

Засновник: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Видавництво: Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

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 Карпаш 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 Пасєка М. С.

д-р техн. наук Рудакова Г. В.

д-р техн. наук Семенов Г. Н.

д-р техн. наук Середюк О. С.

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 Ячук 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. Стецюк, О. О. Роспопа

Електронна верстка

Б. С. Незамай, О. С. Царева,

М. О. Слабінога

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

В. М. Учанін, К. А. Іващенко ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИХ СТАЛЕЙ ЧЕРЕЗ ШАР АНТИКОРОЗІЙНОГО ПОКРИВУ БЕЗ ЙОГО ВИДАЛЕННЯ..... 5

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

М. В. Шавранський, В. С. Борин, І. І. Чигур, Г. Г. Зварич, О. В. Кучмистенко, О. Г. Малько МОДЕЛЬ ПНЕВМОМЕТРИЧНОГО ГУСТИНОМІРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН 15

Х. М. Шинкарук, С. А. Чеховський, Н. М. Піндус ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОКАТАЛІТИЧОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ 25

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

О. Г. Малько, О. В. Кучмистенко, М. В. Шавранський, Т. О. Ваврик, О. С. Царева МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗІСТАТИКИ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ РІДИННОГО МЕНІСКА ТИПУ “ВИСЯЧА КРАПЛЯ” 33

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

В. Б. Біліщук, Р. Т. Боднар, О. Г. Малько ВИБІР МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАФТОВИЛУЧЕННЯ..... 43

О. В. Кучмистенко, М. В. Шавранський, Б. С. Незамай, О. Г. Малько СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ 53

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

<i>І. З. Лютак, З. П. Лютак, А. В. Хамурда</i> ВЕБ-ОРІЄНТОВАНА КОМПОНЕНТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТРУБOPPOBODІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ СПРЯМОВАНИМИ ХВИЛЯМИ	63
<i>Л. О. Потеряйло, В. В. Процюк, К. І. Кравців</i> ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ОБ'ЄМУ ГЕОЛОГО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ	75
<i>В. С. Борин, М. І. Когутяк, М. М. Кучак</i> АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ОСНОВІ МЕТОДУ СТРУКТУРНИХ СХЕМ	93
<i>В. В. Лопатін</i> ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІСКРОБЕЗПЕКИ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КІЛ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ	103
<i>Г. В. Григорчук, Л. І. Григорчук, В. А. Ровінський</i> ОЦІНОЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ОСУШУВАННЯ ЖОМУ	111

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

<i>М. В. Крихівський, В. І. Михайлів, Л. В. Саманів</i> ДИНАМІЧНО ДЕКОМПОЗИЦІЙНИЙ ПІДХІД ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТ	117
<i>Т. О. Ваврик, О. С. Царева, О. Г. Малько, Л. М. Гобир, Н. Д. Подубинська</i> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ СТРУКТУРИ РІДИНИ (РОЗПЛАВУ) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ	125
<i>Т. В. Кривцун, М. О. Слабінога, Я. І. Заячук</i> ВЕБ – ОРІЄНТОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРНИГУ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЄКТАМИ ЗА МЕТОДОЛОГІЄЮ AGILE	132
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ	138

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

№1 (46) 2021
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. Nezamay, 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. Luzhetskiy, 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. Nezamay, O. S. Tsareva,
M. O. Slabinoga

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

V. M. Uchanin, K. A. Ivashchenko DETECTION OF DEFECTS OF STRUCTURES FROM FERROMAGNETIC STEEL THOROUGH THE LAYER OF ATICORROSION COVER WITHOUT REMOVAL 5

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

M. V. Shavranskyi, V. S. Boryn, I. I. Chyгур, H. H. Zvarych, O. V. Kuchmystenko, O. G. Malko MODEL OF PNEUMOMETRIC DENSITY METER FOR MEASURING THE DENSITY OF DRILLING SOLUTIONS OF OIL AND GAS WELLS 15
K. M. Shynkaruk, S. A. Chehovskiy, N. M. Pindus EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMOCATALYTIC METHOD FOR MEASURING THE HEAL OF COMBUSTION OF NATYRAL GAS 25

METHODS AND DEVICES OF FLOW MEASUREMENT OF LIQUID AND GASEOUS PHASES

O. G. Malko, O. V. Kuchmystenko, M. V. Shavranskyi, T. O. Vavruk, O. S. Tcareva SIMULATION OF QUASISTATICS OF THE PROCESS FORMATION A LIQUID MENISK TYPE OF HANGIN DROP ON THE SUBJECT OF METODOLOGICAL PROVISION OF MEASUREMENT 33

METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

V. B. Bilishchuk, R. T. Bodnar, O. G. Malko SELECTION METHODS AND MEANS OF RESEARCH OF SURFACE PROPERTIES OF SOLUTIONS OF SURFACTANTS FOR INTENSIFICATION OF OIL EXTRACTION 43
O. V. Kuchmystenko, M. V. Shavranskyi, B. S. Nezamay, O. G. Malko SYNTHESIS OF GAS TURBINE ENGINE CONTROL SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC 53

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

<i>I. Z. Lyutak, Z. P. Lyutak, A. V. Khamurda</i> WEB ORIENTED COMPONENT SYSTEM FOR CONTROL OF PIPELINES BY ULTRASOUND DIRECT WAVES	63
<i>L. O. Poteriailo, V. V. Protsiuk, K. I. Kravtsiv</i> ENSURING THE QUALITY AND VOLUME OF GEOLOGICAL –TECHNOLOGICAL DATA FOR APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS KNOWLEDGE-ORIENTED SYSTEM.	75
<i>V. S. Borun, M. I. Kogutyak, M. M. Kuchak</i> AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS DRILLING WELLS ON THE BASIS OF THE METHOD OF STRUCTURAL SCHEMES	93
<i>V. V. Lopatin</i> ENSURING INTRINSIC SAFETY OF LOW-VOLTAGE MEASURING CIRCUITS IN COAL MINES	103
<i>H. V. Hrygorchuk, L. I. Hrygorchuk, V. A. Rovinskiy</i> EVALUATION CHARACTERISTICS OF THE BAGASSE DRYING PROCESS	111

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE UNDESTROYED CONTROL PROBLEMS

<i>M. V. Krykhyivskiy, V. I. Mukhailiv, L. V. Samaniv</i> DYNAMIC DECOMPOSITIONAL APPROACH TO LEVEL ASSESSMENT ENVIRONMENTAL SAFETY OF CITIES.....	117
<i>T. O. Vavruk, O. S. Tcareva, O. G. Malko, L. M. Hobur, N. D. Podubinska</i> THE MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE STRUCTURE OF LIQUIT (MELT) USING DISTRIBUTION FUNCTIONS.....	125
<i>T. V. Kryvstun, M. O. Slabinoga, Ya. I. Zayachuk</i> WEB-ORIENTED SYSTEM FOR MONITORING AND MANAGEMENT OF AGILE METODOLOGY PROJECTS	132
REQUIREMENTS FOR THE ARTICLE.....	138

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.14

DOI 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-5-14

ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИХ СТАЛЕЙ ЧЕРЕЗ ШАР АНТИКОРОЗІЙНОГО ПОКРИВУ БЕЗ ЙОГО ВИДАЛЕННЯ

В. М. Учанін, К. А. Іващенко*

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
79060 м. Львів, вул. Наукова, 5, тел.: 0322296166, e-mail: vuchanin@gmail.com*

Чутливість виявлення тріщин у виробах із ферромагнітних сталей вихрострумовим методом часто зменшується через додаткові завади, що виникають від магнітних та структурних неоднорідностей матеріалу. У цій роботі проаналізовано методи, запропоновані для виявлення дефектів у виробах із ферромагнітних сталей. Один із можливих підходів заснований на додатковому намагнічуванні контрольованої зони для мінімізації впливу магнітної неоднорідності. Інша тенденція основана на використанні селективних вихрострумових перетворювачів. Представлені вище проблеми контролю ферромагнітної сталі можуть бути вирішені за допомогою вихрострумових перетворювачів подвійного диференціювання. Ці перетворювачі були розроблені кілька десятиліть тому і характеризуються специфічним квазіабсолютним сигналом з максимальною амплітудою, коли перетворювач знаходиться безпосередньо над тріщиною. Для таких перетворювачів властиві: висока чутливість до подовжених (типу тріщина) та до локальних (типу пітинг або пора) дефектів; висока чутливість до поверхневих і прихованих дефектів під час контролю через захисний покриття; висока глибина контролю для низькочастотних перетворювачів. У цій роботі досліджували можливість виявлення тріщин через антикорозійний діелектричний покриття. Побудовано діаграми для оцінювання граничних товщин діелектричного покриття для виявлення дефектів залежно від їх глибини. Для контролю об'єктів із великими габаритними розмірами (таких як трубопроводи, поковки тощо) розроблено багатоелементний ВСП типу EDDYLINE. Для досягнення високої продуктивності контролю досягнуто ширину зони чутливості близько 60 мм. При цьому забезпечено високу локальність, оскільки всі окремі ВСП працюють незалежно. Розроблені технології контролю з використанням ВСП типу EDDYLINE успішно використані для виявлення тріщин у поковках ферромагнітних та нержавіючих сталей.

Ключові слова: вихрострумовий метод, дефектоскоп, перетворювач подвійного диференціювання, тріщина, чутливість, завади, продуктивність контролю.

Чувствительность обнаружения трещин в изделиях из ферромагнитных сталей вихретоковым методом часто уменьшается из-за дополнительных помех, возникающие из-за магнитных и структурных неоднородностей материала. В этой работе проанализированы несколько методов, предложенных для выявления дефектов в изделиях из ферромагнитных сталей. Один из возможных подходов основан на дополнительном намагничивании зоны контроля для минимизации влияния магнитной неоднородности. Второй подход основан на использовании селективных вихретоковых преобразователей. Представленные выше проблемы контроля ферромагнитной стали можно решать с помощью вихретоковых преобразователей двойного дифференцирования. Эти преобразователи были разработаны несколько десятилетий назад и характеризуются специфическим квазиабсолютным сигналом с максимальной амплитудой, когда преобразователь находится непосредственно над трещиной. Таким преобразователям свойственна: высокая чувствительность к удлиненным (типа трещина) и локальным (типа питтинг или пора) дефектам; высокая чувствительность к поверхностным и скрытым подповерхностным дефектам при контроле через защитное покрытие; большая глубина контроля для низкочастотных преобразователей. В этой работе исследовалась возможность обнаружения трещин через антикоррозионное покрытие. Построены диаграммы для оценки предельных толщин диэлектрического покрытия для выявления дефектов в зависимости от их глубины. Для контроля объектов с большими габаритными размерами (таких как трубопроводы, поковки и т.п.) разработан многоэлементный ВСП типа EDDYLINE. Для достижения высокой производительности контроля достигнуто ширину зоны чувствительности около 60 мм. При этом обеспечено высокую локальность, поскольку все

отдельные ВСП работают независимо. Разработанные технологии контроля с использованием ВСП типа EDDYLINE успешно использованы для выявления трещин в поковках из ферромагнитных и нержавеющей сталей.

Ключевые слова: вихретоковый метод, дефектоскоп, преобразователь двойного дифференцирования, трещина, чувствительность, помехи, производительность контроля.

The detection of the cracks in ferromagnetic steel components by the eddy current method is formidable because of the additional noise originated from magnetic and structural heterogeneities of the inspected material. In this paper, several techniques proposed for the detection of the defects in ferromagnetic steel components are analyzed. One of the possible approaches is based on the additional magnetization of the inspected zone to minimize magnetic heterogeneity. Another trend is concerned with new selective EC probe development. This inspection problem is exercisable by the double differential EC probes application. These probes were developed some decades ago and are characterized by a specific quasi-absolute signal with maximum amplitude when the probe is situated directly over a crack. The main features of such probes can be characterized with: high sensitivity to elongated (like crack) and to local (like pitting or pore) defects; high sensitivity to surface and subsurface defects through the protective coating or with large clearance between the probe and inspected surface; high penetration for low-frequency probes; high lift-off noise suppression. In this study the possibility to detect the cracks through the anticorrosive coating was investigated. Special detectability diagrams were created to estimate the ultimate thicknesses of dielectric coating for the detection of the defects with different depths. For inspection of the objects with large overall dimensions (like tubes, forgings, etc.) array type EC probe (named EDDYLINE) was developed. High sensitivity width (near 60 mm) was achieved to obtain high inspection productivity. At the same time, the high locality was provided because all EC probes are operated separately. Developed EC inspection techniques based on the EDDYLINE type EC probe were successfully applied for the detection of cracks in ferromagnetic and stainless steel tube forgings.

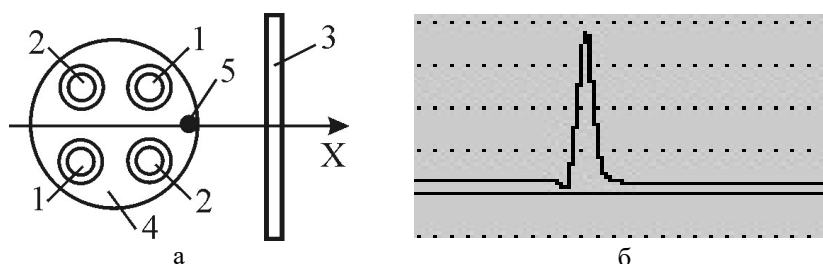
Keywords: eddy current method, flaw detector, double differential probe, crack, sensitivity, noise, inspection productivity

Вступ. Феромагнітні сталі широко застосовуються в багатьох конструкціях, серед яких до найбільш відповідальних можна віднести трубопроводи для транспортування нафти чи газу, залізничні осі і колеса та вали турбін. Дефекти різного походження, зокрема втомні та стрес-корозійні тріщини, що виникли внаслідок впливу експлуатаційних чинників можуть суттєво зменшити надійність конструкцій і призвести до передчасних відмов та аварій. Тому своєчасне виявлення дефектів у феромагнітних сталях надзвичайно важливе і актуалізує введення періодичного експлуатаційного моніторингу конструкцій засобами неруйнівного контролю (НК).

Для виявлення поверхневих дефектів у різних виробках із феромагнітних матеріалів широко використовується магнітопорошковий (МП) метод НК. Основними причинами популярності МП методу є порівняно проста процедура контролю та можливість контролю виробів складної форми. В той же час МП метод має багато обмежень, пов'язаних з низькою продуктивністю через трудомісткі операції попереднього очищення поверхні, намагнічування деталі, нанесення та подальше видалення магнітної суспензії (або порошку),

розмагнічування деталей після контролю тощо [1,2]. Крім того, МП метод має низьку надійність у виробничих умовах через людський фактор та суттєвий вплив якості підготовки контрольованої поверхні на результати контролю. Іншими недоліками МП методу є витрати на розхідні матеріали та неможливість оцінювання глибини дефекту. Проблеми застосування МП методу суттєво збільшуються у випадку контролю деталей, покритих антикорозійними покриттями товщиною більше 0,3 мм. Ці недоліки МП методу спонукають пошук надійніших методів виявлення дефектів у феромагнітних сталевих конструкціях.

1. Вихрострумний контроль виробів із феромагнітних сталей (короткий огляд). Вихрострумний (ВС) НК широко застосовується для виявлення та оцінювання небезпечних дефектів у відповідальних конструкціях та виробках [1, 3-6]. Історично ВС метод спочатку використовували в авіаційній галузі для перевірки деталей простої форми, виготовлених з неферомагнітних матеріалів [1]. Але з часом метод все ширше використовується для НК конструкцій і виробів із феромагнітної сталі. У той же час ВС контроль конструкцій із феромагнітних сталей часто ускладнюється



1 і 2 – збуджувальна і вимірювальна обмотки відповідно; 3 – тріщина; 4 – корпус ВСП;
 5 – позначка і «квазіабсолютний» сигнал від тріщини (б)

Рисунок 1 – Оптимальна орієнтація ВСП (а) під час виявлення тріщин (вид зверху)

через додаткові завади, що виникають під впливом магнітних та структурних неоднорідностей матеріалу. Для деяких феромагнітних сталей ці завади є достатньо великими, щоб суттєво обмежувати можливість ВС контролю.

В науковій літературі дискутується декілька підходів щодо заглушення згаданих вище специфічних завад. Перший спосіб полягає у додатковому намагнічуванні об'єкта контролю (ОК). Виявлено, що феромагнітні матеріали можна контролювати шляхом магнітного насичення матеріалу для усунення завад, пов'язаних зі змінами магнітної проникності [7-11]. Але цей підхід може створювати обмеження через вплив статичного магнітного поля на феритові осердя вихрострумове перетворювача (ВСП), яке негативно впливає на їх чутливість. Інший підхід може бути реалізований на основі створення селективних ВСП.

Згідно з нашим досвідом, проблему ВС контролю виробів із феромагнітних сталей можна вирішити шляхом використання ВСП подвійного диференціювання, які розроблено нами кілька десятиліть тому [12]. Ці ВСП складаються з двох однакових збуджувальних обмоток 1 та двох однакових вимірювальних обмоток 2, які розташовані у кутах квадрату (рис. 1, а). Дві обмотки збудження з'єднано послідовно та орієнтовано для створення однакових та протилежних первинних електромагнітних полів. Така конструкція ВСП подвійного диференціювання утворює особливість у розподілі первинного електромагнітного поля та вторинного поля, створюваного вихровими струмами в бездефектних та ізотропних ОК. Ця особливість полягає в існуванні нейтральної площини, в якій

вертикальна складова результуючого електромагнітного поля дорівнює нулю [12]. Вимірювальні обмотки орієнтовано чутливими до вертикальної складової електромагнітного поля і встановлено у нейтральній площині, де ця складова дорівнює нулю. Завдяки зустрічному з'єднанню вимірювальних обмоток реалізовано подвійно-диференційний характер вихідного сигналу ВСП. Розроблені ВСП встановлюють у циліндричний корпус із алюмінієвого сплаву для зменшення рівня електронних завад і забезпечують з'єднувачами різного типу. ВСП подвійного диференціювання характеризуються спрямованою чутливістю під час виявлення видовжених (як тріщина) дефектів. Оптимальна орієнтація ВСП відносно напрямку тріщини показана на рис. 1а. Спеціальна позначка на корпусі ВСП допомагає вибрати орієнтацію максимальної чутливості. Під час сканування зони тріщини ці ВСП створюють специфічний «квазіабсолютний» сигнал з максимальною амплітудою сигналу за його розташування безпосередньо над тріщиною (рис. 1б) подібно до будь-якого ВСП абсолютного типу. Для локальних дефектів ці ВСП створюють специфічний просторовий розподіл сигналу у вигляді чотирьох пелюсток з двома позитивними та двома негативними зонами чутливості [12].

Проведені раніше дослідження показали, що ВСП подвійного диференціювання мають низку позитивних властивостей, зокрема: високу чутливість до видовжених (типу тріщина) та до локальних (типу корозійний пітинг або пора) дефектів; можливість проводити контроль через діелектричний покрив або з великим зазором між ВСП та поверхнею ОК; високу глибину контролю (для низькочастотних ВСП); відстроювання від

впливу зміни зазору під час сканування і низький рівень завад [1, 12-14]. Розроблено низку ВСП подвійного диференціювання різних розмірів (від 4 до 33 мм), що відрізняються розмірами обмоток, діапазоном робочих частот та просторовою роздільною здатністю. Усі вказані параметри ВСП оптимізовані для конкретних ОК, типів дефектів і заданого порогу чутливості. Ці ВСП показали свою ефективність під час розробки нових технологій ВС контролю на залізничному транспорті, в енергетиці, авіації, хімічній промисловості тощо [6,12,15,16].

У роботі [6] ВС метод з використанням ВСП подвійного диференціювання порівнювали з МП методом. Ці дослідження показали можливість заміни МП методу ефективнішим ВС методом, додатковими перевагами якого є можливість автоматизації процедур контролю та оцінки розмірів виявлених тріщин. У цій роботі представлено дві автоматизовані багатоканальні системи для комбінованого (ультразвукового та ВС) контролю виробів із феромагнітної сталі. Перша система призначена для контролю залізничних осей під час їх виробництва. Друга - для НК залізничних колісних пар після тривалої експлуатації на ремонтних заводах. Показано, що завдяки використанню ВС методу продуктивність розроблених систем у 8-10 разів вища, ніж продуктивність систем, заснованих на МП методі.

2. Виявлення прихованих дефектів через діелектричний покрив. Виявлення прихованих дефектів через діелектричний покрив важливе для практики, зокрема для виявлення дефектів трубопроводів. Очевидно, що діелектричний покрив послаблює сигнал ВСП, обумовлений дефектом, і це призводить до ще більшого зростання проблеми виявлення дефектів у феромагнітних сталях. Дослідження чутливості ВСП подвійного диференціювання проводили з використанням зразка із феромагнітної сталі СТ45 з гладкою А ($R_a - 1,25$ мкм) і шорсткою В ($R_z - 160$ мкм) поверхнями (рис. 2). Шорсткість поверхні В імітували сіткою (крок 1,0 мм) прорізів завширшки 0,5 мм і завглибшки 0,16 мм. Штучні дефекти виконали електроерозійним методом у вигляді паців завширшки 0,1 мм і завглибшки 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 і 2,0 мм на поверхні А і завглибшки 0,6; 1,5 і 3,0 мм на поверхні В на всю ширину зразка (30 мм).

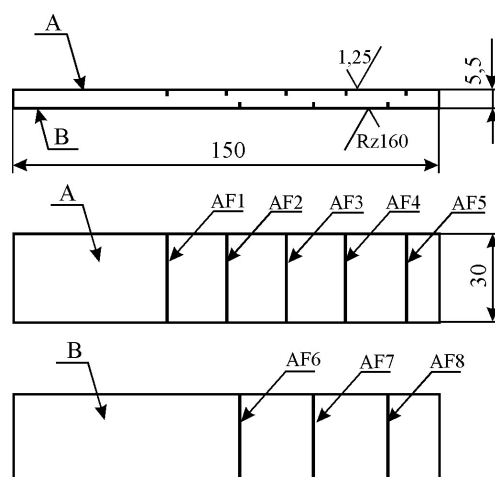


Рисунок 2 – Зразок з штучними дефектами типу тріщина різної глибини

Сигнали ВСП типу МДФ 1201 і МДФ 0601 (з діаметром робочої поверхні 12,5 та 6,0 мм відповідно) реєстрували у режимі ручного сканування у комплексній площині (рис. 3а,в та рис. 4а,в) та у режимі часової розгортки (рис. 3б,г та рис. 4б,г) за допомогою вихрострумової плати EDDYMAX. В результаті всі згадані вище штучні дефекти на гладкій і шорсткій поверхнях зразка були виявлені з достатньо високим співвідношенням сигнал/завада, що підтверджує високу чутливість і селективні властивості ВСП щодо шорсткості контрольованої поверхні.

