до функції Y вимагає складних і громіздких обчислень. Тому кінцеві результати, які отримані внаслідок розв'язання рівняння (10), подані в роботі [4] не як аналітичні залежності, а у вигляді номограм, що звичайно знижує точність розв'язання цілого ряду практичних задач.

Оскільки метою роботи є знаходження критичного значення осьового навантаження на долото, яке визначається координатою x_2 , то для розв'язання поставленої задачі скористаємося числовим методом [5].

Рівняння (10) подамо у вигляді системи диференціальних рівнянь, кожне із яких є диференціальним рівнянням першого порядку (система рівнянь у формі Коші)

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{dx} &= z_2, \\ \frac{dz_2}{dx} &= z_3, \\ \frac{dz_3}{dx} &= -xz_2 - f_2, \\ y &= z_1. \end{aligned} \quad (11)$$

Для реалізації ітераційної процедури розв'язання рівняння (11) одним із числових методів, необхідно визначити початкові умови.

У точці нейтрального перерізу (рис. 2) відхилення вертикальної осі бурильної колони дорівнює нулю. Це означає, що $y(0) = z_1(0) = 0$.

Оскільки кут α є досить малим, то $\text{tg}(\alpha) \approx 0$. З іншої сторони

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{dy}{dx} = z_2. \text{ Отже,}$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = z_2(0) = 0.$$

Із рівняння (3) випливає, що

$$\frac{d^2 Y}{dX^2} = \frac{M_{bm}}{EJ}.$$

Переходячи до безрозмірних одиниць, отримуємо

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = m \frac{M_{bm}}{EJ}.$$

Якщо врахувати значення m , то приходимо до такого виразу:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = m_{bm},$$

де $m_{bm} = \frac{M_{bm}}{m^2 p_f}$ – згинаючий момент в безрозмірних одиницях.

$$\text{Оскільки } \frac{d^2 y}{dx^2} = z_3, \text{ то } z_3(0) = m_{bm}(0).$$

Диференціальне рівняння (10), яке подано у вигляді еквівалентної системи рівнянь (11), розв'яжемо методом Рунге-Кутта [5].

Для того, щоб скористатися методом Рунге-Кутта, систему диференціальних рівнянь (11) необхідно записати у матрично-векторній формі

$$\frac{d\bar{z}}{dx} = \bar{f}(x, \bar{z}), \quad (12)$$

де

$$\bar{z} = (z_1, z_2, z_3)^T;$$

$$\bar{f}(x, \bar{z}) = (z_2, z_3, -xz_2 - f_2)^T.$$

Початкові умови для рівняння (12) будуть такі: $\bar{z}(0) = (0 \ 0 \ m_{bm}(0))^T$.

Процес інтегрування системи рівнянь (11) закінчувався при виконанні умови $y(x_k) \leq 0$. Останнє співвідношення означає, що на інтервалі значень $x \in [x_{k-1}; x_k]$ функція $y(x)$ змінила свій знак на протилежний і при деякому значенні x_2 виконується умова $y(x_2) = 0$.

У методі Рунге-Кутта інтегрування ведеться з постійним кроком h . Тому інтервал, який вміщує нуль функції $y(x)$, обчислюється за допомогою такого співвідношення:

$$\Delta = x_k - x_{k-1}.$$

Оскільки $x_k = kh$ і $x_{k-1} = (k-1)h$, то $\Delta = h$. Якщо x_{k-1} взяти як значення x_2 , то похибка у визначенні x_2 буде не більше $h/2$.

Для уточнення значення x_2 , що належить інтервалу Δ , за трьома значеннями $y(x_{k-2})$, $y(x_{k-1})$ і $y(x_k)$ побудуємо інтерполяційний поліном Лагранжа.

У випадку, коли інтерполяційні вузли розміщені на однаковій віддалі h один від одного, то інтерполяційний поліном синтезують за такою формулою:

$$P_N(x) = \sum_{k=0}^N q_k \frac{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^N (x/h - i)}{\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^N (k - i)}. \quad (13)$$

Для практичного застосування формули (13) введемо такі позначення: $q_0 = y(x_{k-2})$, $q_1 = y(x_{k-1})$ і $q_2 = y(x_k)$. Тоді $N = 2$.