Сигнали ВСП типу МДФ 1201, отримані від дефектів завглибшки 0,5; 1,0 і 2,0 мм на робочій частоті 30 кГц за безпосереднього контакту із контрольованою поверхнею і через діелектричну пластину завтовшки 5,0 мм, подано на рис. 3. Тут використано різне підсилення сигналу і контроль через пластину проводили з чутливістю на 36 дБ більшою.

Наведені результати (рис. 3) показують, що ВСП типу МДФ 1201 може виявити дефекти завглибшки 0,5 мм через діелектричну пластину завтовшки 5,0 мм з досить високим співвідношенням сигнал/завада. Таке високе співвідношення сигнал/завада показує, що така товщина діелектричного покриву не є граничною. Можна спостерігати також деякі відмінності за амплітудою і фазовим кутом сигналу від дефектів різної глибини (рис. 3а,в).

Сигнали ВСП типу МДФ 0601, отримані від дефектів завглибшки 0,2; 0,5 і 1,0 мм на робочій частоті 100 кГц за безпосереднього контакту з контрольованою поверхнею і через

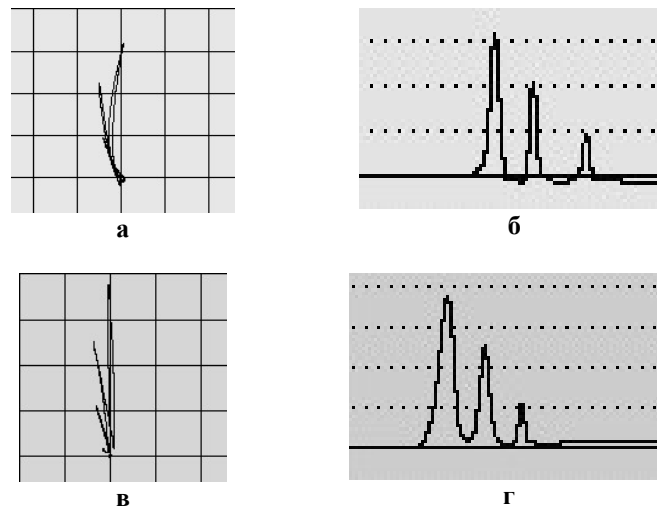


Рисунок 3 – Сигнали ВСП типу МДФ 1201 від дефектів завглибшки 0,5; 1,0 і 2,0 мм у комплексній площині (а,в) і в режимі часової розгортки (б,г) за безпосереднього контакту з поверхнею ОК (а,б) та через діелектричну пластину завтовшки 5,0 мм (в,г)

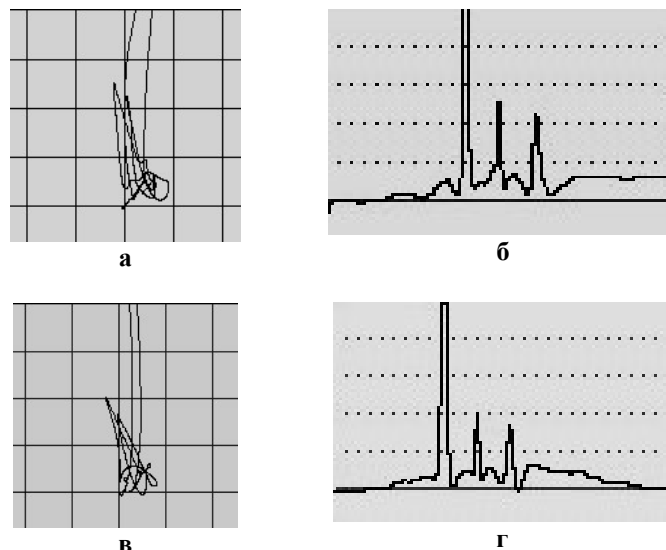


Рисунок 4 – Сигнали ВСП типу МДФ 0601 від дефектів завглибшки 0,2; 0,5 і 1,0 мм в комплексній площині (а,в) і режимі часової розгортки (б,г) за безпосереднього контакту з поверхнею ОК (а,б) і через діелектричну пластину завтовшки 2,5 мм (в,г)

діелектричну пластину завтовшки 2,5 мм подано на рис. 4. Тут також використано різне підсилення сигналу і контроль через пластину проводився з чутливістю на 36 дБ більшою.

Ці результати (рис. 4) показують, що ВСП типу МДФ 0601 виявляє дефекти завглибшки 0,2 мм через діелектричний покрив завтовшки 2,5 мм. Тут також можна спостерігати різницю у фазовому куті та амплітуді (рис. 4а,в) для дефектів різної глибини. Зазначимо, що ВСП типу МДФ 0601 має невеликі розміри (лише 6

мм), що забезпечує високу роздільну здатність, і є ефективним для контролю зон з малою кривизною поверхні.

Робоча частота ВС контролю суттєво впливає на можливості виявлення дефектів через шар діелектричного покриву. На рис. 5 подано сигнали ВСП типу МДФ 0601 у комплексній площині і в режимі часової розгортки від дефекту найменшої глибини 0,1 мм через діелектричну пластину завтовшки 2,5 і 1,5 мм на робочих частотах 40 кГц (а) і завтовшки 1,5 мм

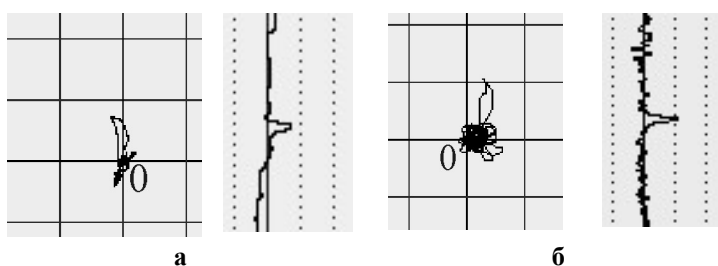


Рисунок 5 – Сигнали від дефекту завглибшки 0,1 мм через діелектричні пластини завтовшки 2,5 мм на частоті 40 кГц (а) і завтовшки 1,5 мм на частоті 400 кГц (б)

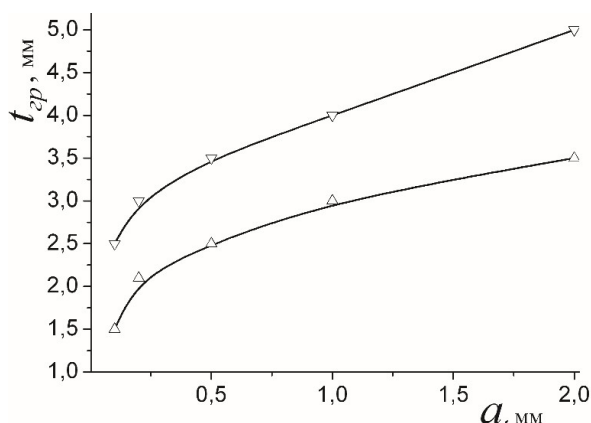


Рисунок 6 – Залежності граничних товщин діелектричного покриття t_{zp} від глибини a дефекту типу тріщина для робочих частот 40 (∇) та 400 кГц (Δ)

на частоті 400 кГц (б). Ці товщини діелектричних покриттів шляхом експертної оцінки визначені як граничні товщини t_{zp} для цих робочих частот

Таким чином, найменший дефект завглибшки 0,1 мм можна виявити через діелектричне покриття завтовшки 2,5 мм за допомогою ВСП типу МДФ 0601 тільки на робочій частоті 40 кГц. Очевидно, що глибші дефекти можна виявляти через покриття більшої товщини.

Для оцінювання можливості виявляти дефекти певної глибини через шар діелектричного покриття доцільно побудувати діаграми залежності граничних товщин t_{zp} діелектричного покриття, через які ще можна виявити дефект відповідної глибини з достатнім співвідношенням сигнал/завада. Для побудови такої діаграми для ВСП типу МДІ 0601 реєстрували його сигнали під час сканування зони дефекту через діелектричні пластини різної товщини (від 0,1 до 2,0 мм). Для кожної глибини дефекту a в діапазоні від 0,1 до 2,0 мм були виявлені граничні товщини t_{zp} (тобто дефекти були виявлені з достатнім

співвідношенням сигнал/завада, як показано на рис. 5). Очевидно, що гранична товщина t_{zp} діелектричного покриття обмежує можливість виявлення дефекту залежно від його глибини a та робочої частоти. Залежності граничної товщини t_{zp} від глибини дефекту для ВСП типу MDF 0601 на робочих частотах 40 та 400 кГц подано на рис. 6.

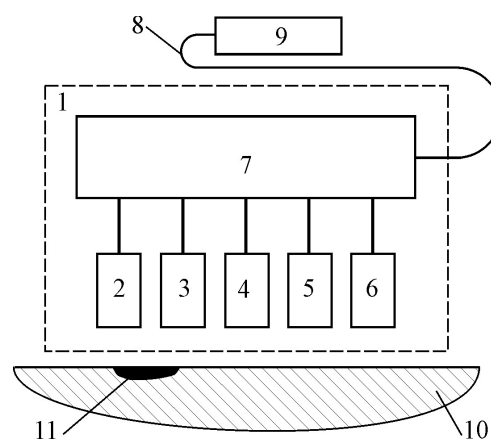
Як видно з діаграм на рис. 6, можливість виявлення дефектів через діелектричний покриття істотно вища, коли застосовується нижча робоча частота (40 кГц), що пов'язано з меншим загасанням електромагнітного поля збудження на цій частоті. Для цієї частоти найменший дефект завглибшки 0,1 мм можна виявити через діелектричний покриття завтовшки 2,5 мм. Дефект завглибшки 2,0 мм можна виявити через покриття завтовшки 5,0 мм. Отримані діаграми (рис. 6) дозволяють оцінити поріг чутливості вибраних ВСП і робочих частот у випадках, коли дефекти необхідно виявляти через діелектричний покриття відомої товщини. В інших випадках товщину захисного покриття необхідно виміряти (наприклад, вихрострумовим товщиноміром [1]).

3. Підвищення продуктивності контролю на основі розробки багатоелементних ВСП.

Збільшення продуктивності контролю важливе для зменшення виробничих витрат, так як НК великогабаритних конструкцій вимагає багато часу через відносно малий розмір ВСП, необхідний для чутливого та надійного контролю. У деяких випадках для підвищення продуктивності контролю використовують ВСП з видовженими зонами чутливості. Але такі ВСП не забезпечують вимог щодо чутливості через дуже низьку роздільну здатність. Найкращої продуктивності можна досягнути за допомогою застосування ВС систем контролю з багатоелементним ВСП, елементи якого мультиплексуваням по чергово підключаються до дефектоскопу [17, 18]. Але такі системи є дуже дорогими та складними для перестроювання для НК виробів різної форми. Нашою метою було створити багатоелементний ВСП, що відрізняється високою чутливістю та просторовою роздільною здатністю у поєднанні з розширеною зоною контролю та можливістю роботи з недорогими одноканальними ВС дефектоскопами.

В результаті розроблено новий багатоелементний ВСП трансформаторного типу (названий нами EDDYLINE), який складається із 5 окремих ВСП, з'єднаних за допомогою спеціальної комутаційної схеми. Схему контролю за допомогою такого ВСП подано на рис. 7. Усі окремі ВСП реалізовано за схемою ВСП подвійного диференціювання, що дозволяє отримати високу чутливість (у тому числі під час контролю через діелектричний покрив) у поєднанні з низьким рівнем завад. Таке технічне рішення забезпечує зону чутливості довжиною приблизно 60 мм. В той же час досягнуто високу роздільну здатність, так як кожний окремий ВСП працює незалежно, як і до з'єднання в загальний блок.

Дослідження багатоелементного ВСП проведено на зразку зі сталі Ст 45 з штучними дефектами типу тріщина завглибшки 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 і 2,0 мм (рис. 2). На рис. 8а подано сигнали трансформаторного багатоелементного ВСП для випадку, коли тільки один окремий ВСП проходить через зону штучних тріщин завглибшки 0,1 і 0,2 мм, а інші чотири окремі ВСП знаходяться за межами зразка (у «повітрі»). Наступні дефектограми (рис. 8б і 8в)



1 – багатоелементний ВСП; 2...6 – окремі ВСП;
 7 – комутаційна схема; 8 – кабель; 9 – вихрострумівий дефектоскоп; 10 – ОК; 11 – тріщина

Рисунок 7 – Схема побудови п'ятиелементного ВСП трансформаторного типу EDDYLINE

показують сигнали, коли, відповідно, два або три окремих ВСП проходять зону цих дефектів одночасно. Подані результати показують, що можливий ефект «самокомпенсації» для довгих дефектів відсутній. Навпаки, кожний додатковий ВСП, який пересікає зону видовженого дефекту, збільшує амплітуду сигналу від дефекту пропорційно до кількості таких ВСП.

Розроблений багатоелементний ВСП трансформаторного типу успішно використано для виявлення поверхневих тріщин великогабаритних поковок і зварних трубних конструкцій із феромагнітних і аустенітних сталей [19]. Такі дефекти у поковках, зазвичай, виявляють ультразвуковим, МП або ВС методами. Наш практичний досвід показав, що найнадійніші результати можна отримати ВС методом з застосуванням ВСП подвійного диференціювання. Багатоелементний ВСП типу EDDYLINE використовували з дефектоскопом типу ELOTTEST V300 німецької фірми Rohmann GmbH. Для настроювання із матеріалу поковок виготовлено стандартний зразок з штучними електроерозійними дефектами довжиною 10 мм завглибшки 0,2; 0,3 і 0,5 мм (рис. 9а). На рис. 9б представлено сигнали в комплексній площині екрану дефектоскопа ELOTTEST V300 від найменшого дефекту глибиною 0,2 мм у феромагнітній сталі та сигнал від зміни зазору (підйому ВСП на висоту більше 50 мм) на робочій частоті 200 кГц.

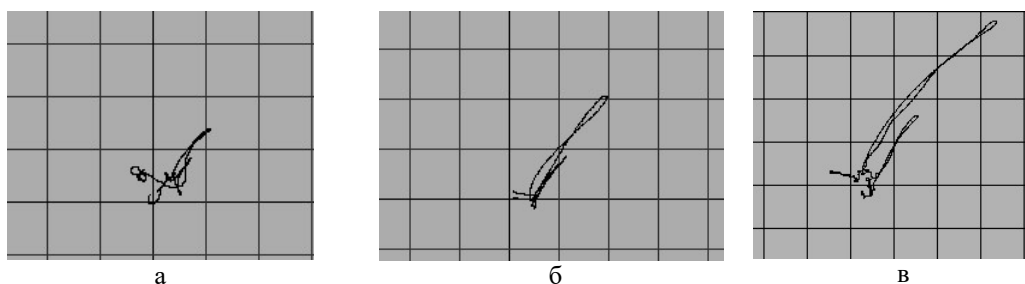


Рисунок 8 – Сигнали п'ятиелементного ВСП під час взаємодії з тріщиною завглибшки 0,1 і 0,2 мм 1-го (а), 2-х (б) та 3-х (в) окремих ВСП

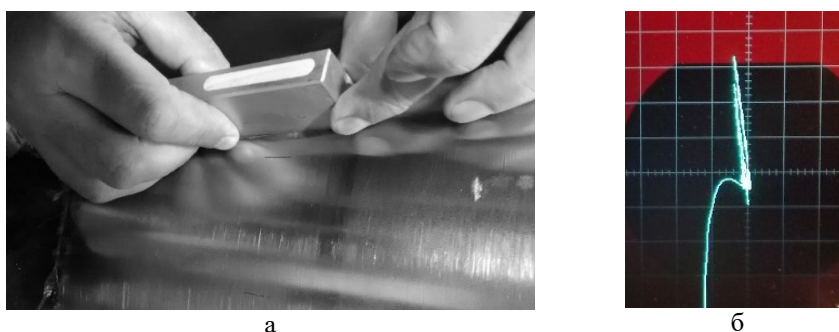


Рисунок 9 – Багатоелементний ВСП типу EDDYLINE на зразку у вигляді фрагменту поковки (а) та сигнали (б) від дефекту завглибшки 0,2 мм (вниз) і зміни зазору (вгору)

Представлені на рис. 9 результати демонструють високу чутливість з можливістю чіткого розрізнення сигналів від дефектів та сигналів від зміни зазору ВСП під час сканування за їх різним напрямком у комплексній площині, що дає суттєве підвищення достовірності контролю. ВСП типу EDDYLINE були успішно використані для контролю великогабаритних поковок з використанням дефектоскопа типу ELOTEST В300, що дозволило збільшити продуктивність ручного контролю в 4... 5 разів.

Висновки

Проаналізовано особливості ВС методів дефектоскопії виробів із феромагнітних сталей. Представлено селективні ВСП подвійного диференціювання, які характеризуються, зокрема: високою чутливістю до видовжених (типу тріщина) та до локальних (типу пітинг або пори) дефектів; високою чутливістю до дефектів під час контролю через шар діелектричного покриття.

Представлено результати досліджень, пов'язаних із використанням ВСП подвійного диференціювання для виявлення дефектів через шар діелектричного покриття без його

видалення. Для оцінювання можливості виявляти дефекти через шар антикорозійного діелектричного покриття запропоновано спеціальні діаграми, які визначають залежність граничної товщини діелектричного покриття від глибини дефекту, що необхідно виявити.

Для ВС контролю великогабаритних об'єктів розроблено багатоелементний ВСП типу EDDYLINE, який забезпечує можливість роботи з одноканальними ВС дефектоскопами. Це дозволило збільшити до 60 мм ширину зони чутливості, що забезпечує високу продуктивність контролю. ВСП типу EDDYLINE були успішно використані, зокрема, для контролю поковок з використанням дефектоскопа типу ELOTEST В300, що дозволило збільшити продуктивність ручного контролю у 4...5 разів.

Список використаних джерел

1. Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. Посібник. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін та ін. Львів: Сполум, 2007. 1068 с.

2. Zolfaghari A., Zolfaghari A. and Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2018. Vol. 33. №3. P. 290-300.

3. Goldberg L. The use of Eddy Current for Ferritic Weld Testing in Nuclear Power plants/ *Materials Evaluation*. 2003. № 12. P. 274-1278.

4. Udpa, S.S., More P.O., eds. (2004). *Nondestructive testing handbook* (third edition), Vol. 5, Electromagnetic testing. American Society for NDT.

5. Uchanin, V.M. Eddy-current flaw detection in structural elements. *Materials Science*. 2006. 42. 494-501. doi.org/10.1007/s11003-006-0106-5.

6. Lutcenko G., Uchanin V., Mischenko V., Opanasenko A. Eddy Currents Versus Magnetic Particles. Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing, 2012. Durban Код доступу: <http://www.ndt.net>.

7. Blitz, J., Oaten S.R. and Hajian, N.T. The testing of ferromagnetic metals with eddy-currents. *Nondestructive Testing Communications*. 1986. №2. P. 189-200.

8. Patent U.S. № 3952315. Eddy current discontinuity probe utilizing a permanent magnet bobbin with at least one A.C. energized coil mounted in a groove thereon Cecco V.S., 1976.

9. Cecco V. S. Design and specifications of a High Saturation Absolute Eddy Current Probe with internal reference. *Materials Evaluation*. 1979. Vol. 37. № 13. P. 51-58.

10. ASTM E309-16. Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products Using Magnetic Saturation. 2016. ASTM International.

11. Патент України № 60751. Вихрострумний перетворювач для контролю конструкцій із ферромагнітних матеріалів // В. Учанін, 2011.

12. Учанін В.М. Накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання. Львів: Сполом, 2013. 268 с.

13. Uchanin, V., Mook, G., Stepinski, T. (2002). "The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing." Proc. 8th European Conf. for Nondestructive Testing. Barcelona. Код доступу: <http://www.ndt.net>.

14. Mook G., Hesse J., Uchanin V. Deep Penetrating Eddy Currents and Probes. *Materials Testing*. 2007. Vol. 49, № 5. P. 258-264. doi.org/10.3139/120.100810.

15. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Opanasenko A. The application of eddy current section in automated system for combined railway rolling stock axles inspection. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Код доступу: <http://www.ndt.net>.

16. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Nikonenko A. Eddy Current Inspection of Steel Castings with Roughly Finished Surfaces. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Код доступу <http://www.ndt.net>.

17. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. Application of eddy current array technology to surface inspection. 18th World Conference on Nondestructive Testing. 2012. Durban, South Africa. Код доступу: <http://www.ndt.net>.

18. International Standard ISO 20339:2017 (E). Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification. Geneva: ISO/TC 135/SC 4, 2017.

19. Uchanin V., Nardoni G. Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*. 2019. 16. P. 198-204. doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041.

References

1. Fracture mechanics and strength of materials. Vol. 9: Strength and durability of airplane materials and structural elements / O.P. Ostash, V.M. Fedirko, V.M. Uchanin et al. Lviv: Spolom, 2007. 1068 p. (in Ukrainian).

2. Zolfaghari A., Zolfaghari A. and Kolahan F. Reliability and sensitivity of magnetic particle nondestructive testing in detecting the surface cracks of welded components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2018. Vol. 33. №3. P. 290-300.

3. Goldberg L. The use of Eddy Current for Ferritic Weld Testing in Nuclear Power plants. *Materials Evaluation*. 2003. № 12. P. 274-1278.

4. Udpa, S.S., More P.O., eds. (2004). *Nondestructive testing handbook* (third edition), Vol. 5, Electromagnetic testing. American Society for NDT.

5. Uchanin, V.M. Eddy-current flaw detection in structural elements. *Materials Science*. 2006. 42. – 494-501. doi.org/10.1007/s11003-006-0106-5.
6. Lutcenko G., Uchanin V., Mischenko V., Opanasenko A. Eddy Currents Versus Magnetic Particles. Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing, 2012. Durban. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.
7. Blitz, J., Oaten S.R. and Hajian, N.T. The testing of ferromagnetic metals with eddy-currents. *Nondestructive Testing Communications*. 1986. № 2. P. 189-200.
8. Patent U.S. № 3952315. Eddy current discontinuity probe utilizing a permanent magnet bobbin with at least one A.C. energized coil mounted in a groove thereon // Cecco V.S., 1976.
9. Cecco V. S. Design and specifications of a High Saturation Absolute Eddy Current Probe with internal reference. *Materials Evaluation*. 1979. Vol. 37. № 13. P. 51-58.
10. ASTM E309-16. Standard Practice for Eddy Current Examination of Steel Tubular Products Using Magnetic Saturation. 2016. ASTM International.
11. Patent № 60751, Ukraine. Eddy current probe for inspection of ferromagnetic steel structures // V. Uchanin, 2011 (in Ukrainian).
12. Uchanin V.M. Surface eddy current probes of double-differential type. Lviv: Spolom, 2013. – 268 p. (in Ukrainian).
13. Uchanin, V., Mook, G., Stepinski, T. (2002). “The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing.” Proc. 8th European Conf. for Nondestructive Testing. Barcelona. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.
14. Mook G., Hesse J., Uchanin V. Deep Penetrating Eddy Currents and Probes // *Materials Testing*. – 2007. – Vol. 49, № 5. – P. 258-264. Kod dostupu: doi.org/10.3139/120.100810.
15. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Opanasenko A. The application of eddy current section in automated system for combined railway rolling stock axles inspection. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.
16. Uchanin V., Lutsenko G., Dzhaganian A., Nikonenko A. Eddy Current Inspection of Steel Castings with Roughly Finished Surfaces. 10 European Conf. on Nondestructive Testing. June 7-10 2010, Moscow. Kod dostupu <http://www.ndt.net>.
17. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. Application of eddy current array technology to surface inspection. 18th World Conference on Nondestructive Testing. 2012. Durban, South Africa. Kod dostupu: <http://www.ndt.net>.
18. International Standard ISO 20339:2017 (E). Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification. Geneva: ISO/TC 135/SC 4, 2017.
19. Uchanin V., Nardoni G. Detection of cracks in ferrous steel structures: new innovative eddy current techniques. *Procedia Structural Integrity*. 2019. 16. P. 198-204. doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.041

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 622.24

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-15-24

МОДЕЛЬ ПНЕВМОМЕТРИЧНОГО ГУСТИНОМІРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ БУРОВИХ РОЗЧИНІВ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

*М. В. Шавранський, В. С. Борин, І. І. Чигур, Г. Г. Зварич, О. В. Кучмистенко,
О. Г. Малько*

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

Розробка автоматичних пневмометричних густиномірів є перспективною не тільки для бурових розчинів. Вони можуть знайти застосування в харчовій, хімічній, нафтопереробній промисловості, на нафтобазах і нафтоосховищах. На їх основі можна будувати системи кількісного обліку рідких продуктів в одиницях маси. Володіючи високою точністю, пневмометричні густиноміри прості та надійні, зручні в експлуатації і, найголовніше, комплектуються із елементів, що серійно випускаються промисловістю. В статті наведена структурна схема диференціального пневмометричного густиноміра з компенсатором баластного тиску в мінусовій пневмолінії та показано розрахунок з якого видно, що основним джерелом похибки є втрати тиску в пневмолініях, дрейф нуля дифманометра, відміна реальних значень коефіцієнтів статичної характеристики дифманометра від номінальних. Вказано на те, що для знаходження значення тиску та витрати в кожній точці пневмолінії, навіть для простих моделей, потрібно робити складні розрахунки. Аналітичний розв'язок може бути отриманий тільки для окремих випадків, які не представляють практичну цінність. Тому для аналізу пневмолінії густиноміра найраціональніше скористатися методом електрогідрравлічної аналогії (ЕГДА) і перейти від пневматичної лінії з розподіленими параметрами до аналогічної електричної з зоредженими параметрами. Нами отримана модель пневмометричного густиноміра у вигляді електричної схеми, яка потребує подальшого дослідження, методами електротехніки, для уточнення коефіцієнтів і параметрів моделі та перевірки її на адекватність.

Ключові слова: пневмометричний густиномір, буровий розчин, похибка, вимірювання, модель, тиск, витрата, рідина.

Разработка автоматических пневмометрических плотномеров является перспективной не только для буровых растворов. Они могут найти применение в пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, на нефтебазах и нефтехранилищах. На их основе можно строить системы количественного учета жидких продуктов в единицах массы. Обладая высокой точностью, пневмометрические плотномеры простые и надежные, удобные в эксплуатации и, самое главное, комплектуются из элементов, серийно выпускаемых промышленностью.

В статье приведена структурная схема дифференциального пневмометрического плотномера с компенсатором балластного давления в минусовой пневмолинии и показан расчет из которого видно, что основным источником погрешности является потери давления в пневмолинии, дрейф нуля манометр, отмена реальных значений коэффициентов статической характеристики манометр от номинальных. Указано на то, что для нахождения значения давления и расхода в каждой точке пневмолинии, даже для простых моделей, нужно делать сложные расчеты. Аналитическое решение может быть получено только для частных случаев, не представляют практическую интерес.

Поэтому для анализа пневмолинии плотномера рационально воспользоваться методом электрогидравлической аналогии (ЭГДА) и перейти от пневматической линии с распределенными параметрами к аналогичной электрической с сосредоточенными параметрами. Нами получена модель пневмометрического плотномера в виде электрической схемы, которая требует дальнейшего исследования,

методами електротехніки, для уточнення коефіцієнтів і параметрів моделі і перевірки її на адекватність.

Ключевые слова: пневмометрические плотномеры, буровой раствор, погрешность, измерения, модель, давление, расход, жидкость.

The development of automatic pneumometric densitometers is promising not only for drilling fluids. They can be used in the food, chemical, refining, oil depots and storage facilities. Based on them, you can build systems for quantitative accounting of liquid products in units of mass. Possessing high accuracy, pneumometric densitometers are simple and reliable, convenient in operation and, most importantly, are completed with the elements serially issued by the industry.

The article presents a block diagram of a differential pneumometric densitometer with ballast pressure compensator in the minus pneumoline and shows the calculation which shows that the main source of error is the pressure loss in the pneumolines, zero drift of the differential pressure gauge, cancellation of real values of static coefficients from differential. It is pointed out that in order to find the value of pressure and flow at each point of the pneumoline, even for simple models, it is necessary to make complex calculations. An analytical solution can only be obtained for individual cases that are of no practical value.

Therefore, for the analysis of a pneumoline of a densitometer it is most rational to use a method of electrohydraulic analogy (EGDA) and to pass from a pneumatic line with the distributed parameters to similar electric with rarefied parameters. We obtained a model of a pneumometric densitometer in the form of an electrical circuit, which requires further research, electrical engineering methods, to clarify the coefficients and parameters of the model and check its adequacy.

Key words: pneumometric densitometer, drilling mud, error, measurement, model, pressure, flow, liquid.

Підвищення ефективності процесу буріння багато в чому визначається скороченням часових, матеріальних і трудових затрат на ліквідацію аварій, зокрема аварій, пов'язаних з флюїдопроявами. Зниження числа вказаних аварій можливе при вирішенні задачі оперативного контролю параметрів промивної рідини на вході і виході свердловини. Одним із основних контрольованих параметрів процесу буріння нафтогазових свердловин є густина бурових розчинів [1].

Складність розв'язку цієї задачі обумовлена вимогами вимірювання густини на потоці з абсолютною похибкою 10 кг/м^3 в діапазоні густин $800 \div 2600 \text{ кг/м}^3$.

Задача побудови автоматичних густиномірів з такими характеристиками є перспективною та актуальною, оскільки при зниженні абсолютної похибки вимірювання до $5 \div 10 \text{ кг/м}^3$ можливе застосування високопродуктивного рівноважного режиму буріння (за гідростатичним тиском на забій) без остраху аварій та ускладнень [2].

Густина є основним визначаючим параметром бурових рідин. В процесі будівництва свердловини необхідно безперервно контролювати густину бурових рідин в декількох точках циркуляційної системи бурової, а саме, на вході свердловини в приймальних ємностях і ємності для доливу і на

виході із свердловини – в жолобі. Рідина в цих точках знаходиться в постійному русі, причому потік безнапірний і рівень рідини постійно змінюється. В приймальних ємностях рідина постійно перемішується, щоб не було осідання твердої фази.

Бурові рідини представляють собою полідисперсну гетерогенну систему, що складається як мінімум з двох компонентів – глини та води, фізико-хімічно зв'язаних між собою. Необхідно зазначити, що глинистий розчин не представляє собою просту механічну суміш глини з водою, так як процеси, що проходять при приготуванні глинистого розчину, набагато складніші, ніж просто розмішування.

В дисперсній фазі глинистого розчину по степені дисперсності розрізняють такі частинки [2]:

- елементарні глинисті пластинки («великі молекули»);
- первинні глинисті частинки, що представляють собою пачки «великих молекул»;
- агрегати із первинних глинистих частинок;
- високодисперсні частинки мінералів, що знаходяться в глині як механічні домішки;
- пісок, що складається з частинок кварцу і інших інертних порід, а також з великих грудочок глини, що не розчинилися.

Крім того, сольовий склад дисперсного середовища робочого глинистого розчину визначається електролітами, що є у воді, з якої пригтовляється розчин. Також – іонами, що переходять в рідку фазу з глини, яка застосовується для приготування розчину, солями мінералізованих пластових вод, що попадають в розчин з порід, які проходять при бурінні.

Вибір способу вимірювання густини бурових розчинів обумовлений декількома факторами [3]:

1. Фізико-хімічні властивості рідини.
2. Гідродинамічні характеристики потоку.
3. Технологічність процесу вимірювання.
4. Роботоздатність густиноміра в реальних умовах.
5. Точність вимірювання.

При виборі методу вимірювання густини бурових рідин, виходячи із їх фізико-хімічних властивостей, визначальними будуть ті властивості, які приводять до налипання частинок глини або осадження механічних домішок на робочий орган або робочу камеру густиноміра. Із розглянутих в [4] способів найбільш відповідним є пневмометричний. При використанні поплавкових і пікнометричних методів значно збільшується загальна похибка вимірювання за рахунок осадження та налипання частинок, для зниження якої необхідні значні витрати (надання поплавку певної форми, вібрація його або вагової камери в пікнометричному методі і т.п.). Така проблема існує і для пневмометричного способу, проте рішення її набагато простіше, оскільки вертикальний потік, або той що набігає, частково знімає налипання з пневмотрубок. Існує множина простих технічних рішень по захисту трубок від налипання. Рекомендується [2] робити кінець трубки, що опускається в рідину, наконечником у вигляді патрубка великого діаметра, косо зрізаного в нижній частині та закритого похилим дном. Цікавим також є рішення [2], в якому пропонується п'єзометричні трубки розташовувати концентрично та покривати матеріалами з високими гідрофобними властивостями.

Потік рідини вносить додаткову похибку в результат вимірювання будь-яким способом із-за швидкісного напору, що впливає на робочий орган або робочу камеру густиноміра. Характер

плинності бурового розчину в жолобній системі бурової установки та в приймальних ємностях можна вважати ламінарним; тому додаткова похибка є низькочастотною, так як визначається в основному швидкістю потоку, що плавно змінюється в часі. Тому для відлагодження від впливу потоку доцільно застосовувати структурні методи підвищення точності, з яких найбільш перспективні тестові, що не вимагають «вимкнення» величини, яка вимірюється від входу вимірюваної системи. З цієї точки зору також кращий пневмометричний спосіб вимірювання густини, так як для нього відсутня проблема формування мультиплікативного тесту по вимірюваному параметру – перепаду тиску на вимірювальній трубці. При використанні двох п'єзометричних трубок мультиплікативний тестовий вплив досягається при зміні глибини занурення однієї з трубок.

В загальну похибку вимірювання густини будь-яким способом входить температурна похибка, проте це враховується лиш при приведенні густини, що вимірюється до нормальних умов, а буровій така задача не ставиться.

Що стосується технологічності процесу вимірювання, то перевага також віддається пневмометричному методу із-за простоти установки та обслуговування вимірювальної трубки безпосередньо на жолобі, що створює невеликий підпір рідини (до 0,5 м) за допомогою заслінки.

Деякі труднощі виникають при очистці та осушці технологічного стисненого повітря, що використовується на буровій, але ці проблеми вирішуються відомими методами [5].

Вимоги до точності вимірювання густини бурових розчинів досить жорсткі і на ні одним із перерахованих вище методів в умовах бурової не досягаються. Наприклад, в інструкції по ранньому виявленню газонафтоводопроявів і їх попередженню в переліку показників, за якими отримують інформацію по ранньому виявленню газонафтоводопроявів, вказана густина бурового розчину на вході та на виході із свердловини в діапазоні $800 \div 2600 \text{ кг/м}^3$ з максимальною абсолютною похибкою 10 кг/м^3 , тобто приведена похибка складає 0,42%. Аналогічні вимоги висуваються при використанні високопродуктивного

рівноважного режиму буріння за гідростатичним тиском.

Навіть якщо вдасться будь-яким чином абстрагуватися від впливу перешкод (завад) в каналі вимірювання і від зовнішніх неконтрольованих впливів, для досягнення точності, що вимагається, необхідно застосовувати вторинні перетворювачі класу не нижче, ніж 0,4, і підтримувати його в умовах бурової, що проблематично. Тому єдиною альтернативою є використання структурних методів підвищення точності вимірювання і тут перевага також залишається за пневмометричними густиномірами за міркуваннями наведеними вище.

Похибка вимірювання пневмометричним способом складає $1,5 \div 2,5$ %. Основну долю похибки в нормальних умовах вносить дифманометр. Промисловістю випускаються та доступні для широкого застосування перетворювачі тиску типу «Сапфир-22ДД» [6, 7] мають клас точності 0,5%; 0,25%; 0,15%; 0,1%. Значний вклад в утворення загальної похибки вимірювання густини цим методом вносять неоптимальність конструктивних розмірів вимірювальних трубок і режим закінчення повітря з них, а також втрати тиску в пневмолініях. Крім того, при відриві бульбашок

повітря виникають інфразвукові коливання тиску в лініях.

Тому найкращим на буровій є пневмометричний спосіб вимірювання густини з використанням структурних методів підвищення точності для зменшення похибок тракту вимірювання.

На рис.1 наведена структурна схема диференційного пневмометричного густиноміра з компенсатором баластного тиску в мінусовій пневмолінії, що вміщує джерело живлення стиснутим повітрям на два незалежних канали, вмикаючий стабілізатор тиску повітря 1 і два регулятори витрати повітря 2 і 3, дифманометр 4, компенсатор баластного тиску 5 у вигляді герметичної посудини, заповненої еталонною рідиною з густиною ρ_0 , в яку занурена барботажна трубка на глибину H_0 і двох вимірювальних трубок 6 і 7, занурених в контролюючу рідину на глибини H_1 і H_2 . Густина рідини таким густиноміром визначається за перепадом тиску між кінцями вимірювальних трубок, який в ідеальному випадку рівний

$$\Delta P = \rho g H_1 - \rho g H_2 = \rho g (H_1 - H_2),$$

ρ – густина рідини;

g – гравітаційна стала ($9,81 \text{ м/с}^2$).

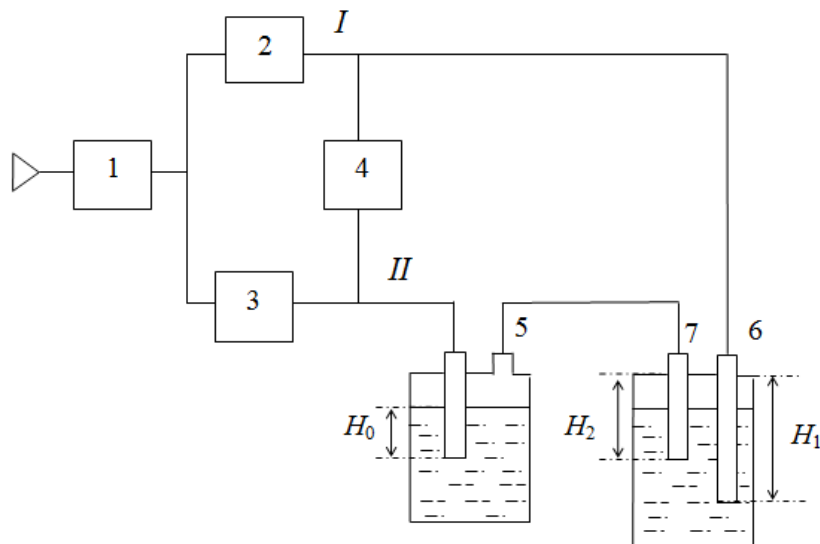


Рисунок 1 – Структурна схема диференційного пневмометричного густиноміра

Реально дифманометр вимірює перепад тиску між точками I і II пневмоліній, тиск в яких рівний

$$\begin{aligned} P_1 &= \rho g H_1 + P_{Л1} + P_{\sigma 1} + P_{V1}, \\ P_2 &= \rho g H_2 + P_{Л2} + P_{\sigma 2} + P_{V2} + P_0 \\ \Delta P_{12} &= \Delta P - P_0 - P_{BT} \end{aligned}$$

де $P_0 = \rho_0 g H_0$ - перепад тиску в конденсаторі;

$P_{Л1}, P_{Л2}$ - втрати тиску із-за тертя повітрям;

$P_{\sigma 1}, P_{\sigma 2}$ - надлишковий тиск, необхідний для відриву бульбашок повітря від зрізу трубок;

P_{V1}, P_{V2} - тиски обумовлені швидкісним напором потоку при обтіканні кінців трубок.

$$P_{BT} = P_{Л1} - P_{Л2} + P_{\sigma 1} - P_{\sigma 2} + P_{V1} - P_{V2}.$$

Нехай номінальна статична характеристика дифманометра має вигляд

$$y = a_0 + a_1(P_1 - P_2),$$

де a_0, a_1 - коефіцієнти моделі статичної характеристики;

y - вихідний сигнал дифманометра (струм, напруга і ін.).

Тоді дифманометр 4 покаже:

$$\begin{aligned} y &= a_0 + a_1(\Delta P - P_0 - P_{BT}) = \\ &= a_0 + a_1(\rho g(H_1 - H_2) - P_0 - P_{BT}). \end{aligned}$$

Густина контрольованої рідини рівна

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{P_0}{g(H_1 - H_2)} + \frac{y}{a_1 g(H_1 - H_2)} - \\ &- \frac{P_{BT}}{g(H_1 - H_2)} - \frac{a_0}{a_1 g(H_1 - H_2)}. \end{aligned}$$

Якщо перепад тиску в компенсаторі 5 підібрати так, щоб

$$P_0 = \rho_{min} g(H_1 - H_2)$$

де ρ_{min} - мінімальне значення густини контрольованої рідини, то

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{min} + \frac{y}{a_1 g(H_1 - H_2)} - \\ &- \frac{P_{BT}}{g(H_1 - H_2)} - \frac{a_0}{a_1 g(H_1 - H_2)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Ральні значення коефіцієнтів моделі статичної характеристики a_{0i} і a_{1i} відрізняються від номінальних, внаслідок впливу зовнішніх факторів (температура, вологість, і ін.), а також із-за старіння дифманометра. Отже, за показниками дифманометра реально виходить величина

$$\begin{aligned} \rho^x &= \rho_{min} + \frac{y}{a_{1i} g(H_1 - H_2)} - \\ &- \frac{P_{BT}}{g(H_1 - H_2)} - \frac{a_0}{a_{1i} g(H_1 - H_2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Із (1) і (2) видно, що основними джерелами похибки пневмометричного густиноміра є втрати тиску в пневмолініях, дрейф нуля дифманометра, відмінність реальних значень коефіцієнтів статичної характеристики дифманометра від номінальних. Крім того, похибка нелінійності дифманометра повністю входить в результуючу похибку вимірювання густини.

Із (2) також видно, що результуюча похибка має як адитивну, так і мультиплікативну складові.

Мультиплікативна складова похибки обумовлена нестабільністю коефіцієнта чутливості a_{1i} , що повільно змінюється за рахунок зміни параметрів мембрани дифманометра і інших елементів перетворювача, а також за рахунок дії зовнішніх факторів; мультиплікативної також є похибка нелінійності дифманометра.

Адитивна складова похибки обумовлена дрейфом нуля дифманометра, нестабільністю коефіцієнтів a_{0i} і a_{1i} , а також наявністю перепаду тиску в пневмолініях густиноміра, тиску P_{σ} і швидкісним напором потоку.

Для визначення величини і характеру зміни тиску в пневмолініях густиноміра розглянемо математичну модель одного пневмоканалу, що має регулятор витрати повітря, гладку трубку, до якої за допомогою з'єднувальної арматури (штуцер, трійники, перевідники) приєднані п'єзометрична трубка та камера дифманометра.

Нестала ламінарна плинність газу в пневмоканалі густиноміра, характерна для загального випадку роботи, описується системою рівнянь в частинних похідних:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2aQ \\ -\frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial Q}{\partial x}, \end{cases} \quad (3)$$

де x - осьова координата пневмоканалу;

t - час;

$P(x, t), Q(x, t)$ - тиск і витрата газу в перетині каналу;

c - швидкість звуку в газі;

a - сталий коефіцієнт.

При цьому тиск $P(x,t)$ аналогічно напрузі в довгій лінії, витрата $Q(x,t)$ аналогічна струму в лінії, а коефіцієнти в рівнянні представляють собою комбінації із параметрів довгої лінії – індуктивності, ємкості і опору [8].

Граничними умовами для (3) будуть такі:

1. На початку пневмолінії витрата газу рівна витраті, яка встановлена регулятором.

$$Q(0,t) = Q_0 \quad (4)$$

2. В кінці пневмолінії на зрізі п'єзометричної трубки тиск визначається глибиною занурення рідини, надлишковим тиском, який викликаний поверхневим натягом і швидкісним напором рідини

$$P_0(l,t) = \rho g H + P_\sigma(t) + P_V \quad (5)$$

Розв'язати (3) можна за допомогою операційного числення.

Якщо

$$\begin{aligned} P(x,s) &\Rightarrow P(x,t) \\ Q(x,s) &\Rightarrow QP(x,t) \end{aligned}$$

то система (3) прийме такий вигляд:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = sQ + 2aQ \\ -sP = c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

Виключимо з (6) $Q(x,s)$, отримаємо рівняння

$$\frac{d^2 P}{dx^2} - \lambda^2 P = 0,$$

$$\text{де } \lambda^2 = \frac{s(s+2a)}{c^2},$$

розв'язком якого буде

$$\begin{cases} P(x,s) = Ae^{\lambda x} + Be^{-\lambda x} \\ Q(x,s) = \frac{\lambda}{s+2a} (Be^{-\lambda x} - Ae^{-\lambda x}) \end{cases}$$

Постійні коефіцієнти A і B знаходяться із граничних умов

$$\begin{aligned} Ae^{\lambda x} + Be^{-\lambda x} &= P_0(l,s) \\ \frac{\lambda}{s+2a} (B-A) &= \frac{Q_0}{s} \end{aligned}$$

і за формулами

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2ch\lambda l} \left[P_0(l,s) - \frac{Q_0}{s} c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}} e^{-\lambda l} \right] \\ A &= \frac{1}{2ch\lambda l} \left[P_0(l,s) + \frac{Q_0}{s} c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}} e^{-\lambda l} \right], \end{aligned}$$

Розв'язком системи (6) буде: знаходження тиску та витрати в кожній точці пневмолінії для будь-

якого моменту часу необхідно знайти зворотне перетворення для (7). Навіть для простих моделей $P_0(l,s)$ це приводить до дуже складних розрахунків і аналітичний розв'язок може бути отриманий тільки для деяких окремих випадків, що не представляє практичну цікавість.