З врахуванням прийнятих позначень, поліном Лагранжа $P_2(x)$ буде поліномом другого порядку. Значення x_2 - це більший корінь квадратного рівняння $P_2(x) = 0$.

Розроблений алгоритм обчислення значення x_2 ліг в основу програмного забезпечення, яке створене в середовищі MatLab.

Були вибрані такі значення: для крутного моменту

$$m_{bm}(0) \in [0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40];$$

$$\text{реакція вибою} - f_2 \in [0,4, 0,5, 0,6, 0,7].$$

Як приклад, на рис. 4 показана зміна прогину труби y як функції координати x при $f_2 = 0,4$ і при різних значеннях згинаючого моменту.

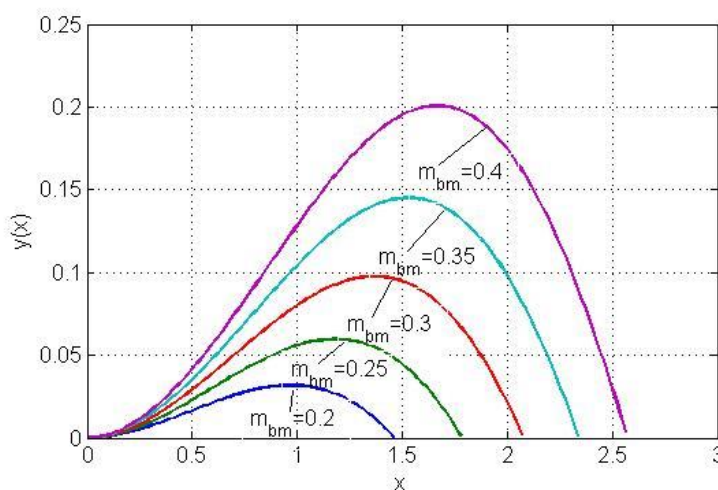
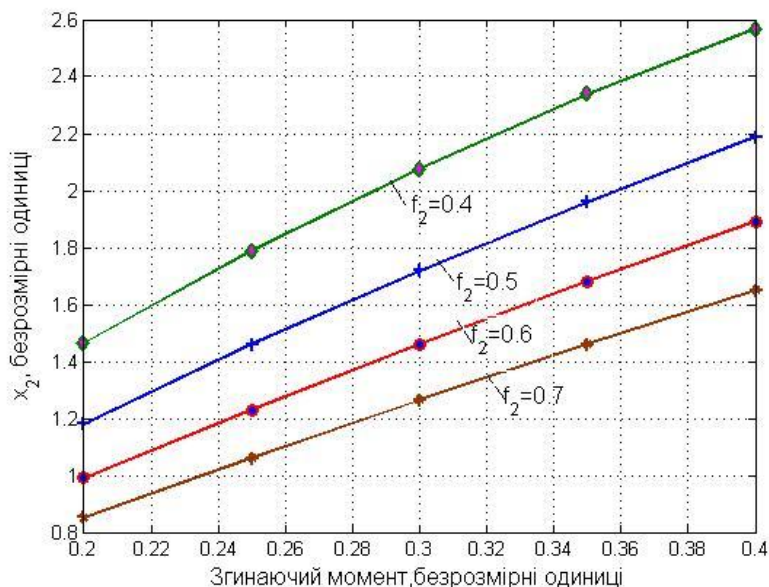


Рисунок 4 – Зміна прогину бурильної труби при різних значеннях згинаючого моменту

Аналіз рис. 4 показує, що зі збільшення осевого навантаження на долото зростає крутий момент, що зумовлює інтенсивність викривлення бурильної колони.

Критичне осеве навантаження на долото G_{ca} можна оцінити за значенням x_2 . Якщо відома вага погонного метра труби P і

значення k_G , то можна обчислити $P_f = k_G P$. Тоді $G_{ca} = P_f x_2$. Для різних значень $m_{bm}(0)$ і f_2 були визначені значення x_2 (рис. 5) як результат розв'язування рівняння $P_2(x) = 0$.



Рисуюнок 5 – Зміна значень x_2 як функції величин $m_{bm}(0)$ і f_2

Іншою важливою характеристикою, крім значення x_2 , і яка також визначає критичне осьове навантаження на долото є максимальне значення функції $y = \varphi(x)$ на інтервалі значень $x \in [0; x_2]$

$$x_3 = \max_{x \in [0; x_2]} \varphi(x).$$

Величину x_3 обмежують величиною позірного радіуса r

$$x_3 \leq r.$$

Значення r обчислюють за такою формулою:

$$r = \frac{D - D_t}{2m},$$

де D – діаметр свердловини; D_t – зовнішній діаметр нормальної (обтяженої) труби або замкового з'єднання.

У точці x_3 функція $\varphi(x)$ досягає свого максимального значення. Це означає що $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_3} = 0$. Оскільки $z_2 = \frac{dy}{dx}$, то $z_2(x_3) = 0$. Отже, функція $z_2(x)$ в точці

$x = x_3$ набуває нульового значення, а y – максимального значення (рис. 6).

Для уточнення значення x_3 , при якому функція $y(x)$ досягає свого максимального значення, визначалось значення x_k за умови, що $z_2(x_k) < 0$ і за трьома значеннями $y(x_{k-2})$, $y(x_{k-1})$ і $y(x_k)$ будувався поліном Лагранжа за формулою (13).

Оскільки у формулі (13) $N = 2$, то поліном Лагранжа матиме другий порядок

$$P_2(x) = a_{L,0} + a_{L,1}x + a_{L,2}x^2,$$

$$x \in [x_{k-2}; x_k].$$

Функція $P_2(x)$ досягає свого максимуму

за умови: $x = -\frac{a_{L,1}}{2a_{L,2}}$, $x \in [x_{k-2}; x_k]$. Тоді

$$x_3 = x_{k-2} + x, \quad x \in [x_{k-2}; x_k].$$

Для значень $m_{bm}(0) \in [0, 20, 0, 25, 0, 30, 0, 35, 0, 40]$ і реакції вибою - $f_2 \in [0, 4, 0, 5, 0, 6, 0, 7]$ побудовані $x_3 = \eta(m_{bm}, f_2)$ (рис. 9).