Тому для аналізу пневмолінії густиноміра найраціональніше скористатися методом електрогідрравлічної аналогії (ЕГДТ) [8-10] і перейти від пневматичної лінії з розподіленими параметрами до аналогічної електричної з зосередженими.

Перехід від лінії з розподіленими параметрами до лінії з зосередженими параметрами коректний при виконанні такої умови

$$(2 \div 2,5)L < \frac{l_{зг}}{2}$$

$$\begin{cases} P(x,s) = \frac{1}{ch\lambda l} \left[P_0(l,s) ch\lambda x - \frac{Q_0}{s} c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}} ch\lambda(x-l) \right] \\ Q(x,s) = -\frac{1}{ch\lambda l} \left[\frac{P_0(l,s) ch\lambda x}{c \sqrt{1 + \frac{2a}{s}}} - \frac{Q_0}{s} ch\lambda(x-l) \right] \end{cases} \quad (7)$$

Для знаходження тиску та витрати в кожній точці пневмолінії для будь-якого моменту часу необхідно знайти зворотне перетворення для (7). Навіть для простих моделей $P_0(l,s)$ це приводить до дуже складних розрахунків і аналітичний розв'язок може бути отриманий тільки для деяких окремих випадків, що не представляє практичну цікавість.

Тому для аналізу пневмолінії густиноміра найраціональніше скористатися методом електрогідрравлічної аналогії (ЕГДТ) [8-10] і перейти від пневматичної лінії з розподіленими параметрами до аналогічної електричної з зосередженими. Перехід від лінії з розподіленими параметрами до лінії з зосередженими параметрами коректний при виконанні такої умови

$$(2 \div 2,5)L < \frac{l_{зг}}{2},$$

L – довжина ділянки лінії, що підлягає заміні;

$l_{зг}$ – мінімальна довжина хвилі звуку в лінії.

Джерелом звукової хвилі в пневмолінії густиноміра є пульсуючий тиск при барботажі

бульбашок повітря в трубці, а також імпульсна зміна тиску при можливих комутаціях лінії.

Максимальна частота проходження бульбашок в п'єзометрах не перевищує $f=10$ Гц. Це відповідає довжині хвилі звуку приблизно 34 м.

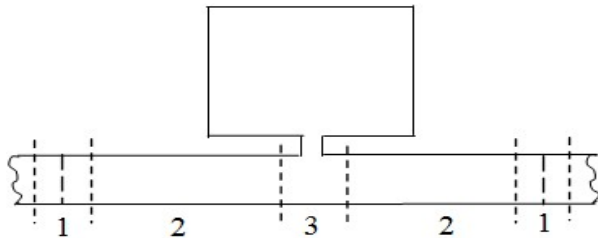
Враховуючи, що час перемикання при комутації пневмолінії засобами пневмоавтоматики складає 0,1 с, причому клапан є інерційним елементом, еквівалентна частота збурювального впливу не перевищує 5 Гц.

Таким чином, для пневмометричного густиноміра $l_{зв} = 34$ м.

Звідси максимальна довжина ділянки лінії, що розглядається як зосереджена і складає

$$L_{max} < \frac{l_{зв}}{5} \approx 6,8 \text{ м.}$$

При переході до пневматичної лінії із зосередженими параметрами її ділянку довжиною менше L_{max} замінюють еквівалентною схемою, зображеною на рис. 2. Ділянка 1 моделює повний пневматичний опір лінії R_n . Ділянка 2 моделює інерційні властивості повітря (пневматична індуктивність L_n).



Рисунки 2 – Еквівалентна пневматична схема ділянки лінії

Ділянка 3 моделює пневматичну ємність лінії C_n . Величина R_n визначається із закону Пуазейля при ламінарному плинні [11].

$$R_n = \frac{128 \cdot \eta}{\pi D^4} L,$$

де η - динамічна в'язкість газу;

D – діаметр пневмолінії;

L – довжина ділянки лінії.

Пневматична ємність C_n визначається із такого співвідношення для газів (диференціальна форма узагальненого газового закону):

$$\frac{V}{\rho_n RT} \frac{dP}{dt} = Q, \quad (8)$$

ρ_n - густина повітря;

R – газова стала;

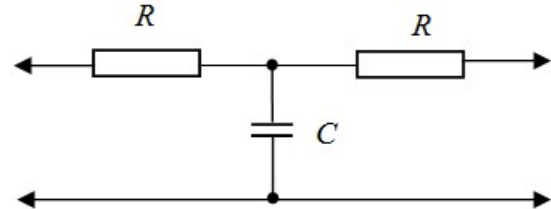
V – об'єм лінії;

T – абсолютна температура.

Звідси

$$C_n = \frac{V}{\rho_n RT} = \frac{\pi D^2}{4 \rho_n RT} L.$$

Для повітря при тисках, близьких до атмосферного, і об'ємах ліній, що не перевищують $25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, пневматичною індуктивністю L_n можна знехтувати і не враховувати в подальших розрахунках. Еквівалентне електричне коло із зосередженими параметрами зображено на рис. 3.



Рисунки 3 – Еквівалентна електрична схема ділянки лінії

При переході до електричної лінії для розрахунку її параметрів, задавши масштаби струму і напруги, еквівалентних витраті і перепаду тиску в лінії, розраховують параметри R і C таким чином, щоб зберігались співвідношення між пневматичним опором в законі Пуазейля і електричним опором в законі Ома, а також між пневматичною ємністю в рівнянні (8) та законом зміни струму через ємність.

Наприклад, для масштабу струму $m_i = 10^{-3} \text{ А/м}^3$ і масштабу напруги $m_u = 10^{-3} \text{ В/Па}$ при $D = 0,004$ м отримаємо питомі опори та ємності повітряної лінії при $T = 293 \text{ К}$:

$$R_{num} = \frac{m_u}{m_i} = \frac{128 \eta}{\pi D^4} = 2,737 \text{ Ом/м}$$

$$C_{num} = \frac{m_i}{m_u} = \frac{\pi D^2}{4 \rho_n RT} = 1,07 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}$$

В електричному еквіваленті пневмолінії густиноміра раціонально виділити такі елементарні ділянки:

1. Регулятор витрати повітря (РВП) як джерело струму.

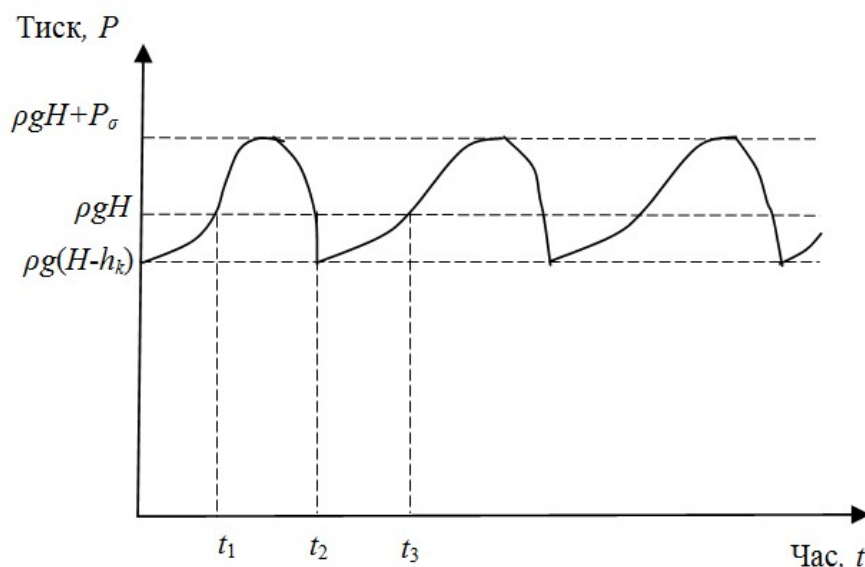


Рисунок 4 – Зміна тиску на кінці пневмотрубки

2. Ділянка лінії від РВП до точки під'єднання дифманометра як електричне коло (див. рис.3).

3. З'єднувальна лінія і камера дифманометра як ємкість так як потік повітря в цій лінії відсутній, а припливом повітря за рахунок стисливості можна знехтувати через малість діапазону зміни тиску.

4. Ділянка лінії від точки приєднання дифманометра до зрізу барботажної як електричне коло приведена на рис. 3.

5. Потік рідини як джерело напруги, є функцією густини ρ і глибини занурення трубки H .

Для побудови електричної моделі потоку рідини необхідно розглянути детальніше процеси, що проходять на межі поділу газ – рідина. Для бульбашки сферичної форми радіусом r тиск на межі розділу рівний

$$P = \rho g H + \frac{2\sigma}{r},$$

де σ - поверхневий натяг;

P – тиск газу в бульбашці.

При формуванні межі розділу на зрізі трубки при $r \rightarrow \infty$ буде

$$P = \rho g H.$$

Процес розширення та стиснення бульбашки повітря описується в сферичній системі координат відомим рівнянням [12], розв'язати яке можна лиш чисельними методами. Тому для побудови електричної

моделі необхідно розглянути якісну картину утворення і зрізу газової бульбашки на кінці трубки (рис. 4).

При появі меніска, що випускається на початку росту бульбашки проявляються сили поверхневого натягу, які долаються додатковим тиском, рівним $P\sigma$ (момент часу t_1).

Починаючи з цього моменту часу відбуваються наростання об'єму повітряної бульбашки, збільшення її радіусу і зростання тиску в ньому. В момент часу t_2 радіус бульбашки досягає критичного значення r_{kp} , при якому виштовхуюча сила F_1 рівна силі поверхневого натягу F_2 :

$$F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_2),$$

$$F_2 = \pi d \sigma,$$

де ρ_2 – густина газу.

Отже

$$r_{kp} = \sqrt[3]{\frac{3d\sigma}{4g}(\rho - \rho_2)}.$$

В цей момент відбувається відрив бульбашки, при цьому з трубки захоплюється частина газу і в неї заходить рідина за рахунок капілярних сил, а тиск в ній зменшується до величини $\rho g(H - h_k)$, де h_k – величина капілярного підняття.

Далі рідина з трубки витісняється і тиск в ній зростає $\rho g H$ до (момент часу t_3), при якому відбувається утворення опуклого меніска, і

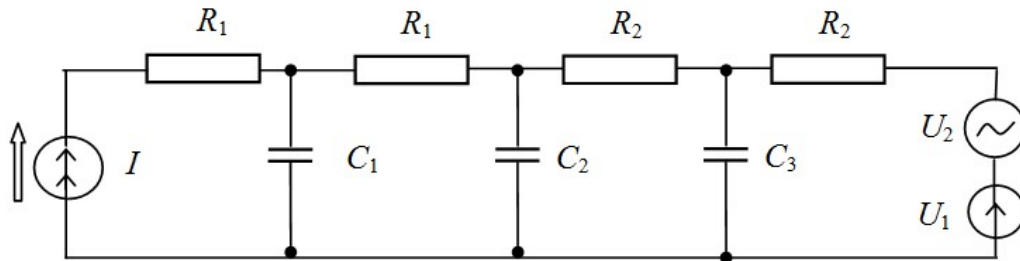


Рисунок 5 – Еквівалентна електрична схема пневмомірії густиноміра

процес повторюється. Якщо трубка обтікається потоком рідини, то коливання тиску будуть відбуватися відносно величини $\rho gH + P_V$, що корелює з квадратом швидкості потоку.

Величини $t_2 - t_1$ і $t_3 - t_2$ залежать від витрати газу в трубці і визначаються таким чином:

$$(t_2 - t_1)Q = \frac{4}{3}\pi r_{кр}^3,$$

$$(t_3 - t_2)Q = \frac{\pi d^2}{4}h_k.$$

Величини капілярного підняття залежить від витрати газу і її природно припустити у вигляді

$$h_k = h_{kmax}(1 - \alpha Q).$$

При відсутності витрати газу ця величина максимальна

$$h_{kmax} = \frac{\sigma}{\rho g d}.$$

Для максимальної витрати Q_{max} , при якому починається «факельний» режим, $t_3 = t_2$, тобто

$$\alpha = \frac{\pi d \sigma}{4 \rho g Q_{max}}.$$

Отже,

$$t_2 - t_1 = \frac{\pi d \sigma}{g(\rho - \rho_c)Q},$$

$$t_3 - t_2 = \frac{\pi d \sigma}{4 \rho g Q}(1 - \alpha Q).$$

(9)

Для практичної моделі на ділянці $t_2 - t_1$ тиск на кінці трубки можна апроксимувати:

$$P_1 = \rho gH + \frac{2\sigma}{r_{кр}} \approx \rho gH + 4\sigma \sqrt[3]{\frac{\rho g}{3d\sigma}} \quad (10)$$

а на ділянці $t_3 - t_2$

$$P_2 = \rho g(H - h_k) + \rho g h_k \frac{t}{t_3 - t_2}.$$

Або з врахуванням (9)

$$P_2 = \rho gH - \frac{\sigma}{d}(1 - \alpha Q) + \frac{4\rho g Q}{\pi}t.$$

Таким чином, потік рідини на електричній моделі можна представити як джерело змінної напруги, що генерує напругу за законом зміни тиску, яке представлено залежностями (10) і (11).

На рис. 5 зображена еквівалентна електрична схема пневмомірії густиноміра.

На схемі U_1 моделює сталий підпір тиску ρgH , а джерело U_2 – змінне у відповідності з (10) і (11), джерело струму I – регулятор витрати, RC – коло, моделює пневмомірію та камеру дифманометра. Тиск в камері дифманометра моделюється напругою на ємкості C_3 .

Для уточнення коефіцієнтів і параметрів моделі та перевірки її на адекватність потрібно проводити експериментальне дослідження.

Список використаних джерел

1. Шавранський М. В. Система контролю для запобігання прихоплень бурильної колони в процесі буріння: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.13 "Прилади і методи контролю та визначення складу речовин" / Шавранський Михайло Васильович; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2003. 20 с.

2. Кравец М.З., Миронов В.П. Методы и средства автоматического измерения плотности буровых растворов. М.:ВНИИОЭНГ, 1989. – (Обзор. информ. Сер. «Автоматизация и телемеханизация в нефтяной промышленности»).

3. Исакович Р.Я. Технологические измерения и приборы. М.: Недра, 1979. 344 с.

4. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерения. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.

5. Ибрагимов И.А., Фарзани Н.Г., Илясов Л.В. Элементы и системы пневмоавтоматики. – М.: Высшая школа, 1985. – 544 с.

6. <http://manometr.net.ua> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Манометр – полная картина жизни. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://manometr.net.ua> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану.

7. <http://www.avtomatika.org> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Автоматика. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://www.avtomatika.org> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану.

8. Костишин В. С. Моделирование режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідролічної аналогії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.15.13 "Нафтогазопроводи, бази та сховища" / Костишин Володимир Степанович; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2003. 31 с.

9. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 177 с.

10. Попов Д. Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982. 239 с.

11. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. посібник. К.: НАУ, 2004. 336 с.

12. Лаптев В.И. Барботажно-пьезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 80 с.

References

1. Shavranskyi M. V. Systema kontrolju dlja zapobihannja prychoplen burylnoi kolony v prozesi burinnja: avtoref. dys. na здобуття ступеня канд. techn. nauk: spez.05.11.13 «Prylady i metody kontrolju ta vyznachennja skladu rehovyn» / Shavranskyi Mychajlo Vasylyjovych; Ivano-Frankiv.naz.techn.un-t nafty i gasu. Ivano-Frankivsk, 2003. 20 s.

2. Kravez M.Z., Mironov V.P. Metody i sredstva avtomaticheskoho izmerenija plotnosti byrovych rastvorov. – М.: VNIIOENG, 1989. (Obzor. inform. Ser. «Avtomatisazija i telemechanizazija v neftjanoj promyshlennosti»)

3. Isakovich R.Ja. Technologicheskie izmerenija i pribory. М.:Nedra, 1979. 344 s.

4. Kulikovskij K.L., Kuper V.Ja. Metody i sredstva izmerenija. М.: Energoatomizdat, 1986. 448 s.

5. Ibragimov I.A., Farzane N.G., Iljasov L.V. Elementy i sistemy pnevmoavtomatyky. М.: Vysshaja shkola, 1985. 544 s.

6. <http://manometr.net.ua> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Манометр – полная картина жизни. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://manometr.net.ua> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану.

7. <http://www.avtomatika.org> [Электронный ресурс]:[Интернет-портал]. – Автоматика. – [Харьков: ООО Энергопром Украина]. – Режим доступа: <http://www.avtomatika.org> (дата звернення 01.04.2021) – Назва з екрану

8. Kostyshyn V.S.Modeluvannja rezymiv roboty vidzentrovanych nasosiv na osnovi elektrogidravlichnoi analogii: avtoref. dys. na здобуття ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.15.13 «Naftogazoprovody, bazt ta schovyscta»/Kostyshyn Volodymyr Stepanovych; Ivano-Frankiv.naz.techn.un-t nafty i gasu. Ivano-Frankivsk, 2003. 31 s.

9. Zalmanov L.A. Teorija elementiv pnevmoavtomatyky. М.: Nauka, 1969.-177 с.

10. Popov D.N. Nestazionarnye gidrodinamicheskie prozessy. М.: Mashinostoenije, 1982.239 s.

11. Kolchunov V.I. Teoretychna ta prykladna gidromechanika: Navch.posibnyk. К.:NAU, 2004. 336 s.

12. Laptev V.I. Barbotazno-pjezometricheskije metody kontrolja fiziko-chimicheskikh svojstv zidkosteij. М.: Energoatomizdat, 1984. 80 с.

УДК 681.621

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-25-32

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОКАТАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Х. М. Шинкарук, С. А. Чеховський, Н. М. Піндус

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

В роботі описана конструкція лабораторного стенду для проведення експериментальних досліджень термокаталітичного методу для визначення теплоти згоряння газу з використанням зразків природного газу. Детально описано методику виконаних вимірювань на розробленому експериментальному стенді. Конструкція описаного макету була розроблена з можливістю проведення досліджень в імпульсному режимі роботи, що багаторазово скорочує час проведення експериментальних досліджень і дозволяє при кожному експерименті контролювати початковий рівень сигналу вимірювальної мостової схеми. Розроблений вимірювальний стенд дозволяє проводити вимірювання одного сенсора в мостовій схемі, а також забезпечує можливість швидкої заміни досліджуваного перетворювача, що є важливим при проведенні рутинних експериментальних досліджень. Експериментально встановлено закономірності зміни вихідного сигналу вимірювальної схеми при використанні газової проби відомого компонентного складу та теплоти згоряння при витраті газу від 0,5 до 1,5 мл та газу-носія (повітря) – 1-5 л/год. Подано результати випробування термокаталітичного перетворювача в середовищі природного газу. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість використання термохімічного аналізатора для вимірювань нижчої об'ємної питомої теплоти згоряння природних газів. Важливою перевагою описаного аналізатора є те, що він забезпечує можливість вимірювання теплоти згоряння газу в імпульсному режимі роботи з малою (0,5 - 2 мл) пробною аналізованого газу, що виключає необхідність використання спеціальних засобів стабілізації об'ємної витрати змінного за складом газу, багаторазово зменшує час, необхідний для проведення досліджень, а також багаторазово знижує витрати, пов'язані з придбанням чистих газів.

Ключові слова: природний газ, теплота згоряння, термокаталітичний метод, експериментальні дослідження.

В работе описана конструкция лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований термокаталитического метода для определения теплоты сгорания газа с использованием образцов природного газа. Подробно описана методика выполненных измерений на разработанном экспериментальном стенде. Конструкция описанного макета была разработана с возможностью проведения исследований в импульсном режиме работы, многократно сокращает время проведения экспериментальных исследований и позволяет при каждом эксперименте контролировать начальный уровень сигнала измерительной мостовой схемы. Разработан измерительный стенд позволяет проводить измерения одного сенсора в мостовой схеме, а также обеспечивает возможность быстрой замены исследуемого преобразователя, является важным при проведении рутинных экспериментальных исследований. Экспериментально установлены закономерности изменения выходного сигнала измерительной схемы при использовании газовой пробы известного компонентного состава и теплоты сгорания при расходе газа от 0,5 до 1,5 мл и газа-носителя (воздух) - 1-5 л / ч. Представлены результаты испытания термокаталитического преобразователя в среде природного газа. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность использования термохимического анализатора для измерений низкой объемной удельной теплоты сгорания природных газов. Важным преимуществом описанного анализатора является то, что он обеспечивает возможность измерения теплоты сгорания газа в импульсном режиме работы с малым (0,5 - 2 мл) пробой анализируемого газа, что исключает необходимость использования специальных средств стабилизации объемного расхода переменного по составу газа, многократно уменьшает время, необходимое для проведения исследований, а также многократно снижает затраты, связанные с приобретением чистых газов.

Ключевые слова: природный газ, теплота сгорания, термокаталитический метод, экспериментальные исследования.

The paper describes the design of a laboratory bench for experimental studies of thermocatalytic methods for determining the heat of combustion of a gas using natural gas samples. The technique of measurements performed on the developed experimental stand is described in detail. The design of the described model was developed with the possibility of conducting research in a pulsed mode of operation, it significantly reduces the time for conducting experimental research and allows for each experiment to control the initial signal level of the measuring bridge circuit. The developed measuring stand allows one to measure one sensor in a bridge circuit, and also provides the ability to quickly replace the investigated transducer, which is important when conducting routine experimental research. The regularities of the change in the output signal of the measuring circuit were experimentally established when using a gas sample of a known composition and heat of combustion at a gas flow rate of 0.5 to 1.5 ml and a carrier gas (air) of 1-5 l / h. The results of testing thermocatalytic converters are presented. in a natural gas environment. Experimental studies have confirmed the possibility of using a thermochemical analyzer to measure low volumetric specific heats of combustion of natural gases. An important advantage of the described analyzer is that it provides the ability to measure the heat of combustion of a gas in a pulsed mode of operation with a small (0.5 - 2 ml) sample of the analyzed gas, which eliminates the need to use special means for stabilizing the volumetric flow rate of a variable gas composition, significantly reduces the time required for research, and also significantly reduces the costs associated with the purchase of pure gases.

Key words: natural gas, heat of combustion, thermocatalytic method, experimental research.

Обґрунтування вибору теми дослідження. В умовах сьогодення враховуючи стрімке підвищення вартості енергоносіїв та гострого дефіциту енергоресурсів питання визначення якості палива, яке видобувається в Україні або імпортується в країну, є надзвичайно актуальним, оскільки є визначальним у формуванні цінової політики та проведенні економічних розрахунків. Враховуючи світовий досвід, щодо обліку природного газу за його енергетичною цінністю, що підтверджується запровадженням міжнародних стандартів [1, 2], які регламентують якісні характеристики природного газу в Україні набрав чинності національний стандарт [3], який регламентує методи та порядок визначення енергії під час комерційних розрахунків за спожитий газ. Цей стандарт забезпечує початок переходу розрахунків за спожитий природний газ за вмістом енергії. Проте на даний час в тепловій енергетиці України існує гострий дефіцит сучасних універсальних засобів вимірювання теплоти згоряння палива безпосередньо у його споживачів, що визначає проблематичним реальне впровадження цього стандарту. За умови значної нестабільності показників якості палива, що постачається, наявність таких пристроїв дозволить підвищити точність розрахунку техніко-економічних показників теплоенергетичних установок, що призведе до економії енергоресурсів. Такий прилад повинен, мати задовільні для масових технічних вимірювань метрологічні характеристики,

передбачати можливість автоматизації процесу підготовки до вимірювань і самих вимірювань, конструкція приладу і його вузлів повинна бути економічно виправдана в умовах дрібносерійного виробництва, що дасть можливість задовольнити зростаючу потребу в засобах вимірювання теплоти згоряння.

Метою роботи є експериментальні дослідження роботи термокаталітичного методу в середовищі природного газу на розробленій експериментальній установці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На підприємствах нафтогазовидобувної та нафтогазопереробної промисловості, а також при комерційному обліку природного газу необхідний постійний контроль якості газоподібних палив. При цьому однією з основних характеристик таких палив є нижча об'ємна теплота спалювання.

Енергетична цінність природного газу визначається як добуток об'ємної витрати газу на його теплоту згорання. Для визначення теплоти згоряння природного газу згідно [3] використовують прямий (калориметричний) та розрахунковий (на основі хроматографічного аналізу) методи. Проте застосування хроматографічного методу можливе за умови наявності достатньо дорогого обладнання та може бути реалізоване лише на великих пунктах обліку природного газу. Технічні засоби, які реалізовані на основі даних методів не можуть бути встановлені у кінцевих споживачів

природного газу через їх високу вартість та технічну складність реалізації, що перешкоджає переходу до обліку природного газу з врахуванням його енергетичної цінності.

Дослідженню принципів роботи та технічної реалізації засобів для вимірювання та контролю теплоти згорання природного газу присвячена робота [4], в якій виконаний аналіз вітчизняних і закордонних засобів вимірювання та особливості їх застосування у сфері контролю і визначення теплоти згорання природного газу.

Перші з названих аналізаторів використовують в роботі заздалегідь знайдені емпіричні залежності, що, як правило, має обмежений спектр застосування і вимагає адаптації даних аналізаторів до конкретних технологічних потоків. Недоліками автоматичних газових хроматографів є досить тривалий період визначення складу (близько 20 хвилин) і невисока точність хроматографічного аналізу.

У зв'язку з цим на сьогоднішній день є актуальним проведення досліджень і розробок, спрямованих на збільшення точності і швидкодії засобів контролю нижчої об'ємної теплоти згорання газоподібних палив.

Виклад основного матеріалу. На основі теоретичних досліджень роботи термохімічного аналізатора, в основі якого лежить термокаталітичний метод [4], розглянуто можливість використання його для визначення якісних характеристик природного газу. Забезпечивши повне згорання вуглеводневих компонентів газової суміші на термокаталітичному перетворювачі можливо вимірювати нижчу об'ємну питому теплоту згорання газу забезпечити сталість об'ємної витрати аналізованого газу в детектор, що є вирішальним фактором забезпечення точності вимірювання теплового ефекту каталітичного згорання. Необхідно здійснювати процес каталітичного згорання при малих концентраціях горючих компонентів в потоці газу-носія (повітря) за рахунок підбору об'єму проби, що вводиться в аналізатор, що може забезпечити стабільність властивостей каталізатора протягом тривалого часу. А також важливо контролювати і коригувати початковий рівень сигналу детектора в кожному циклі аналізу.

У зв'язку з цим була розроблена експериментальна установка, для досліджень ступеня каталітичного окислення вуглеводнів та перевірки моделі статичної характеристики термокаталітичного перетворювача.

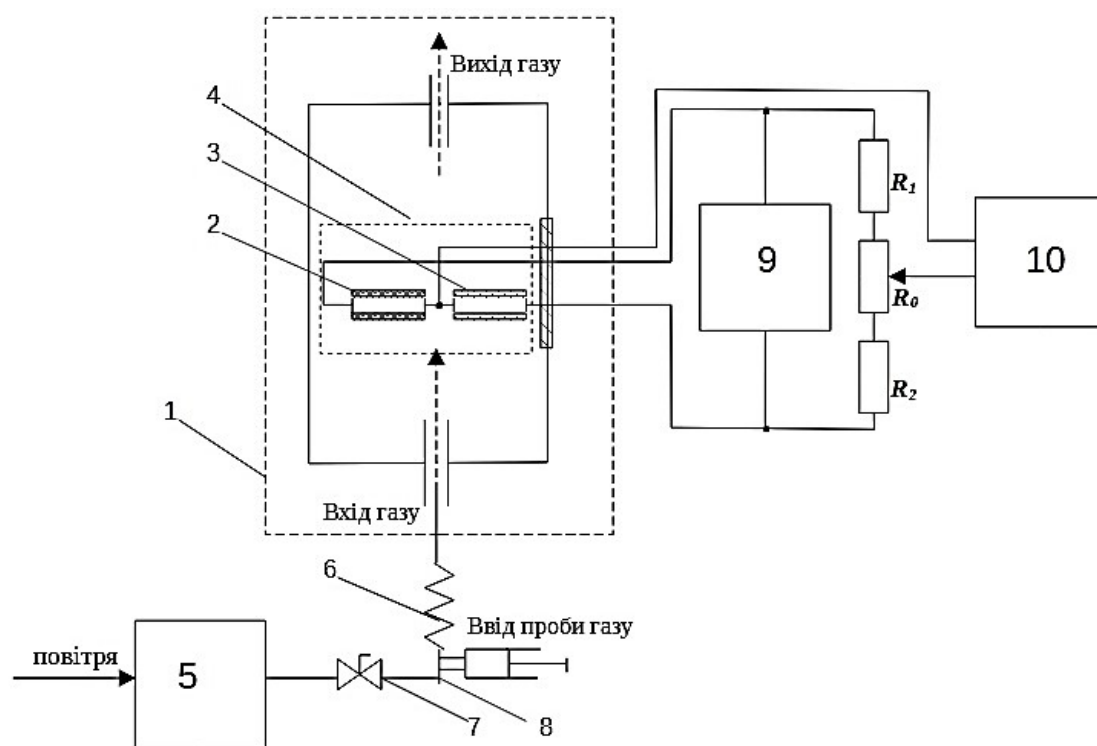
Використання для перевірки моделі статичної характеристики термокаталітичного перетворювача імпульсного режиму роботи з малою (0,5 - 2 мл) пробю аналізованого газу виключає необхідність використання спеціальних засобів стабілізації об'ємної витрати змінного за складом газу, багаторазово зменшує час, необхідний для проведення досліджень, а також багаторазово знижує витрати, пов'язані з придбанням чистих газів.

Експериментальні дослідження чутливості термокаталітичних перетворювачів в середовищі природного газу проводилися на експериментальній установці, схема якої приведена на рисунку 1.

Описана конструкція вимірювального стенду забезпечує можливість швидкої заміни досліджуваного перетворювача, що є важливим при проведенні рутинних експериментальних досліджень. Вимірювальний стенд дозволяє проводити вимірювання одного сенсора в мостовій схемі, вихідний сигнал з моста можна виміряти безпосередньо, або використовувати підсилювач з коефіцієнтами посилення 2, 5, 10 і 100.

Конструкція описаного макету була розроблена з можливістю проведення досліджень в імпульсному режимі роботи [5], що багаторазово скорочує час проведення експериментальних досліджень і дозволяє при кожному експерименті контролювати початковий рівень сигналу вимірювальної мостової схеми.

У вимірювальну камеру 1 встановлений каталітично активний терморезистор 2 та порівняльний 3, що представляють собою термокаталітичний перетворювач. Обидва терморезистора включені в схему неврівноваженого електричного моста, який також містить два постійних R1 і R2 та змінний R0 манганінові терморезистори. Так як названі терморезистори включені в суміжні плечі неврівноваженого електричного моста, це практично виключає вплив зміни температури аналізованого газу на результат вимірювання. Змінний резистор R0 служить для установки



1 – вимірювальна камера; 2 – вимірювальний терморезистор з каталітичним покриттям;
 3 – компенсаційний терморезистор; 4 – термокаталітичний перетворювач; 5 – витратомір;
 6 – колонка вводу; 7 – дросельний перемикач; 8 – пристрій вводу газової проби;
 9 – джерело живлення вимірювальної мостової схеми; 10 – пристрій виводу вимірювального сигналу

Рисунок 1 – Функціональна схема експериментального вимірювального стенду

початкового значення вихідного сигналу. Вони нагріваються струмом цього моста, створеним стабілізованим джерелом живлення 6. При каталітичному згорянні горючих компонентів досліджуваного газу на вимірювальному перетворювачі збільшується температура каталітично активного терморезистора, що викликає розбаланс моста, який вимірюється і реєструється потенціометром або вольтметром 10.

В якості джерела живлення 9 мостової вимірювальної схеми служили літєві акумуляторні батареї, для забезпечення стабільного живлення використовувалася схема стабілізації напруги ADP3335ARM-3.3 здатна працювати до напруги 12 В і забезпечувати вихідний струм до 500 мА. При струмі навантаження в 300 мА ADP3335 споживає 2,6 мА, при струмі менше 1 мА – кілька сотень мікроампер.

Для реєстрації вихідного сигналу термокаталітичного перетворювача використовується електронний потенціометр 10 типу КСП-4 та цифровий мультиметр моделі UNI-T M890G [99].

Експериментальні дослідження можливості застосування термокаталітичного методу для визначення теплоти згорання природного газу проводилися з застосуванням сумішей природного газу відомого складу. В таблиці 1 представлено результати хроматографічного аналізу проб газів, що використовувалися при дослідженні.

Методика проведення вимірювань на розробленій експериментальній установці полягає у наступному:

- у вимірювальну камеру поміщався термокаталітичний перетворювач, який в свою чергу підключався в мостову вимірювальну схему, до виходу якої підключався мілівольтметр;

Таблиця 1 – Компонентний склад та фізико-хімічні показники газу

Найменування фізико-хімічних параметрів газу	Результати аналізу газу				
	Проба №1	Проба №2	Проба №3	Проба №4	
Метан (C1)	98,9585	95,7550	96,0448	92,6690	
Етан (C2)	0,2752	2,3462	2,0619	3,6083	
Пропан (C3)	0,0809	0,7540	0,6614	1,4935	
ізо-Бутан (iC4)	0,0161	0,1196	0,1040	0,2423	
н-Бутан (nC4)	0,0121	0,1162	0,1105	0,4051	
нео-Пентан (неоC4)	0,0001	0,0015	0,0022	0,0012	
ізо-Пентан (iC5)	0,0043	0,0215	0,0256	0,1097	
н-Пентан (nC5)	0,0019	0,0149	0,0189	0,0912	
Гексан+вищ. (C6+вищ.)	0,0041	0,0142	0,0187	0,1660	
Кисень (O2)	0,0063	0,0051	0,0019	0,0051	
Азот (N2)	0,5908	0,6858	0,7865	0,6108	
Двоокис вуглецю (CO2)	0,0497	0,1660	0,1636	0,5978	
Густина відносна, кг/м ³	0,5605	0,5826	0,5806	0,6127	
Нижча теплота згорання (за стандартних умов)	ккал/м ³	9266	9552	9506	9908
	МДж/м ³	33,3595	34,3883	34,2342	35,6701
Число Воббе (нище), МДж/м ³	44,5591	45,0549	49,8213	45,5693	

- на мостову вимірювальну схему від блоку живлення подавалося стабілізована напруга, що відповідає номінальній величині напруги живлення досліджуваного перетворювача;

- через 15 хвилин (після повного прогріву перетворювача і встановлення показань) проводилася балансування мостової вимірювальної схеми (встановлювалося $U_{вих} = 0$);

- перетворювач випробовувався спочатку в середовищі чистого повітря, а потім у вимірювальну камеру по черзі подавалися суміші горючих газів з повітрям.

У вимірювальну камеру подавалося стиснене повітря через стабілізатор витрати, а за допомогою дросельного вентиля встановлювалися прийнятні однакові значення витрат газу-носія.

Далі камера стенду заповнювалася горючим газом, після чого стенд переводився в імпульсний режим.

Для того щоб забезпечити повноту процесу вигорання потрібно більше часу. Перехідний процес вигорання метану в камері об'ємом

33 мм³ відбувається протягом 5 секунд. Таким чином, імпульс напруги живлення складається з 2 етапів: на першому етапі відбувається розігрів порівняльного елемента подачею напруги 600 мВ протягом 2 секунд; на другому етапі подається напруга 1,95 В, що відповідає робочій напрузі, при якій відбувається окислення горючих компонентів і утримується протягом 5 секунд.

Проба аналізованого газу вводилася в потік газу-носія за допомогою каліброваного медичного шприца в пристрій введення (ввід проби газу) об'ємом 0,1-2,0 мл. Ця проба транспортувалася потоком повітря-носія через колонку 6 у вимірювальну камеру 1, де відбувається окислення горючих компонентів газової суміші на вимірювальному терморезисторі. Наявність колонки забезпечує необхідний інтервал часу між моментом введення проби і надходженням її у вимірювальну камеру. Це виключає накладення сигналів від введення проби на корисний сигнал пристрою. У процесі надходження проби горючого газу до термокаталітичного перетворювача на ньому відбувається

каталітична реакція окислення горючих компонентів, яка призводить до нагріву вимірювального терморезистора та розбалансу вимірювальної схеми. Вихідне значення реєструється за допомогою мультиметра. Потім вимірювальна камера промивалася потоком повітря і повторювалися вимірювання. Для кожної суміші проводили щонайменше три експериментальних дослідження для різних витрат газової проби та газу-носія.

Після проведення експериментальних досліджень записували середні значення вихідної напруги для кожної газової суміші. За отриманими результатами були побудовані графіки для чистого повітря і кожного горючого газу.

За допомогою описаної установки забезпечувалася можливість створення температури термokatалітичного перетворювача в діапазоні 300-500 °С, витрата повітря-носія і допоміжного газу в діапазоні від 1 до 5 л / год і об'єм проби аналізованого газу від 0,5 до 1,5 мл.

З приведених експериментальних результатів випливає, що при постійній об'ємній концентрації аналізованих газів в потоці газу-носія, сигнал термokatалітичного детектора однозначно визначається нижчою об'ємною питомою теплою згорання газів, а даний детектор можна використовувати для вимірювань цього важливого показника якості горючих газів і їх сумішей.

В експериментах аналіз кожної газової суміші здійснювався 3 рази, а за результатами цих аналізів визначалася середнє арифметичне значення вихідного сигналу S_i для кожної суміші. Для кожної аналізованої газової суміші здійснювалося обчислення відношення вихідного сигналу S_i до середнього арифметичного значення по чистому метану S_M , прийнятого за еталонний газ, тобто обчислювалася значення:

$$\nabla_s = \frac{S_i}{S_M},$$

Також розраховували відношення нижчої теплоти згорання газової суміші Q_i до теплоти згорання чистого метану Q_M , тобто значення:

$$\nabla_Q = \frac{Q_i}{Q_M}.$$

Значення теплоти згорання для метану прийнято згідно [7] $Q_M = 35,797 \text{ МДж} / \text{м}_3$. За отриманими результатами знаходили значення відносної похибки:

$$\delta = \frac{\nabla_Q - \nabla_s}{\nabla_s} \cdot 100\%.$$

Отримані дані наведено в таблиці 2.

Як видно з наведених результатів експериментальних досліджень розрахункові значення відносної похибки не перевищують 3%, що підтверджує можливість використання термokatалітичного методу для визначення теплоти згорання природного газу та дозволяють вибрати оптимальні режими роботи установки для забезпечення повноти згорання газової проби.

Висновки

Створено експериментальну установку, яка дозволяє здійснювати дослідження термokatалітичного перетворювача в імпульсному режимі введення аналізованого газу в потік газу-носія, що надходить в детектор, що багаторазово зменшує тривалість експериментальних досліджень і матеріальні витрати на їх проведення. Виготовлений макет установки використовувався для дослідження кінетики окислення горючих газів в термokatалітичному перетворювачі, перевірки математичної моделі його статичної характеристики, визначення його інерційності і основних метрологічних характеристик.

Експериментальні дослідження термokatалітичного аналізатора нижчої об'ємної питомої теплоти згорання газів були виконані з використанням газових сумішей з відомими значеннями теплоти згорання, визначених за допомогою хроматографічного аналізу. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість використання такого аналізатора для вимірювань нижчої об'ємної питомої теплоти згорання природних газів, а також газів з низькою концентрацією горючих компонентів,

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень

Назва газу	Q_i , МДж/м ³	S_i , мВ	S_M , мВ	∇_Q	∇_S	δ , %	Витрата газу, мл	Витрати газу-носія, л/год
Проба 1	33,3595	37,60	40,96	0,932	0,918	1,53	1	0,75
		57,50	60,68		0,955	-2,4	1,5	0,75
		38,23	41,80		0,914	1,9	1	1
		64,23	64,23		0,940	-1	1,5	1
Проба 2	34,3883	38,66	40,96	0,961	0,944	-2,4	1	0,75
		56,96	60,68		0,946	1,6	1,5	0,75
		40,61	41,80		0,971	-1,1	1	1
		62,47	64,23		0,973	-1,2	1,5	1
Проба 3	34,2342	39,85	40,96	0,956	0,973	-1,74	1	0,75
		55,88	60,68		0,942	3,0	1,5	0,75
		38,42	41,80		0,941	1,5	1	1
		62,47	64,23		0,935	2,3	1,5	1
Проба 4	35,6701	40,18	40,96	0,996	0,976	1,5	1	0,75
		60,81	60,68		1,01	-2,0	1,5	0,75
		39,78	41,80		0,975	2,2	1	1
		63,09	64,23		0,982	1,4	1,5	1

аналіз яких на відомих калориметрах неможливий. Важливою перевагою описаного аналізатора є те, що він забезпечує можливість вимірювання теплоти згорання малих кількостей газів.

Список використаних джерел

1. EN 1776:2015 Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements.
2. ISO 15112:2007 Natural gas Energy determination.
3. ДСТУ ISO 15112:2019 Природний газ. Визначення енергії (ISO 15112:2018, IDT)
4. Шинкарук Х.М. Аналіз методів та засобів вимірювання теплоти згорання природного газу в Україні та закордоном. *Методи та прилади контролю якості*. 2019.- №2(43). С.78-87.
5. Шинкарук Х.М., Чеховський С.А. Теоретичне обґрунтування можливості застосування термодаталітичного методу для визначення теплоти згорання природного газу. Перспективні технології та прилади. *Науково-технічний журнал*. Луцьк, 2021. №18. С. 18-28

6. Фарзане Н. Г., Илясов Л. В. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических анализаторах. *Измерительная техника*, 1971, №4. С. 34-38

7. ДСТУ ISO 6976 «Природний газ. Обчислення теплоти згорання, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу».

References

1. EN 1776:2015 Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements.
2. ISO 15112:2007 Natural gas – Energy determination.
3. DSTU ISO 15112:2019 Prirodniy gaz. Vyznachennya energiyi (ISO 15112:2018, IDT)
4. Shynkaruk H.M. Analiz metodiv ta zasobiv vimiryuvannya teploti zgoryannya prirodnogo gazu v Ukraini ta zakordonom. *Metodi ta priladi kontrolyu yakosti*. 2019. №2(43). S.78-87.
5. Shynkaruk H.M., Chehovskij S.A. Teoretichne obgruntuvannya mozhlivosti zastosuvannya termokatalitichnogo metodu dlya viznachennya teploti zgoryannya prirodnogo gazu.

Perspektivni tehnologiyi ta priladi. Naukovo-tehnichnij zhurnal. Luck, 2021. №18.

6. Farzane, N.G. Impulsnyj vvod analiziruemogo gaza v avtomaticheskikh analizatorah/ N.G.Farzane, L.V. Ilyasov. Izmeritelnaya tehnika, 1971, №4. S. 34-38.

7. DSTU ISO 6976 «Prirodnij gaz. Obchislennya teploti zgoryannya, gustini, vidnosnoyi gustini i chisla Vobbe na osnovi komponentnogo skladu».

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 691.3.07

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-33-42

МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗІСТАТИКИ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ РІДИННОГО МЕНІСКА ТИПУ ”ВИСЯЧА КРАПЛЯ”

О. Г. Малько, О. В. Кучмистенко, М. В. Шавранський, Т. О. Ваврик, О. С. Царева
Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: pta@iutng.edu.ua

Розроблена математична модель опису капілярної поверхні типу висяча крапля у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь п'ятого порядку, що відповідає п'яти геометричним характеристикам меніска: відстань від вісі меніска до заданої точки на капілярній поверхні, відстані від площини нормальній до поверхні меніска в омбілічній точці до заданої точки на капілярній поверхні, кут між віссю симетрії і нормаллю до капілярної поверхні у заданій точці, площа і об'єм капілярної поверхні обмеженої зрізом горизонтальної площини що проходить через задану точку. Шляхом приведення до безрозмірної форми рівняння вдалося звести до одного задаючого параметра - приведеної гаусівська кривизна в омбілічній точці. Чисельний розв'язок отриманої моделі з наступним приведенням геометричних і фізичних характеристик капілярної поверхні до радіуса капіляра дав можливість змоделювати квазістатичну послідовність поверхонь меніска. Це дало можливість сформулювати методологічну базу визначення статичних і динамічних поверхневих характеристик поверхонь розділу фаз. Також моделювання квазістатики утворення меніска дало можливість з високою точністю визначити значення характеристик меніска у екстремальних випадках, таких як момент максимального тиску у меніску і момент відриву від торця капіляра. Це є методологічним підґрунтям таким відомим методів визначення поверхневих характеристик як метод максимального тиску у меніску та сталагмометричний метод. Також, якщо інтерпретувати отримані результати як квазістатику зміни параметрів висячої краплі розчину поверхнево-активних речовин (висячого пухирця) при сталому об'ємі можна визначити динаміку зміни поверхневого натягу. Чисельний розв'язок системи диференціальних рівнянь та інтерпретація отриманих табульованих результатів проведений у середовищі MathWorks MATLAB, що дало можливість сформулювати багаторівневі систематизовані масиви даних капілярних поверхонь які в можуть бути базовими при подальшій інтерпретації в залежності від поставленої задачі.