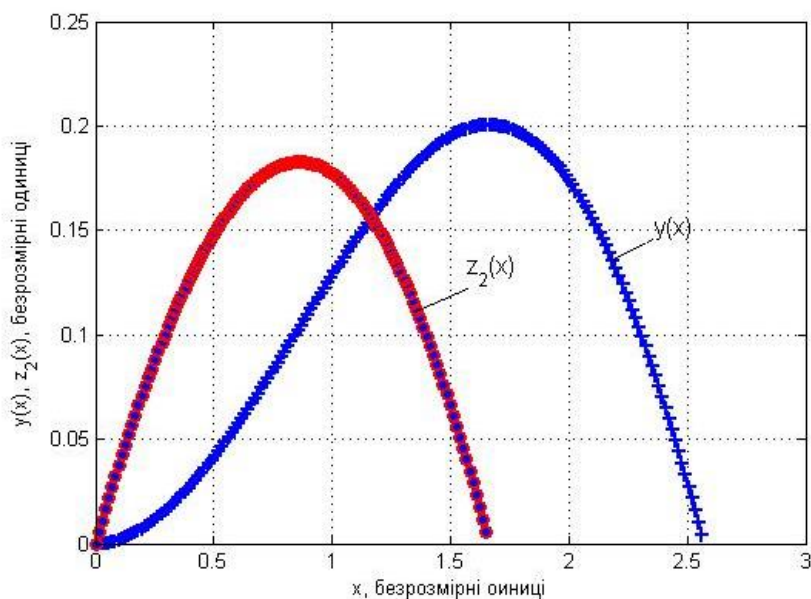


Рисунок 6 – Зміна функцій $y(x)$ і $z_2(x)$

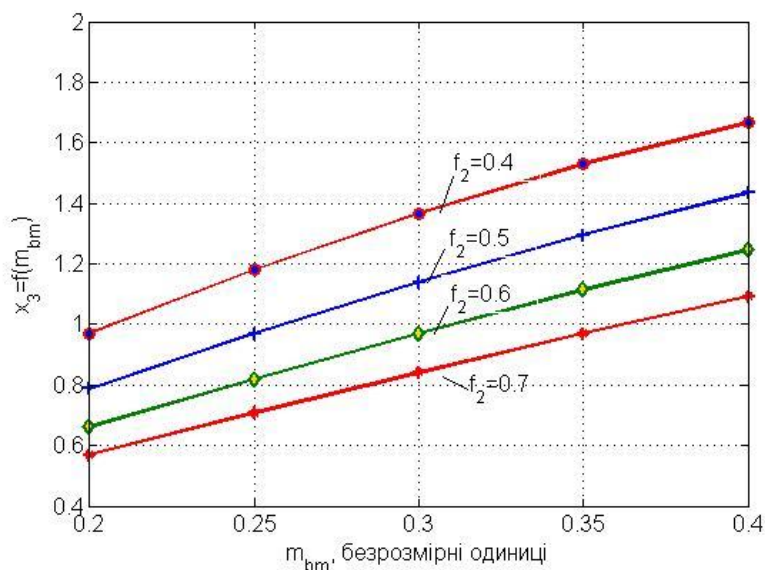


Рисунок 7 – Зміна величини прогину x_3 як функції величин $m_{bm}(0)$ і f_2

За результатами обчислень, які відображені на рис. 6, і рис. 7 синтезовані такі емпіричні моделі:

$$\pi = a_0 + a_1 m_{bm} + a_2 f_2 + a_3 m_{bm} f_2 + a_4 m_{bm}^2 + a_5 f_2^2, \quad (14)$$

де π - одна із величин \hat{x}_2 або \hat{x}_3 .

Параметри моделі (14) обчислені за методом найменших квадратів, за такою формулою [6]:

$$\bar{a} = M^{-1} F^T \bar{\Pi}, \quad (15)$$

де \bar{a} – вектор параметрів моделі (14); $M = F^T F$ – матриця Фішера; F – матриця, яка складена із функцій при відповідних коефіцієнтах i , які обчислені в «експериментальних» точках (результат розв'язання системи диференціальних рівнянь (11)); $\bar{\Pi}$ – вектор, компоненти якого «експериментальні» значення x_2 або x_3 .

Були отримані такі значення коефіцієнтів моделі (14):

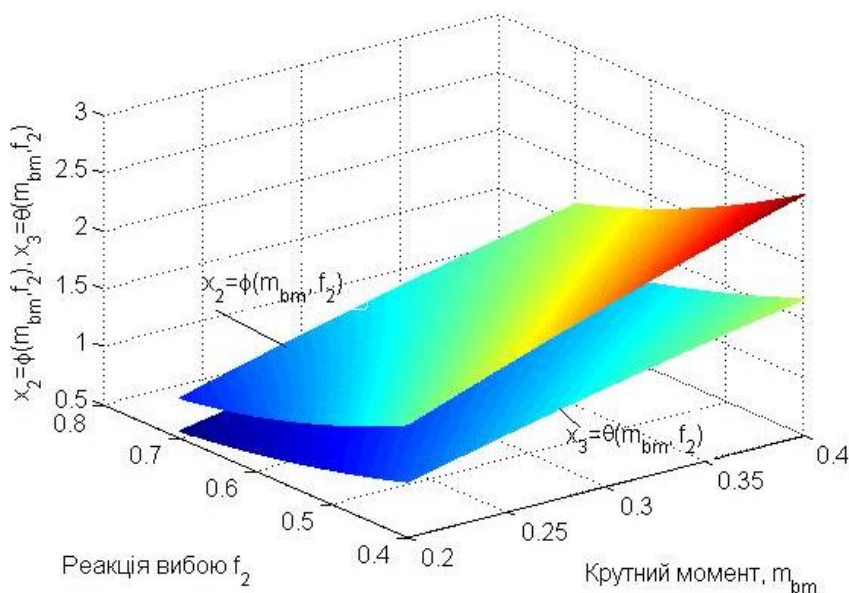


Рисунок 9 – Залежність значень x_2 і x_3 як функції величин m_{bm} і f_2

Число членів емпіричної моделі (17) визначається за такою формулою [8]:

$$L = \frac{(r+n)!}{r!n!}.$$

Серія машинних експериментів показала, що при $r=3$ емпірична модель (17) з високою точністю описує результати даних, які отримані як розв'язок системи диференціальних рівнянь (11). Оскільки $n=3$, то число членів полінома (17) - $L=20$.

Для значень $m_{bm}(0) \in (0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5)$ і $f_2 \in (0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7)$ обчислювались значення y_j , як розв'язок системи диференціальних рівнянь за таким алгоритмом.

Для чергового значення $f_2^{(i)}$ із множини f_2 обчислювались величини y_j для всіх значень $m_{bm}^{(j)}(0)$, що визначені множиною $m_{bm}(0)$. У результаті отримали вектор \bar{Y}_f розмірністю

$$R = \sum_{j=1}^{N_m} R_j, \text{ де } R_j - \text{кількість значень } y_j, \\ i = \overline{1, R_j}, \text{ якщо } f_2 = f_2^{(i)}, \text{ а } m_{bm}^{(j)}(0) \text{ послідовно}$$

приймає значення із множини $m_{bm}(0)$; N_m - потужність множини $m_{bm}(0)$.

Величина y_j є функцією безрозмірного аргументу x . При чисельному розв'язуванні системи рівнянь (11) методом Рунге-Кутта крок інтегрування h є незмінною величиною. Це означає, що величина x змінювала своє значення від 0 до x_f з постійним кроком h . Процес інтегрування закінчувався при виконанні умови $y(x_k) \leq 0$.

Для знаходження значення, при якому $y(x_s) = 0$, починаючи з $y(x_k)$, визначались значення $y(x_{k-1})$ і $y(x_{k-2})$. За отриманими значеннями $y(x_{k-2})$, $y(x_{k-1})$ і $y(x_k)$ будувався поліном Лагранжа другого порядку. Внаслідок отримали квадратне рівняння

$$a_{L,1}x^2 + a_{L,2}x + a_{L,3} = 0,$$

більший додатний корінь якого визначав значення $x_f^{(j)}$, $j = \overline{1, R_j}$.

Параметри моделі (17) при $r=3$ обчислювались за формулою (15), в якій $\bar{P} = \bar{Y}_f$. Для знаходження елементів матриці F формувалась матриця спостережень X , яка

складається із N_f блоків. Для кожного блоку його рядок обчислювався так:

$$\chi_i = \bar{O}_j m_{bm}^{(j)}(0) \bar{O}_j f_2^{(i)} \bar{x}_j; i = \overline{1, N_f},$$

$$j = \overline{1, N_m},$$

де \bar{O}_j – одинична матриця-стовпець розміром R_j ; \bar{x}_j – значення абсцис функції $y(\bar{x}_j)$, яка отримана як результат розв’язування системи диференціальних рівнянь (11) при значеннях $m_{bm}^{(j)}(0)$ і $f_2^{(i)}$; N_f – потужність множини значень f_2 .

У результаті отримали матрицю спостережень розміром $R \times 3$.

З використанням матриці спостережень X формується матриця F , кожний стовпець, якої є значеннями регресу при відповідному коефіцієнті емпіричної моделі (17).