Ключові слова: висяча крапля, квазістатика, меніск

Разработана математическая модель описания капиллярной поверхности типа висящая капля в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений пятого порядка, что соответствует пяти геометрическим характеристикам мениска: расстояние от оси мениска до заданной точки на капиллярной поверхности, расстояния от плоскости нормальной к поверхности мениска в омбилической точке к заданной точке на капиллярной поверхности, угол между осью симметрии и нормали к капиллярной поверхности в заданной точке, площадь и объем капиллярной поверхности ограниченной срезом горизонтальной плоскости проходящей через заданную точку. Путем приведения к безразмерной формы уравнения удалось свести к одному задающего параметра - приведенной гауссовской кривизна в омбилической точке. Численное решение полученной модели с последующим приведением геометрических и физических характеристик капиллярной поверхности до радиуса капилляра дал возможность смоделировать квазистатическая последовательность поверхностей мениска. Это позволило сформировать методологическую базу определения статических и динамических поверхностных характеристик поверхностей раздела фаз. Также моделирования квазистатики образования мениска позволило с высокой точностью определить значения характеристик мениска в экстремальных случаях, таких как момент максимального давления в мениске и момент отрыва от торца капилляра. Это методологическим основанием таким известным методов определения поверхностных характеристик как метод максимального давления в мениске и сталагмометричный метод. Также, если интерпретировать полученные результаты как квазистику изменения параметров висячей капли раствора поверхностно-активных веществ (висячего пузырька) при постоянном объеме можно определить динамику

изменения поверхностного натяжения. Численное решение системы дифференциальных уравнений и интерпретация полученных табулированных результатов проведен в среде MathWorks MATLAB, что позволило сформировать многоуровневые систематизированные массивы данных капиллярных поверхностей которые в могут быть базовыми при дальнейшей интерпретации в зависимости от поставленной задачи.

Ключевые слова: висячая капля, квазистатика, мениск.

A mathematical model has been developed for describing a capillary surface of the hanging drop type in the form of a system of fifth-order nonlinear differential equations, which corresponds to five geometric characteristics of the meniscus: the distance from the meniscus axis to a given point on the capillary surface, the distance from the plane normal to the meniscus surface at an umbilical point to a given point on capillary surface, the angle between the axis of symmetry and the normal to the capillary surface at a given point, the area and volume of the capillary surface bounded by a cut of the horizontal plane passing through a given point. By reducing the equation to a dimensionless form, it was possible to reduce to one setting parameter - the reduced Gaussian curvature at the umbilical point. The numerical solution of the obtained model with the subsequent reduction of the geometric and physical characteristics of the capillary surface to the radius of the capillary made it possible to simulate a quasi-static sequence of the meniscus surfaces. This made it possible to form a methodological basis for determining the static and dynamic surface characteristics of interfaces. Also, modeling the quasi-statics of meniscus formation made it possible to determine with high accuracy the values of the characteristics of the meniscus in extreme cases, such as the moment of maximum pressure in the meniscus and the moment of separation from the end of the capillary. This is the methodological basis for such well-known methods for determining surface characteristics as the method of maximum pressure in the meniscus and the stalagmometric method. Also, if the obtained results are interpreted as a quasi-statics of changes in the parameters of a hanging drop of a solution of surfactants (hanging bubble) at a constant volume, it is possible to determine the dynamics of changes in surface tension. The numerical solution of the system of differential equations and the interpretation of the obtained tabulated results was carried out in the MathWorks MATLAB environment, which made it possible to form multilevel systematized data arrays of capillary surfaces, which can be basic for further interpretation, depending on the task at hand.

Key words: hanging drop, quasi-statistics, meniscus.

Питання капілярних явищ цікавило людство вже давно. Особливо важливою була можливість їх застосування у промисловості та народному господарстві. Детально дані властивості міжфазних поверхонь були досліджені ще у минулому столітті Лапласом і Юнгом. Ними був математично промодельований сам процес утворення міжфазних поверхонь. Але із-за складності математичних обчислень та невисокого рівня технологій дані дослідження так і не були впроваджені на практиці.

Проте, на даний час наука і техніка сягнула значного рівня, що зробило актуальним питання використання міжфазних поверхонь. А можливість використання ЕОМ дало змогу значно прискорити вирішення знайдених математичних моделей. Тому, технічним завданням до дипломного проекту обрано математичне моделювання росту рідинних менисків та розробка методології визначення параметрів об'єкту моделювання.

Предметом застосування є визначення поверхневого натягу. Поверхнево-активні властивості мають більшість органічних сполук

(поверхнево-активні речовини - ПАР): спирти, кислоти, аміни, гідроперекиси, 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. Одним з поширених на теперішній час є методи, засновані на аналізі форми краплі або бульбашки, а також сталогометричний метод, який базується на зважуванні висячих крапель у момент відриву.

Однак, розгляд динаміки процесу утворення міжфазних поверхонь є досить важкою і в деяких випадках аналітично не вирішуваною задачею. Проте, як з'ясувалося, для математичного опису досліджуваного об'єкта, необов'язково розглядати зміну мениска в часі. Цілком достатньо розглянути квазистатичний процес росту менисків, який уже не містить зміни часу при описі поверхневих характеристик.

Результатом цього моделювання буде визначення робочих залежностей поверхневих характеристик. На основі отриманих значень складаються табульовані функції приведених

(безрозмірних) значень як фізичних так і геометричних параметрів. Це дасть змогу при знайденому одному з параметрів (наприклад тиску) оцінити усі інші, і тим самим охарактеризувати дану поверхню.

Огляд методів висяча крапля

Міжфазна тензометрія вивчає явище поверхневого натягу. Поверхневий натяг - термодинамічна характеристика поверхні поділу двох середовищ, що знаходяться в рівновазі фаз, обумовлена роботою оборотного ізотермокінетичного утворення одиниці площі цієї поверхні поділу за умови, що температура, обсяг системи і хімічні потенціали всіх компонентів в обох фазах залишаються постійними.

Поверхневий натяг має подвійний фізичний зміст - енергетичний (термодинамічний) і силовий (механічний). Енергетичне (термодинамічне) визначення: поверхневий натяг - це питома робота збільшення поверхні при її розтягуванні за умови сталості температури. Силове (механічне) визначення: поверхневий натяг - це сила, що діє на одиницю довжини лінії, яка обмежує поверхню рідини.

Сила поверхневого натягу спрямована по дотичній до поверхні рідини, перпендикулярно до ділянки контуру, на який вона діє і пропорційна довжині цієї ділянки. Коефіцієнт пропорційності - сила, яка припадає на одиницю довжини контуру - називається коефіцієнтом поверхневого натягу. Він вимірюється в ньютонх на метр. Але більш правильно дати визначення поверхневого натягу, як енергії (Дж) на розрив одиниці поверхні (m^2). У цьому випадку з'являється ясний фізичний зміст поняття поверхневого натягу.

У 1983 році було доведено теоретично і підтверджено даними з довідників, що поняття поверхневого натягу рідини однозначно є частиною поняття внутрішньої енергії (хоча і специфічною: для симетричних молекул близьких за формою до кулястих). Наведені в цій журнальній статті формули дозволяють для деяких речовин теоретично розраховувати значення поверхневого натягу рідини за іншими фізико-хімічними властивостями, наприклад, по теплоті пароутворення або по внутрішньої енергії.

Поверхневий натяг може бути на кордоні газоподібних, рідких і твердих тіл. Зазвичай

мається на увазі поверхневий натяг рідких тіл на кордоні «рідина - газ». У разі рідкої поверхні розділу поверхневий натяг правомірно також розглядати як силу, що діє на одиницю довжини контуру поверхні і яка прагне скоротити поверхню до мінімуму при заданих обсягах фаз.

У загальному випадку прилад для вимірювання поверхневого натягу називається тензіометр.

Одними з основних методів, що застосовуються в міжфазній тензіометрії, є методи лежачої та висячої краплі.

Творцями методу висячої краплі прийнято вважати Ендреса, Хаусера і Такера [2], які з аналізу профілю висячої краплі вперше отримали значення поверхневого натягу з достатньою точністю. Раніше подібні, але невдалі спроби здійснювались низкою авторів, в тому числі Уоррінгтоном [3] і Фергюсоном [4].

В роботі [2] використовувались висячі краплі з екватором, на профілю яких виміряли екваторіальний діаметр $2x_e$ і діаметр $2x_{(m)}$ на відстані mx_e (при $m=2$) від вершини краплі, як зображено на рис. 1.

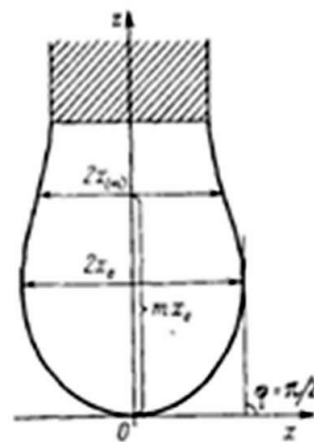


Рисунок 1 – Профіль висячої краплі[2]

Процедура обчислення σ в залежності $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ (остання величина знаходиться з експерименту). Ця залежність була знайдена емпіричним шляхом, а саме з незмінних діаметрів $2x_e$ і $2x_{(m)}$ для різних по розміру і формі крапель води. При цьому величина $x_{(m)}/x_e$ варіювалась від 0,7 до 1.

В більш пізніх роботах отримання залежності $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ також для $m = 2$ здійснювалось вже на основі інтегрування диференціального рівняння

$$\frac{d\varphi}{d\left(\frac{z}{b}\right)} + \frac{\sin \varphi}{\frac{z}{b}} = 2 + \beta\left(\frac{z}{b}\right)$$

в безрозмірному вигляді. Точність отриманих даних була вище, більше того, охоплювалась ширша область зміни $x_{(m)}/x_e$.

Мисак [5] на основі табличних залежностей $1/4cx_e^2$ від $x_{(m)}/x_e$ (для $m=2$) отримав набір апроксимаційних формул, кожна з яких добре працює в інтервалі:

$$T = \left(\frac{0,32720}{S^{2,56651}}\right) - 0,97553S^2 + 0,84059S - 0,18069$$

(для $0,401 \leq S \leq 0,46$)

$$T = \left(\frac{0,31968}{S^{2,59725}}\right) - 0,46898S^2 + 0,50059S - 0,13261$$

(для $0,46 \leq S \leq 0,59$)

$$T = \left(\frac{0,31522}{S^{2,62435}}\right) - 0,11714S^2 + 0,14756S - 0,05282$$

(для $0,59 \leq S \leq 0,68$)

$$T = \left(\frac{0,31345}{S^{2,64267}}\right) - 0,09155S^2 + 0,14701S - 0,05877$$

(для $0,68 \leq S \leq 0,9$)

$$T = \left(\frac{0,30715}{S^{2,84636}}\right) - 0,69116S^3 + 1,08315S^2 - 0,18341S - 0,20970$$

(для $0,9 \leq S \leq 1$)

де $T=1/4cx_e^2$.

Можливості описаного в [2] підходу були розширені в роботах [6] і [7] наряду з екваторіальним діаметром $2x_e$ в [6] пропонувалось вимірювати діаметр $2x_{(m)}$ на відстані mx_e від вершини краплі для $m=1,6; 1,8; 2,2; 2,4$, а в [7] – для $m=1,25; 1,5; 1,75; 2,25$ і $2,5$ (в обох роботах випадок $m=2$ також розглядався). Що стосується залежності, то в [6] вона мала такий же функціональний вигляд, що і в [2], а в [7] для знаходження σ використовувалась таблична залежність $x_{(m)}/x_e$ від $x_e c^{0,5}$.

Інший варіант методу висячої краплі запропонований Уінкелом. Для його реалізація необхідна крапля з шийкою (рис. 2), а вимірюваними величинами служать екваторіальний діаметр краплі $2x_e$ і діаметр шийки $2x_n$.

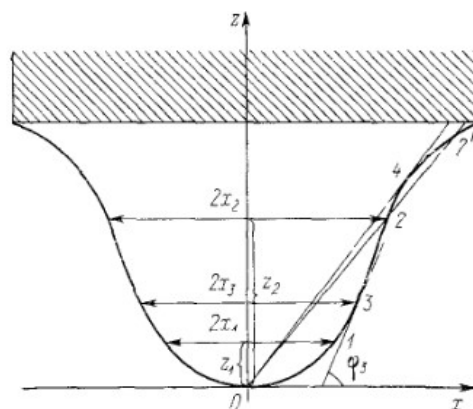


Рисунок 2 – Профіль висячої краплі з шийкою

Описана в цій роботі схема пошуку величини σ з $2x_e$ і $2x_n$ по суті така ж, як і в [2] спочатку знаходиться відношення діаметрів, потім з залежності, що пов'язує це відношення і безрозмірний екваторіальний діаметр визначається s і звідси відповідно σ .

Моделювання квазістатички процесу утворення рідинного меніска

Меніск, що утворюється на торці вихідного отвору круглого капіляру направлено вертикально вниз – є фігурою обертання. Параметри меніска в осьовому перерізі представлені на рис. 1, де φ – кут між нормаллю до поверхні в даній точці і віссю симетрії капілярної поверхні, x і y – декартові координати точки, R_1 і R_2 – радіуси кривизни відповідно в площині нормалі до площини перерізу і в площині перерізу (рис. 3). В процесі зростання бульбашки вздовж осі z , тиск P на рівні торця капіляра описується залежністю [9]:

$$P = \frac{2\sigma}{R_0} + \Delta\rho g z, \quad (1)$$

або

$$P = \sigma K + \Delta\rho g z, \quad (2)$$

де σ – поверхневий натяг рідини, R_0 – радіус кривизни в омбілічній точці, $\Delta\rho$ – різниця густин контактуючих фаз, g – прискорення вільного падіння, $K = 2/R_0$ – гаусова кривизна у омбілічній точці.

Оскільки поверхня меніска є поверхнею двоякої кривизни, то для знаходження поверхневого тиску найкраще скористатися відомою формулою Лапласа [10]:

$$P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

де R_1 і R_2 – радіуси кривизни будь-яких двох взаємно перпендикулярних нормальних перерізів поверхні бульбашки (рис.4). З (1) і (2) випливає:

$$\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = K\sigma + \Delta\rho g z. \quad (4)$$

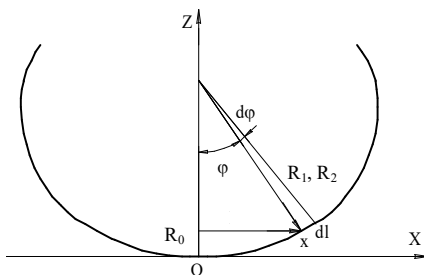


Рисунок 3 – Параметри профілю меніска бульбашки в осьовому перерізі

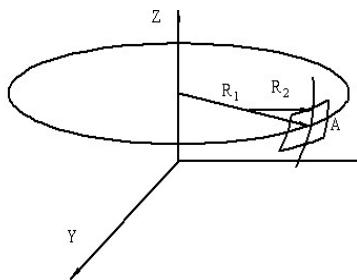


Рисунок 4 - Гаусові радіуси кривизни капілярної поверхні

Виходячи з геометричних властивостей поверхонь обертання, радіуси кривизни, що лежать в площинах осьового перерізу і перпендикулярні до осьового перерізу відповідно дорівнюють [6]:

$$R_1 = \frac{dL}{d\varphi}, \quad R_2 = \frac{x}{\sin \varphi}, \quad (5)$$

де dL – диференціал дуги осьового перерізу; φ – кут між нормаллю до капілярної поверхні і віссю симетрії.

Підставивши (5) у (4), можна отримати вихідне диференціальне рівняння:

$$\sigma \left(\frac{\sin \varphi}{x} + \frac{d\varphi}{dL} \right) = K\sigma - \Delta\rho g z. \quad (6)$$

Для узагальнення параметрів меніска доцільно поділити обидві частини (6) на $\Delta\rho g$ та використати поняття капілярної сталої [10]:

$$a^2 = \frac{\sigma}{\Delta\rho g}. \quad (7)$$

Тоді з (6) отримаємо:

$$a^2 \left(\frac{\sin \varphi}{x} + \frac{d\varphi}{dL} \right) = Ka^2 - z. \quad (8)$$

Для приведення до безрозмірної форми рівняння (9) можна записати у вигляді:

$$\frac{\sin \varphi}{(x/a)} + \frac{d\varphi}{d(L/a)} = (Ka) - (z/a),$$

або

$$\frac{\sin \varphi}{x_a} + \frac{d\varphi}{dL_a} = K_a - z_a, \quad (9)$$

де

$$x_a = x/a,$$

$$L_a = L/a,$$

$$K_a = K \cdot a,$$

$$z_a = z/a$$

(10)

Виходячи з властивостей поверхонь обертання, можна вивести додаткові диференціальні рівняння [6]:

$$\frac{dx_a}{dL_a} = \cos \varphi, \quad \frac{dz_a}{dL_a} = \sin \varphi, \quad (11)$$

$$\frac{dV_a}{dL_a} = \pi \cdot x_a^2 \cdot \sin \varphi, \quad \frac{dS_a}{dL_a} = 2\pi x_a$$

де

$$V_a = V/a^3, \quad S_a = S/a^2 \quad (12)$$

- відповідно приведені об'єм меніска і його площа.

Об'єднання диференціальних рівнянь (8) та (11) у систему дає математичну модель капілярної поверхні меніска повітряної бульбашки, що утворюється на торці вертикально зануреного у рідину капіляра:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dL_a} = K_a - \frac{\sin \varphi}{x_a} - z_a, \\ \frac{dx_a}{dL_a} = \cos \varphi, \quad \frac{dz_a}{dL_a} = \sin \varphi, \\ \frac{dV_a}{dL_a} = \pi x_a^2 \sin \varphi, \quad \frac{dS_a}{dL_a} = 2\pi x_a. \end{cases} \quad (13)$$

При цьому початкові умови в омбілічній точці ($L_a = 0$):

$$\varphi = 0, \quad x_a = 0, \quad z_a = 0, \quad S_a = 0, \quad V_a = 0. \quad (14)$$

Система нелінійних диференціальних рівнянь (13), (14) не піддається аналітичному розв'язку, тому варто застосувати чисельні методи інтегрування.

Виходячи з умов (14) на першому кроці інтегрування системи (13) виникає невизначеність типу 0/0 у виразі $\sin\varphi/x_a$. Для розкриття цієї невизначеності слід скористатися тим, що із умови симетрії випливає рівність радіусів кривизни $R_1=R_2=R_0$ (рис.4) у омбілічній точці [9], тобто:

$$\lim_{L_a \rightarrow 0} \frac{d\varphi}{dL_a} = \lim_{L_a \rightarrow 0} \frac{\sin \varphi}{x_a} = \frac{1}{R_{0a}} = \frac{K_a}{2}. \quad (15)$$

Для зручності використання тиск у рівнянні (1) можна також привести до безрозмірного вигляду:

$$P_a = \frac{P}{\Delta\rho g a} = K_a - z/a = K_a - z_a. \quad (16)$$

Розв'язком математичної моделі (13) – (15) – є множина капілярних поверхонь, форма яких визначається значенням параметра приведеної гаусової кривизни K_a .

Процес інтегрування системи (13) починається при початкових умовах (14) з урахуванням (15). При цьому наперед задаються значенням параметра $a_r^2 = (a/r)^2$ (капілярної сталої приведеної до радіуса капіляра), який відображає величину ПН. Розв'язується крайова задача шляхом варіації параметра K_a .

Точка кінця інтегрування знаходиться при досягненні рівності $x_a=r_a$, де $r_a=(r/a)=(1/a_r)$, при цьому другою крайовою умовою є досягнення, монотонно зростаючою характеристикою меніска заданого дискретного значення.

Для представлення квазістатичного утворення газової бульбашки слід вибрати такі характеристики меніска, які монотонно змінюються з його ростом і можуть приймати наперед задані дискретні значення. Виходячи з мети моделювання у якості такої характеристики вибрано об'єм меніска V_a і кут між нормаллю до капілярної поверхні і віссю симетрії φ . Як показали результати моделювання, інші характеристики (висота, площа, довжина дуги осьового перерізу меніска) не є монотонними. Зростаюча послідовність дискретних значень цих характеристик відповідає набору капілярних поверхонь, що відображає квазістатичне утворення газової бульбашки для заданого значення a_r^2 (сталого ПН при заданому радіусі капіляра) (рис.5).

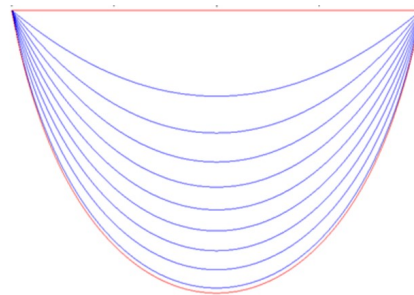


Рисунок 5 – Послідовність капілярних поверхонь для $a_r^2 = 1$

Отримані результати моделювання для зручності практичного використання доцільно привести до радіуса капіляра r шляхом наступних перетворень [9]:

$$z_r = z/r = z_a a_r,$$

$$l_r = l/r = l_a a_r,$$

$$S_r = S/r^2 = S_a a_r^2, \quad V_r = V/r^3 = V_a a_r^3,$$

$$K_r = Kr = K_a / a_r,$$

$$P_r = \frac{P}{\Delta\rho g r} = K_a a_r + z_a a_r = K_r a_r^2 + z_r.$$

Умови відриву краплі (спливання газового пухирця)

На краплю у вертикальному напрямку діють дві основні сили:

– сила тяжіння, яка в даному випадку дорівнює $mg = V\Delta\rho g$, де m , V – маса та об'єм краплі, g – гравітаційна стала;

- сила поверхневого натягу по периметру капіляра, при $x = r$ вона дорівнює $2\pi r\sigma \cos\varphi$ де σ – величина поверхневого натягу, r – радіус капіляра.

Таким чином умовою відриву краплі (спливання газового пухирця) є стан коли сила тяжіння стане більшою за вертикальну складову сили поверхневого натягу:

$$V\Delta\rho g \geq 2\pi r\sigma \cos\varphi.$$

Перетворимо дану умову для змінних,

$$\text{приведених до капілярної сталої } a^2 = \frac{\sigma}{\Delta\rho g}$$

$$V\Delta \rightarrow \rho g \geq 2\pi r a^2 \cos\varphi \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V \geq 2\pi r a^2 \cos\varphi \Rightarrow \frac{V}{a^3} \geq \frac{2\pi r}{a} \cos\varphi$$

Звідси кінцевою умовою є

$$V_a \geq 2\pi r_a \cos\varphi.$$

Блок - схема загального алгоритму числового моделювання процесу утворення газової бульбашки представлена на рис.4. Вихідною інформацією є: значення a_r^2 ; похибка на кроці ϵ ; крок дискретизації по об'єму ΔV_a і наближене значення кривизни в омбілічній точці K_{a0} .

Підпрограма "surface" охоплює стандартну процедуру розв'язку нелінійних рівнянь методом нев'язок, за допомогою якої виконується варіювання параметром K_a , до виконання умови $|x_a - 1| < 15\epsilon$. Програма одночасно розрахована на пошук значень параметрів $P_{a_{max}}, V_{a_{max}}$. Якщо значення параметра, по якому визначається максимум, більше за його значення для попереднього, то виконується приріст дискретного об'єму V на величину ΔV_a . Шляхом квадратичної екстраполяції визначається наближене значення K_a і процес повертається до підпрограми

розв'язку нелінійних рівнянь для наступного значення приросту дискретного об'єму V .

Якщо максимум не знаходиться, то визначається наближене значення V_a , що відповідає цьому максимуму за методом квадратичної інтерполяції, і значення K_a , що знаходиться методом «золотого» перерізу або квадратичної інтерполяції, в залежності від інтервалу пошуку екстремуму по V_a . Після цього процес розв'язку переходить знову до процедури розв'язку нелінійних рівнянь.

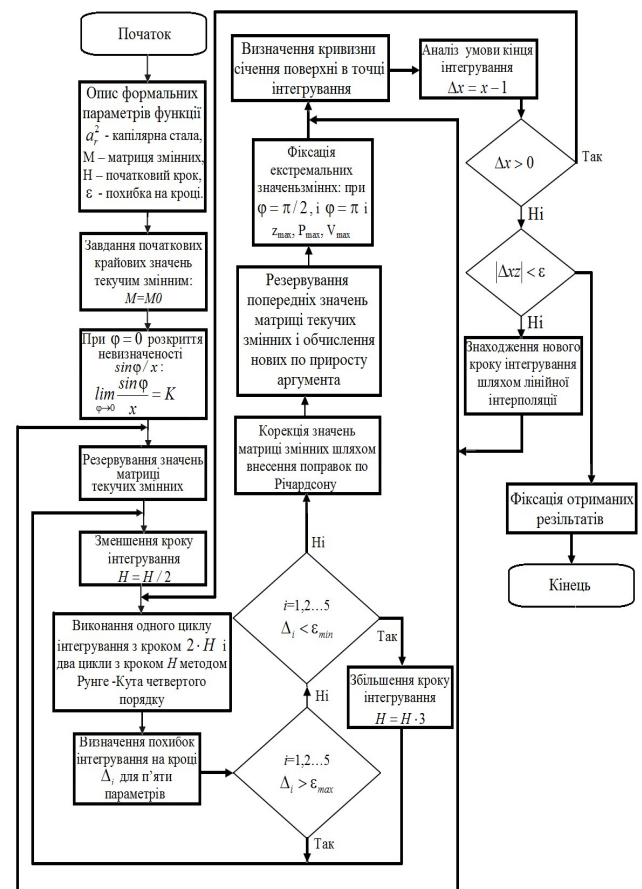


Рисунок 6 – Алгоритм чисельного моделювання квазістатичного процесу зростання рідинного мениска

У результаті моделювання квазістатистики зростання висячої краплі для різних значень поверхневого натягу (у безрозмірній формі параметра a_r^2).

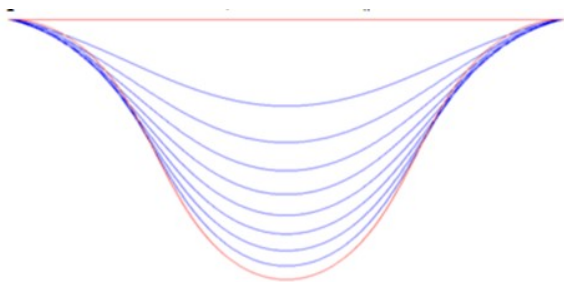


Рисунок 7 – Крапля з $a_r^2 = 0.1.$, $dL = 0.01$

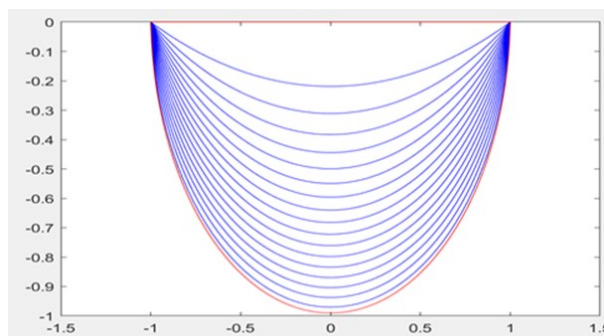


Рисунок 11 – Крапля з $a_r^2 = 10.$, $dL = 0.01$

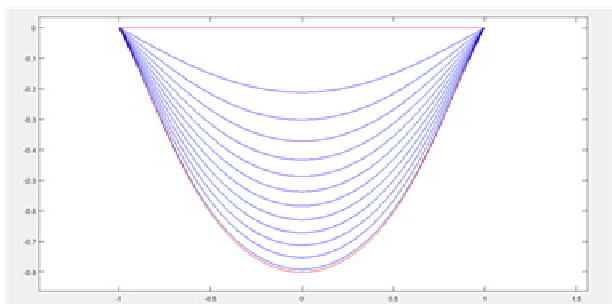


Рисунок 8 – Крапля з $a_r^2 = 0.3.$, $dL = 0.01$

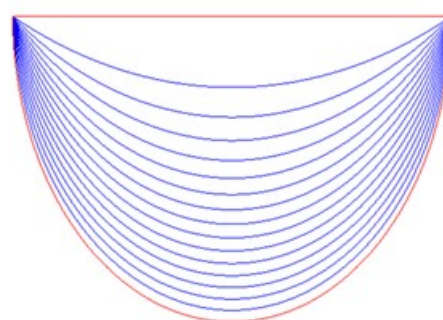


Рисунок 12 – Крапля з $a_r^2 = 50.$, $dL = 0.01$

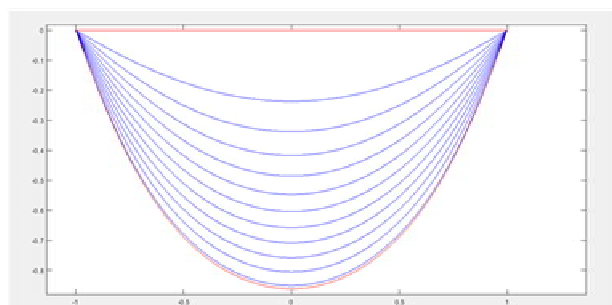


Рисунок 9 – Крапля з $a_r^2 = 0.5.$, $dL = 0.01$

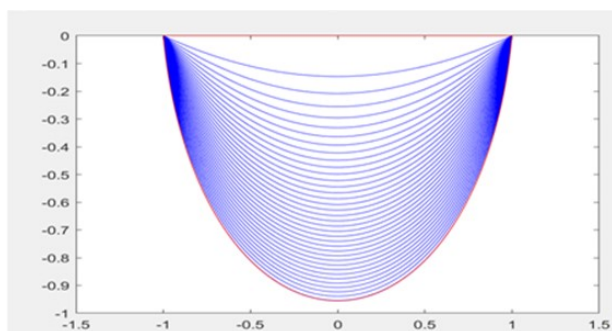


Рисунок 10 – Крапля з $a_r^2 = 1.0.$, $dL = 0.01$

Розраховані значення параметрів меніска приведені до радіуса капіляра у момент відриву для різних значень поверхневого натягу наведені у таблиці 1.

Висновки

У результаті чисельного моделювання квазістатичного процесу утворення меніска типу висяча крапля був отриманий багаторівневий структурований пакет даних. Різновекторна обробка цих даних дає можливість розробити методологічні основи ряду методів визначення статичних і динамічних поверхневих характеристик по вимірним фізичним і геометричним характеристикам меніска

Таблиця 1 – Параметри поверхневого натягу

a_r^2	φ	z_r	K_r	L_r	S_r	V_r
0.2	36.133	0.7437	3.2825	2.5699	4.3166	1.0149
0.3	49.421	0.8012	2.8888	2.6710	4.6501	1.2262
0.4	57.161	0.8371	2.6886	2.7422	4.8858	1.3629
0.5	62.308	0.8614	2.5644	2.7941	5.0599	1.4599
0.6	66.007	0.8791	2.4792	2.8336	5.1941	1.5330
0.7	68.804	0.8927	2.4168	2.8648	5.3008	1.5902
0.8	71.001	0.9033	2.3691	2.8901	5.3879	1.6364
0.9	72.774	0.9120	2.3314	2.9110	5.4605	1.6746
1.0	74.238	0.9192	2.3008	2.9287	5.5219	1.7068
1.5	78.908	0.9425	2.2062	2.9872	5.7276	1.8132
2.0	81.427	0.9553	2.1571	3.0203	5.8451	1.8734
2.5	83.008	0.9634	2.1270	3.0417	5.9213	1.9122
3.0	84.095	0.9690	2.1066	3.0566	5.9749	1.9393
3.5	84.888	0.9731	2.0919	3.0676	6.0146	1.9594
4.0	85.493	0.9762	2.0807	3.0761	6.0452	1.9749
4.5	85.970	0.9787	2.0720	3.0828	6.0695	1.9871
5.0	86.355	0.9807	2.0650	3.0883	6.0893	1.9971
6.0	86.940	0.9838	2.0544	3.0967	6.1197	2.0124
7.0	87.363	0.9860	2.0467	3.1028	6.1418	2.0235
8.0	87.683	0.9877	2.0410	3.1074	6.1586	2.0320
9.0	87.934	0.9890	2.0365	3.1111	6.1719	2.0386
10.0	88.135	0.9901	2.0329	3.1140	6.1826	2.0440
15.0	88.747	0.9933	2.0220	3.1230	6.2152	2.0604
20.0	89.057	0.9950	2.0166	3.1276	6.2319	2.0687
25.0	89.244	0.9960	2.0133	3.1303	6.2420	2.0738
30.0	89.368	0.9966	2.0111	3.1322	6.2487	2.0772
35.0	89.458	0.9971	2.0095	3.1335	6.2536	2.0796
40.0	89.526	0.9975	2.0083	3.1345	6.2573	2.0814
45.0	89.578	0.9977	2.0074	3.1353	6.2601	2.0829
50.0	89.620	0.9980	2.0066	3.1359	6.2624	2.0840
60.0	89.683	0.9983	2.0055	3.1369	6.2659	2.0857
70.0	89.728	0.9985	2.0048	3.1375	6.2683	2.0870
80.0	89.762	0.9987	2.0042	3.1380	6.2702	2.0879
90.0	89.788	0.9989	2.0037	3.1384	6.2716	2.0886
100.0	89.810	0.9990	2.0033	3.1387	6.2728	2.0892

Список використаних джерел

1. Роулинсон Дж., Уидом Б. Молекулярная теория капиллярности.: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 376 с.
2. Semmler A, Reinhold Ferstl R., Kohler H. New Laser Technique for Automatic Interfacial Tension Measurements: Laser Scanning Drop Shape Analysis (LASDA). Langmuir 1996, 12 (17) , 4165-4172.
3. Worthington A M Proc Roy Soc 1981 V 32, № 214 C.362 - 377
4. Boucher E. A. Capillary phenomena: Properties of systems with fluid/fluid interfaces. Rep. Prog. Phys., V. 43, N. 4, 1980 P. 43-49
5. Misak M D //J Colloid Interface Sci 1968 V 27, №1 C.141-142
6. Roe R -J, Bacchetta V I, Wong P M G J Phys Chem 1967 V 71, № 13 C.4190 - 4193
7. Ramakrishnan S, Princz J F, Hartland S Indian J Pure Appl Phys 1977 V 15, № 4 C.228 - 233]
8. Winkel D J Phys Chem 1965 V 69, № 1 C.348 - 350
9. Малько О. Г., Кісіль І. С., Малько А. О. Характеристики меніска газової бульбашки в околі максимального тиску в ній. *Методи та прилади контролю якості*. 2008. №21. С.77–82.
10. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: "Мир", 1979. 568 с.
11. А.В. Погорелов Дифиринциальная геометрия. М.: Издательство наука, 1974 176 с.

References

1. Roulynson Dzh., Uydom B. Molekulyarnaya teoriya kapylyarnosty.: Per. s angl. M.: Myr, 1986. 376 s.
2. Semmler A, Reinhold Ferstl R., Kohler H. New Laser Technique for Automatic Interfacial Tension Measurements: Laser Scanning Drop Shape Analysis (LASDA). Langmuir 1996, 12 (17) , 4165-4172.
3. Worthington A M Proc Roy Soc 1981 V 32, № 214 C.362 - 377
4. Boucher E. A. Capillary phenomena: Properties of systems with fluid/fluid interfaces. Rep. Prog. Phys., V. 43, N. 4, 1980 P. 43-49
5. Misak M D //J Colloid Interface Sci 1968 V 27, №1 C.141-142
6. Roe R -J, Bacchetta V I, Wong P M G J Phys Chem 1967 V 71, № 13 C.4190 - 4193
7. Ramakrishnan S, Princz J F, Hartland S Indian J Pure Appl Phys 1977 V 15, № 4 C.228 - 233]
8. Winkel D J Phys Chem 1965 V 69, № 1 C.348 - 350
9. Malko O. G., Kisil I. S., Valko A. O. Harakteristiki meniska gazovoyi bulbashki v okoli maksimalnogo tisku v niy *Metodi ta priladi kontrolyu yakosti*. 2008. №21. S.77–82.
10. Adamson A. Fizicheskaya himiya poverhnostey. M.: "Mir", 1979. 568 s.
11. Pogorelov A. V. Difirintsialnaya geometriya. M.: Izdatelstvo nauka, 1974. 176 s.

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 532.6.08

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-43-52

ВИБІР МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАФТОВИЛУЧЕННЯ

В. Б. Біліщук, Р. Т. Боднар, О. Г. Малько

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

Розглянуто актуальність застосування розчинів поверхнево-активних речовин в нафтовидобутку. Вказано, що для підвищення видобутку нафти з надр використовують фізико-хімічні методи впливу на продуктивні пласти із застосуванням поверхнево-активних речовин. Для оцінки ефективності застосуванням поверхнево-активних речовин вимірюють поверхневий натяг на межі розчин поверхнево-активної речовини – газ і міжфазний натяг на межі розчин поверхнево-активної речовини – нафта. Зроблений аналіз існуючих методів для вимірювання поверхневого натягу. На основі зробленого аналізу показано, що існує значне різноманіття методів визначення поверхневого натягу рідин, які можна згрупувати таким чином: методи визначення поверхневого натягу рідин, засновані на вивченні профілів менісків рідини фіксованої форми; методи двох менісків; методи екстремальних значень параметрів; методи, які використовують меніски на межі стійкості; спеціальні динамічні методи; методи, які використовують поле обертання. Вказано, що всі методи вимірювання поверхневого натягу є опосередкованими. Перелічено інформативні параметри, які контролюють або вимірюють для визначення поверхневого натягу розглянутими методами. Зазначено методи, що набули широкого розповсюдження: метод пластинки Вільгельма; методи лежачої, звисаючої і обертової краплі; метод притиснутої бульбашки, метод підрахунку крапель, метод відриву кільця, метод вимірювання максимального тиску в бульбашці газу. Розглянуто принцип побудови приладів, які реалізують методи вимірювання поверхневого натягу, вказано на особливості їх функціонування. Здійснено порівняльний аналіз методів і приладів для вимірювання поверхневого і міжфазного натягу рідин. На основі цього аналізу здійснений вибір методів для вимірювання міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин: методи лежачої або звисаючої крапель, об'єму крапель і обертової краплі.

Ключові слова: міжфазний натяг, поверхневий натяг, крапля, меніск, капіляр, капілярний тиск, кривизна.

Рассмотрены актуальность применения растворов поверхностно-активных веществ в нефтедобыче. Указано, что для повышения добычи нефти из недр используют физико-химические методы воздействия на продуктивные пласты с применением поверхностно-активных веществ. Для оценки эффективности применением поверхностно-активных веществ измеряют поверхностное натяжение на границе раствор поверхностно-активного вещества - газ и межфазное натяжение на границе раствор поверхностно-активного вещества - нефть. Сделан анализ существующих методов для измерения поверхностного натяжения. На основе сделанного анализа показано, что существует значительное многообразие методов определения поверхностного натяжения жидкостей, которые можно сгруппировать следующим образом: методы определения поверхностного натяжения жидкостей, основанные на изучении профилей менисков жидкости фиксированной формы; методы двух менисков; методы экстремальных значений параметров; методы, которые используют мениски на границе устойчивости; специальные динамические; методы, которые используют поле вращения. Указано, что все методы измерения поверхностного натяжения являются опосредованными. Перечислены информативные параметры, которые контролируют или измеряют для определения поверхностного натяжения рассмотренными методами. Указано методы, получившие широкое распространение: метод пластинки Вильгельма; методы лежащей, свисающей и вращающейся капли; метод прижатой пузырьки, метод подсчета капель, метод отрыва кольца, метод измерения максимального давления в пузырьке газа. Рассмотрены принцип построения приборов, реализующих методы измерения

поверхностного натяжения, указано на особенности их функционирования. Осуществлен сравнительный анализ методов и приборов для измерения поверхностного и межфазного натяжения жидкостей. На основе этого анализа осуществлен выбор методов для измерения межфазного натяжения растворов поверхностно-активных веществ: методы лежащей или свисающей капель, объема капель и вращающейся капли.

Ключевые слова: межфазное натяжение, поверхностное натяжение, капля, мениск, капилляр, капиллярное давление, кривизна.

The relevance of the use of surfactant solutions in oil production is considered. It is indicated that physicochemical methods of influence on productive strata with the use of surfactants are used to increase oil production from subsoil. To evaluate the effectiveness of the use of surfactants measure the surface tension at the boundary of the solution of surfactant - gas and the interfacial tension at the boundary of the solution of surfactant - oil. An analysis of existing methods for measuring surface tension. Based on the analysis, it is shown that there is a significant variety of methods for determining the surface tension of liquids, which can be grouped as follows: methods for determining the surface tension of liquids, based on the study of the profiles of the menisci of the fluid of a fixed shape; methods of two menisci; methods of extreme values of parameters; methods that use menisci on the verge of stability; special dynamic methods; methods that use the field of rotation. It is stated that all methods of measuring surface tension are indirect. The informative parameters which control or measure for definition of a surface tension by the considered methods are listed. The methods that have become widespread are indicated: the Wilhelm plate method; methods of lying, hanging and rotating drop; the method of the pressed bubble, the method of counting drops, the method of separation of the ring, the method of measuring the maximum pressure in the gas bubble. The principle of construction of devices that implement methods of measuring surface tension is considered, the peculiarities of their functioning are indicated. The comparative analysis of methods and devices for measurement of surface and interfacial tension of liquids is carried out. Based on this analysis, a choice of methods for measuring the interfacial tension of surfactant solutions was made: methods of lying or hanging drops, drop volume and rotating drop.

Key words: interfacial tension, surface tension, drop, meniscus, capillary, capillary pressure, curvature.

Вступ. Збільшення кількості нафти, що видобувається з продуктивних горизонтів, є одним з найбільш важливих завдань розробки нафтових родовищ. В даний час відомий ряд методів збільшення нафтовилучення, таких як фізико-гідродинамічні, теплові, фізико-хімічні й ін. Однак жоден з них не є універсальним і може бути застосований у якихось певних фізико-геологічних і промислових умовах.

Одними з методів підвищення ступеня видобутку нафти з надр є фізико-хімічні методи впливу на продуктивні пласти із застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАР), які є найбільш доступними (особливо при використанні їх розчинів з низьким вмістом). Ці методи не вимагають великих додаткових капіталовкладень і унікального чи дефіцитного устаткування, виробництво ПАР налагоджено в досить широких масштабах [1].

Аналіз публікацій та постановка завдання дослідження. Залежно від мети оброблення розчини поверхнево-активних речовин можуть використовуватись для: зміни змочування поверхні породи, емульгування, антиемульгування, зниження твердості, очищення, гідрофобізації привибійної зони пласта з метою збільшення нафтовіддачі.

Загалом поверхнево-активні системи є водним, кислотним або вуглеводневим розчином, що містить поверхнево-активну речовину концентрацією 0,1–1 %, а за можливості, і 2–10 %. Нафтовитіснявальну функцію мають більшість ПАР, але найвищі показники витіснення залишкової нафти характерні для водних мицелярних розчинів та оксиетильованих ПАР [2, 3, 4].

Ефективність оброблення привибійної зони пласта поверхнево-активними речовинами залежить від великої кількості чинників як геолого-промислових, так і технологічних, що зустрічаються під час проведення конкретного методу інтенсифікації. До технологічних чинників відносяться тип ПАР та їх концентрація, кількість оброблень тощо [5].

Виходячи з вище сказаного існує актуальна задача контролю поверхневих властивостей розчинів ПАР, які використовують в конкретних умовах. Вибір типу ПАР і його концентрації в розчинах ПАР для технологічних процесів необхідно здійснювати з урахуванням фізико-хімічних параметрів контактуючих з цими розчинами інших фаз (газ, порода пласта, нафта), а також пластових умов, при яких проходять відповідні процеси.

Одними із найбільш визначальних параметрів, які характеризують якість підібраних для тих чи інших процесів ПАР у розчинах і які досить легко визначити без впливу різних суб'єктивних факторів, є поверхневий натяг (поверхнева енергія на межі контакту "розчин ПАР - газ") і міжфазний натяг (поверхнева енергія на межі контакту "розчин ПАР - пластова нафта" (конденсат). Вимірювання цих параметрів на вказаних вище межах контакту дозволить на основі отриманих результатів здійснювати підбір виду ПАР і його концентрацій у розчинах в залежності від пластових умов, особливо тоді, коли такі умови можуть бути відтвореними в процесі проведення вимірювань.

Сумарна енергія частинок рідини складається з енергії їх хаотичного (теплого) руху і потенційної енергії, обумовленої силами міжмолекулярної взаємодії. Для переміщення молекули з глибини рідини в поверхневий шар треба витратити роботу. Ця робота здійснюється за рахунок кінетичної енергії молекул і йде на збільшення їх потенційної енергії. Тому молекули поверхневого шару рідини мають більшу потенційну енергію, ніж молекули всередині рідини. Ця додаткова енергія, яку мають молекули в поверхневому шарі рідини, названа поверхневою енергією, пропорційна площі шару dS [6]:

$$dA = \sigma dS, \quad (1)$$

де σ – поверхневий натяг.

Поверхневий натяг залежить від домішок, наявних в рідині. Наприклад, наявність у воді найменшої кількості поверхнево-активних речовин зменшує її поверхневий натяг.