Обчислення елементів матриці F здійснюється за таким алгоритмом. Формується матриця степенів Φ , елементи якої обчислюються за методом [9], при якому одиниця добавляється до вмісту q -розряду вектору n (n – кількість аргументів моделі (17)). У результаті додавання відбувається послідовний перехід одиниці у старший розряд. При досягненні суми $S = k$ ($1 \leq k \leq r$) у нижчому розряді останній обнуляється. Сума елементів кожного рядка матриці Φ не перевищує значення r . Розмір матриці Φ – $L \times n$. Якщо відома матриця степенів Φ поліному (17), то елементи матриці F обчислюються такою формулою:

$$f_{ij} = \prod_{j=1}^n x_j^{\Phi_{ij}}, i = \overline{1, R}, j = \overline{1, L}.$$

Результати досліджень та висновки

У середовищі MatLab створене програмне забезпечення, яке виконує такі процедури:

- розв’язує систему диференціальних рівнянь (11) при значеннях $m_{bm}(0)$ і f_2 , які задані відповідними множинами. При цьому зовнішній цикл формується за індексом i . За результатами обчислень формується матриця спостережень X .

- за описаним вище алгоритмом обчислюється матриця F і відповідно за формулою (15) обчислюються параметри моделі (17).

Таким чином, критичне навантаження на долото при бурінні свердловин визначається двома факторами – довжиною від нейтрального перерізу до вибою свердловини x_2 і значенням x_3 , яке є точкою максимального прогину бурильної колони.

Список використаних джерел

1. Основи нафтогазової справи / Білецький В. С., Орловський В. М., Дмитренко В. І., Похилко В. М. Полтава: ПолтНТУ, Київ: ФОП Халіков Р. Х., 2017. 312 с.
2. Вудс Г., Лубинский А. Искривление скважин при бурении / пер. с англ. М.: Гостехиздат, 1960. 161 с.
3. Тимошенко С. П., Gere Дж. Механика материалов: учебник, 2-е изд. СПб: Лань, 2002. 672 с.
4. Султанов Б. З. Управление устойчивостью и динамикой бурильной колонны. М.: Недра, 1991. 208 с.
5. Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ: навчальний посібник. Івано-Франківськ, 2010. 409 с.
6. Ермаков С. М., Ермаков С. М., Жиглявский А. А. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1987. 320 с.
7. Mikhail I. Gorbichuk, Taras V. Humenyuk [Synthesis Method of Empirical Models Optimal by Complexity under Uncertainty Conditions](#) Journal of Automation and Information Sciences. – vol. 48, is. 9. – P. 64 -74.
8. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Заячук Я. І. Індуктивний метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів природного газу // Нафтова і газова промисловість. 2008. № 5. С. 32 – 35.

References

1. Osnovy naftohazovoyi spravy / Biletskyy V. S., Orlovskyy V. M., Dmytrenko V. I., Pokhylko V. M. Poltava: PoltNTU, Kyiv: FOP Khalikov R. KH., 2017. 312 s.
2. Vuds H., Lubytskyy A. Yskrevlenye skvazhyn pry burenyy / per. s anhl. M.: Hostekhyzdat, 1960. 161 s.
3. Tymoshenko S. P., Here Dzh. Mekhanyka materialov: uchebnyk, 2-e yzd. SPb: Lan, 2002. 672 s.
4. Sultanov B. Z. Upravlenye ustoychivostyu y dynamykoй burylnoy kolonny. M.: Nedra, 1991. 208 s.
5. Horbiychuk M. I., Pistun YE. P. Chyslovi metody i modelyuvannya na EOM: navchal'nyy posibnyk. Ivano-Frankivs'k, 2010. 409 s.
6. Ermakov S. M., Ermakov S. M., Zhyhlyavskyy A. A. Matematycheskaya teoryya optymalnoho éksperymenta. M.: Nauka, 1987. 320 s.
7. Mikhail I. Gorbiychuk, Taras V. Humenyuk Synthesis Method of Empirical Models Optimal by Complexity under Uncertainty Conditions Journal of Automation and Information Sciences. – vol. 48, is. 9. – P. 64 -74.
8. Horbiychuk M. I., Kohutyak M. I., Zayachuk YA. I. Induktyvnyy metod pobudovy matematychnykh modeley hazoperekachuvalnykh ahrehativ pryrodnoho hazu // Naftova i hazova promyslovist. 2008. № 5. S. 32 – 35.

ВИМОГИ ДО ПОДАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рукописи статей, що подаються до університетських науково-технічних журналів, повинні бути актуальними, зрозумілими, повноцінними, виконані 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 містить елементів плагіату (включаючи перевидання статті або її частин, подання одночасно в декілька журналів, використання текстів та ілюстрацій без дозволу їх правовласника) і автоплагіату.

Стаття не містить орфографічних і граматичних помилок. Статтю написано грамотно.

Стаття завершена, не фрагментарна, логічна, не «архівного» чи «статистичного» характеру.

Стаття спрямована на вирішення конкретних цілей і задач нафтогазової проблематики.

Стаття висвітлює 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, сформулювати нові дискусійні теми, відкрити нові перспективи співпраці в науковій галузі.

Авторам настійно рекомендується перевіряти кінцеві варіанти статті на помилки, перш ніж повернути виправлений рукопис до редакції, оскільки врахування запізнілих поправок не гарантується.

Відповідальність за зміст статті і коректність викладеного матеріалу несе автор.

До редакції звичайною поштою надсилаються:

- два примірники рукопису статті (включаючи ілюстрації і таблиці) **українською, російською або англійською** мовами, надруковані на папері формату А4 (210x297 мм);
- довідка про авторів;

До редакції електронною поштою на адресу журналу або он-лайн на сайт університету надсилаються:

Журнал «Методи та прилади контролю якості»

<http://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky>.

E-mail: mmi@nung.edu.ua

Стаття повинна бути структурована за такими пунктами:

1. **Назва статті** відтворює її зміст та привертає увагу наукової аудиторії, в тому числі міжнародну. Містить не більше 12 слів.
2. **Кількість авторів** – не більше 10 (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.
4. **Ключові слова** повинні конкретизувати інформацію про дослідження, але не узагальнювати її. Складаються з 3-6 словосполучень, відокремлені 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...». В тексті вступу відсутні квадратні дужки з більш ніж 3 джерелами.
5. **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**, в яких започатковано вирішення даної проблеми і на які посилається автор.
6. **Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми**, якій присвячується стаття.
7. **Формулювання цілей статті** (постановка задачі і методів досліджень, що розглядаються).
8. **Висвітлення основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням одержаних наукових результатів. Розділ дає змогу побачити, що в дослідженнях виключені всі можливі джерела помилок, автор володіє інформацією про всі чинники, що впливають на результат і максимальне уникає їх.
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 загальноновизнаним нормам нафтогазової галузі.
9. **Висновки** з даного дослідження (наукова новизна, теоретичне і практичне значення) повинні бути:
 - 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;
 - висвітлені перспективи подальшої роботи у даному напрямку;
 - відображено, як результати корелюють з очікуваннями і більш ранніми дослідженнями; вказано чи стаття підтверджує чи спростовує вже існуючі теорії і як дослідження вплинуло на процес збагачення наукових знань.
10. **Список використаних джерел** слід оформити відповідно до правил для авторів, заснованих на ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 "Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання" та ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Також **необхідно подати транслітерацію** літератури, напр. за посиланням ukrlit.org.
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 – 9 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 аналогічно вказати її назву, повну поштову адресу і адресу електронної пошти.

Анотації українською, російською та англійською мовами – кегль (менший від основного тексту статті) – 10, інтервал – 1,0. Повинна містити не менш як 1800 знаків.

Основний текст набирається таким чином:

2.1. Стиль “звичайний”, гарнітура - Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

Текст статті, в якому повинні бути вказані вище елементи, обсягом від 7 сторінок.

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 **Equation v. 3.0.** або Math Type 6,9 Стилі: **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 компонуються 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 компонуються 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 (Сур), кегль 10, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. **Написи в ілюстраціях** виконуються гарнітурою Arial.

Забороняється використовувати абрєвіатуру 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** через translit.kh.ua.

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 трьома мовами з ключовими словами (укр., рос., 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.