Метою роботи є огляд методів і засобів вимірювання поверхневого натягу рідин і вироблення рекомендацій щодо їх використання.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо існуючі методи вимірювання поверхневого натягу (табл. 1) [7]. Усі методи вимірювання поверхневого натягу є опосередкованими. До інформативних параметрів, на основі яких визначають поверхневий натяг, відносяться: характерні розміри менісків рідин (висота, діаметр та ін), координати точок профілю меніска (від 3 до 10000 і більше), кут нахилу меніска в характерних точках, діюча сила на занурене у рідину тіло, густина або різниця густин контактуючих фаз, та ін. При контакті

рідин з твердими тілами враховують змочування їх рідиною. Як видно на даний час розроблено велику кількість методів вимірювання поверхневого натягу, в яких використовують різноманітну кількість інформативних параметрів, що обумовлено особливостями застосування цих методів.

При розробці або використанні відповідних приладів також є важливими питаннями є забезпечення зручності і автоматизації процесів при проведенні досліджень, хімічної стійкості використаних деталей приладу, що контактують з досліджуваними речовинами.

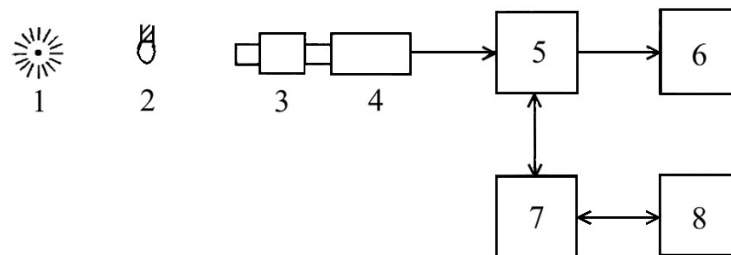
На практиці найбільшого поширення набули такі методи визначення поверхневого або міжфазного натягу рідин:

- метод вимірювання ваги зануреного предмета в досліджувану рідину (метод пластинки Вільгельма);
- метод вимірювання геометричних розмірів вільних поверхонь розділу фаз (методи лежачої, звисаючої або обертової краплі, методи лежачої, притиснутої бульбашки);
- сталагмометричний метод (метод підрахунку крапель);
- метод вимірювання зусилля відриву предмета від поверхні розділу фаз (відриву кільця – метод Дю-Нуї);
- метод вимірювання максимального тиску в бульбашці газу (метод Шредінгера).

Характерною особливістю методів визначення поверхневого натягу рідин, заснованих на вивченні профілів менісків рідини є застосування оптичних засобів для вимірювання геометричних розмірів краплі. Значення поверхневого натягу розраховують, використовуючи табличні дані, виміряних розмірів краплі, різниці густин рідини і оточуючого газу. В доцифровий період в таких приладах використовували вимірювальні мікроскопи або установки, в яких проектували зображення краплі рідини на екран. В сучасних приладах (рис. 1) використовують відеокамеру і комп'ютер. За допомогою відеокамери отримують цифрове зображення краплі або меніска рідини, а за допомогою комп'ютера (точніше програмного забезпечення, яке працює на комп'ютері) здійснюють необхідні вимірювання розмірів меніска рідини і розрахунок поверхневого натягу. Застосування комп'ютера дає змогу автоматизувати процеси вимірювання.

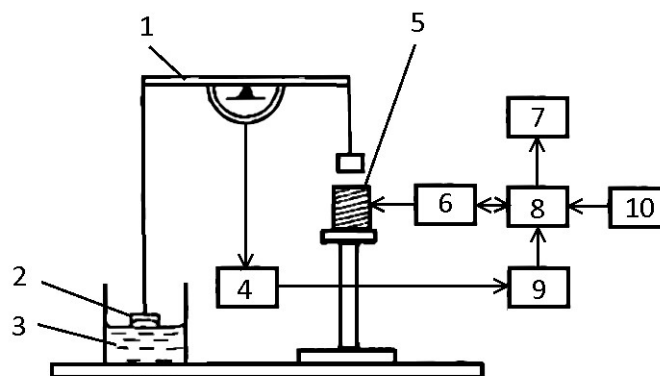
Таблиця 1 – Класифікація методів вимірювання поверхневого натягу

Підклас методів	Назва методу	Вимірювані або контрольовані параметри
Методи визначення поверхневого натягу рідин, засновані на вивченні профілів менісків рідини фіксованої форми	Метод лежачої краплі	Радіус кривизни, висота краплі, екваторіальний діаметр, діаметр „шийки”, відстань від екватора до вершини, координати точок
	Метод звисаючої краплі	Координати точок профілю меніска краплі (кількість залежить від отриманих даних в експерименті і складає від 20 до 100000)
	Ітераційні варіанти методів лежачої і звисаючої краплі	Діаметр циліндра, висота меніска, діаметр меніска на певній висоті (з прив'язкою до діаметра циліндра), діаметр "шийки" меніска
	Метод розгорнутого меніска	Діаметр циліндра, координати точок профілю меніска
	Ітераційний варіант методу розгорнутого меніска [8]	Висота підйому рідини в капілярі, радіус капіляра
	Капілярного підняття	Висоту підйому рідини між циліндрами, діаметри циліндрів.
	Капілярного підняття в кільцевому зазорі	
Методи двох менісків	Метод меніска у плоскій стінки	Висота меніска, крайовий кут змочування, координати і кут нахилу в двох точках меніска
	Метод вертикального циліндра	Сила, що діє на циліндр з боку рідини, радіус циліндра, глибина занурення або висота підняття циліндра
	Метод пластинки Вільгельма	Сила, що діє на пластинку з боку рідини, розміри пластинки
Методи екстремальних значень параметрів	Метод максимальної висоти лежачої краплі	Екстремум висоти краплі при збільшенні її об'єму
	Метод витягування вертикального циліндра	Максимальне значення сили, яка діє на циліндр з боку рідини під час його піднімання, діаметр циліндра
	Метод витягування кулі	Максимальне значення сили, яка діє на кулю з боку рідини під час її піднімання, висота піднімання кулі, діаметр кулі
	Метод витягування конуса	Максимальне значення сили, яка діє на конус з боку рідини під час його піднімання, розміри конуса і кут при його вершині
	Методи витягування пластинки і порожнистого циліндра	Максимальне значення сили, яка діє на пластинку або циліндр з боку рідини під час піднімання, довжина пластинки, діаметр циліндра
	Методи витягування горизонтального циліндра і кільця	Максимальне значення сили, яка діє на циліндр або кільце з боку рідини під час піднімання, діаметр циліндра, діаметр дротини кільця, діаметр кільця.
Методи, які використовують меніски на межі стійкості	Метод максимального тиску в бульбашці або краплі	Максимальний тиск в бульбашці, діаметр капіляра, глибина занурення капіляра
	Метод ваги крапель	вимірюванні ваги або об'єму краплі рідини, що відривається від капіляра, радіус капіляра
	Метод максимальної висоти висячої краплі	Максимальна висота краплі перед відривом, радіус капіляра
	Методи відриву тіл	Максимальне значення сили що діє на тіло при його витягуванні з рідини, форма, вага і розміри тіла
Спеціальні динамічні методи	Метод осцилюючого струменя	Частота коливань струменя, розміри і форма отвору, швидкість струменя або розхід рідини, в'язкість рідини
	Метод струменевого принтера	Швидкість і максимальна довжина струменя рідини, кінетична в'язкість рідини
	Метод рідкої завіси	Швидкість рідини, потік маси рідини на одиницю ширини завіси, кут розходження завіси після перешкоди
	Метод капілярних хвиль	Частота коливань, довжина хвилі на поверхні рідини, в'язкість рідини
Методи, які використовують поле обертання	Метод обертової краплі	Діаметр, довжина обертової краплі, частота обертання
	Метод обертового стрижня	Частота обертання капіляра в центрифусі, радіус обертання торця капіляра, радіус капіляра, кут нахилу капіляра до осі обертання, довжина стовпа рідини в капілярі



1 – джерело світла, 2 – крапля, 3 – мікроскоп, 4 – відеокамера, 5 – відеопроцесор, 6 – монітор, 7 – комп'ютер, 8 – термінал

Рисунок 1 – Схема приладу в методах вивчення профілів менісків рідини фіксованої форми



1 – коромисло ваг, 2 – пластинка, 3 – рідина, 4 – давач положення ваг, 5 – магнітна система, 6 – підсилювач-задавач струму, 7 – дисплей, 8 – мікропроцесорний блок, 9 – підсилювач, 10 – клавіатура

Рисунок 2 – Схема приладу в методах вимірювання сили

В оптичних приладах вагомим питанням є якість підсвічування краплі рідини. В якості джерела світла відомі випадки використання газорозрядних, дугових і ламп розжарювання. Останнім часом їх замінили більш економічні джерела світла – світлодіоди. Додатково в таких приладах можуть використовувати фільтри для отримання монохроматичного світла і матовий екран для створення рівномірного освітлення.

Істотною умовою отримання якісного зображення краплі (відсутність відблисків через відбиття світла, рівномірне освітлення) є паралельність променів від освітлювача. Це досягається використанням відповідної коліматорної лінзи. Іноді для цієї мети між джерелом світла і краплею розміщували діафрагму. В одному із способів пропонувалось освітлювати краплю не збоку, а зсередини. Світловий потік направляли через трубку, за допомогою якої формували краплю. Останній спосіб великого розповсюдження не знайшов через ускладнення конструкції приладів.

Оптичні прилади використовують в більшості методів вимірювання поверхневого натягу.

Розглянемо прилади, в яких вимірюють силу, що діє на контактуючий предмет з рідиною. Більшого розповсюдження набули прилади, в яких використовують плоску пластинку, тобто вимірювання здійснюють методом пластинки Вільгельма (рис. 2). В них пластинка або перебуває в незануреному стані (глибина занурення рівна 0), або частково занурена в рідину. На практиці застосовуються виключно вертикально орієнтовані пластинки, щоб не проводити додаткових вимірів, пов'язаних з кутами нахилу. Положення пластинки відносно горизонтальної поверхні рідини можуть визначати тим самим пристроєм, який використовується для визначення сили. Таким вимірювальним пристроєм служать ваги. Якщо вони відносяться до типу з нульовим методом зважування, то після дотику нижнього краю пластинки з поверхнею рідини і утворення меніска нижній торець пластинки виводиться на

рівень горизонтальної поверхні рідини. Якщо ваги діють по відхиленню, пластинка після її втягування в рідину залишається частково зануреною.

Поверхневий натяг для тонких пластинок розраховують згідно залежності

$$\sigma = \frac{F}{2L \cos \theta}, \quad (2)$$

де L – довжина пластинки, F – виміряна сила, θ – кут між поверхнею рідини і пластинкою на лінії їх контакту.

Існуючу проблему впливу крайового кута змочування між пластинкою і досліджуваною рідиною на вимірювання, вирішують досить різноманітно. Значного поширення набув шлях забезпечення повного змочування пластинки досліджуваної рідиною. Для цього використовують пластинки з спеціально підібраних матеріалів або зі спеціальною обробленою поверхнею. Найчастіше в якості добре змочуваного матеріалу пластинки використовують скло і платину. Останній має в порівнянні зі склом перевагу в хімічній стійкості до більшості рідин. На змочуванні відбивається наявність на твердій поверхні різного роду забруднень, пластинку перед дослідом дуже ретельно промивають. Додаткову гарантію повного змочування пластинки забезпечує шорсткість її поверхні. Вплив шорсткості на змочування описується рівнянням Венцеля-Дерягіна [9]

$$\cos \theta = K \cos \theta_i, \quad (3)$$

де θ – спостережуваний в досвіді макроскопічний крайовий кут (кут між поверхнею рідини і плоскою гранню пластинки), θ_i – істинний крайовий кут, утворений поверхнею рідини і твердою поверхнею, K – коефіцієнт шорсткості, що визначається як відношення площ реальної поверхні (з урахуванням мікрорельєфу) і її проекції на площину.

Оскільки $K > 1$, то в діапазоні $0 < \theta < \pi/2$ $\theta < \theta_i$. Якщо рідина змочує даний матеріал, збільшення коефіцієнта шорсткості викликає зменшення макроскопічного крайового кута. Зазвичай шорстку поверхню отримують втиранням або обдуванням дрібним абразивним порошком.

Інший метод, який застосовують в приладах є метод відриву кільця. В основі цього методу

лежить існування однозначної залежності між величиною поверхневого натягу і максимальним значенням сили, яка прикладена до кільця для його втягування з рідини:

$$\sigma = \frac{F}{4\pi R}, \quad (4)$$

де R – радіус кільця.

Якщо кільце поступово витягувати з рідини, то буде зростати прикладена до нього сила. Цей ріст зумовлений силами гравітації і поверхневого натягу. Остання з ростом висоти підняття після досягнення деякого максимального значення буде зменшуватися. Це продовжується до тих пір, поки меніск рідини не досягне границі стійкості і не зруйнується.

В приладах для вимірювання поверхневого натягу методом відриву кільця також використовують електроваги, в основі яких лежить нульовий принцип зрівноважування (рис. 2). У такому випадку руйнування меніска і відрив від поверхні відбувається за межами екстремальної точки (точки максимуму сили).

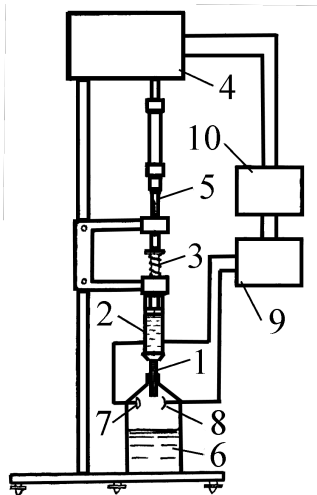
Кільце зазнає найбільшого впливу (деформації) зі сторони меніска. Чим тонший дріт, з якого виготовлене кільце, і більший його радіус, тим більше воно прогинається між точками прикріплення вертикальних утримуючих ниток. Деформація кільця істотно впливає на величину прикладеної сили, причому розрахувати цей вплив не представляється можливим. При збільшенні ниток, що утримують кільце, деформація останнього істотно зменшується. Однак в місцях прикріплення до кільця утримуючої нитки вигинається лінія змочування рідиною поверхні кільця. Збільшення кількості утримуючих ниток приводить до росту реального периметра змочування, який важко потім врахувати. На практиці переважно використовують двохнитковий підвіс кільця. Іншим критерієм вибору розмірів кільця є необхідність забезпечення меншої ваги кільця в порівнянні з вагою піднятої ним рідини (в протилежному випадку різко знизиться точність вимірювання прикладеної сили) [10].

Ще одним прикладом вимірювання поверхневого натягу існуючими приладами є метод ваги крапель, інші назви – метод об'єму крапель, метод підрахунку крапель, сталагмометричний метод. Основою роботи приладів (рис. 3) цим методом є взаємозв'язок

між об'ємом краплі рідини V , що відірвалась від каліброваного отвору капіляра, і значенням поверхневого натягу:

$$\sigma = \frac{V \Delta \rho g}{2\pi r \cdot f(r/V^{1/3})}, \quad (1)$$

де r – радіус торця капіляра, $f(r/V^{1/3})$ – поправочний коефіцієнт, який знаходять експериментально або на основі відповідних таблиць.



1 – капіляр, 2 – шприц з мітками, 3 – механізм подачі штока шприца, 4 – реверсивний двигун, 5 – мікрометр, 6 – посудина, 7 – джерело світла, 8 – фотоприймач, 9 – електронний блок реєстрації крапель, 10 – блок керування

Рисунок 1 – Схема приладу для вимірювання поверхневого натягу методом об'єму краплі

Значення поверхневого натягу розраховують за допомогою відповідної залежності або таблиць на основі раніше визначеної різниці густин рідини у краплі і в навколишньому по відношенню до неї середовищі. Цей метод застосовують як для вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина - газ, так і міжфазного натягу на межі розділу двох рідин, що не змішуються. В обох випадках важливими є методика точного визначення об'єму утвореної краплі, методика самого процесу її видавлювання із отвору, а також визначення значення радіуса, що приймається за основу при подальшому розрахунку значень поверхневого або міжфазного натягу.

Розглянемо особливості роботи таких приладів. Крапля рветься точно за мінімальним перерізом шийки, то для малих радіусів

капіляра, крапля повинна відриватися цілком (залишається чистий зріз капіляра). Для реальних крапель процес відриву є досить складний. Розтягуючись, шийка приймає форму рідкого циліндра. Останній же мимовільно перетворюється в «буси», – в сукупність дрібних крапель, які падають слідом за основною краплею. Суттєвою деталлю цього процесу є те, що частина висить краплі вище шийки взагалі нікуди не падає, отже вага краплі, що впала (разом з супутниками), може бути помітно менше ваги краплі, що висить. В сучасних приладах використовують оптичну реєстрацію крапель, що впали, що суттєво автоматизує процес вимірювання.

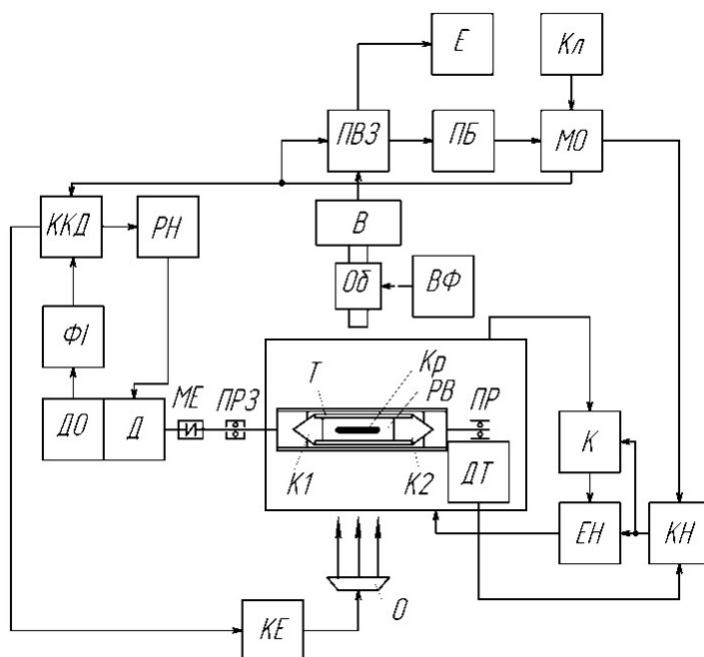
До матеріалу і форми капіляра висувають ряд вимог. Нижній торець каліброваного капіляра виготовляють таким, щоб крапля в момент відриву була зафіксована на круговій площі конкретного радіуса. Для цього використовують капіляр ножової форми. Матеріал капіляра має забезпечувати добру змочуваність поверхні його торця досліджуваною рідиною. У зв'язку з цим як матеріал для капілярів використовують скло, платину, а також спеціальні сплави металів. Технологія підготовки капілярів з метою забезпечення змочуваності поверхні торця повинна передбачати виготовлення її шорсткою.

В приладах, принцип роботи яких заснований на методі обертової краплі (рис. 4) вимірюють міжфазний натяг між рідинами, рідше – поверхневий натяг між рідиною і газом. В них використовують взаємозв'язок між різницею густин $\Delta\rho$ контактуючих рідин і газів, частотою обертання ω , розмірами краплі і поверхневим натягом:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 R^3}{4}, \quad (6)$$

де R – радіус краплі.

Розглянемо особливості роботи цих приладів. Потрібно забезпечувати, щоб довжина краплі була у 4 рази більшою за її діаметр, що встановлюють вибором частоти обертання трубки з рідинами. Вісь обертання краплі має бути строго горизонтальною. Привід трубки від двигуна виконують так, щоб усунути вібрації. Для отримання статичного зображення обертової краплі застосовують стробоскопічне освітлення, синхронізоване з частотою



В – відеокамера; ВФ – вузол фокусування; Д – двигун; ДО – давач обертів; ДТ – давач температури; Е – екран; ЕН – елемент нагрівальний; К – компресор; К1, К2 – корки; КЕ – ключ електронний; ККД – контролер керування двигуном; Кл – клавіатура; КН – контролер нагрівання; Кр – крапля легшої рідини; МЕ – муфта еластична; МО – мікропроцесор обробки; О – освітлювач; Об – об’єктив; ПБ – пам’ять буферна; ПВЗ – процесор запису відео; ПР – підшипник радіальний; ПРЗ – підшипник радіально-упорний здвоєний; РВ – рідина важча; РНП – регулятор напруги; Т – трубка; ФІ – формувач імпульсів

Рисунок 4 — Функціональна схема приладу для вимірювання міжфазного натягу рідин методом обертаної краплі

обертання трубки. Сляна трубка з важчою рідиною діє як сферична лінза, яка викликає спотворення видимих розмірів обертаної краплі. Для врахування цього оптичну систему приладу калібрують калібрами відомого розміру з рідиною, що оточує краплю.

На процес обертання краплі має вплив гравітаційного поля Землі. Якщо обертана швидкість зменшується, то ефект спливання краплі відіграє значну роль, призводячи до зміщення краплі від осі обертання трубки і, в результаті, до спотворення її форми. В обертаній системі виникають течії (а значить сили Коріоліса в додаток до сили виштовхування) і осциляції. На краплю діють одночасно виштовхувальна сила, відцентрова сила більш важчої рідини і закручуюча сила, яка обумовлена в’язкістю важчої рідини, які переміщують краплю на деяку віддаль вгору від осі обертання. Для зменшення цих впливів діапазон частот обертання трубки вибирають в межах 1000 — 15000 об/хв.

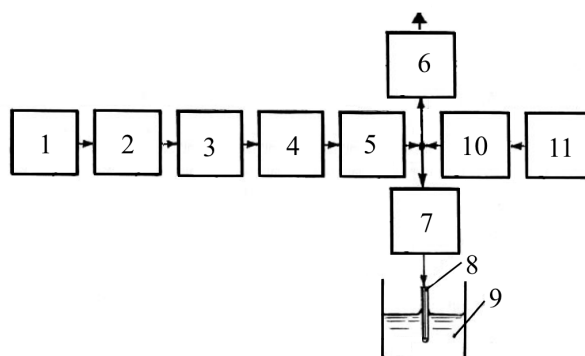
В приладах, які працюють методом максимального тиску P_{\max} в газовій бульбашці (рис. 5), поверхневий натяг вимірюють на основі взаємозалежності капілярного тиску, глибини занурення капіляра H , радіуса капіляра і поверхневого натягу:

$$\sigma = R_0 (P_{\max} - \Delta \rho g H) / 2, \quad (7)$$

де R_0 – радіус кривизни поверхні меніска бульбашки.

Так як капілярний тиск є однією з найбільш легко визначуваних величин, то такі прилади дістали широкого розповсюдження. Прилади для вимірювання поверхневого натягу рідин цим методом є одними з найпростіших щодо реалізації методики вимірювання.

Вибір методу для дослідження поверхневих властивостей розчинів поверхнево-активних речовин для інтенсифікації нафтовилучення здійсимо на основі порівняння їх характеристик. Основними характеристиками є



1 – джерело стисненого газу; 2,4 – пневматичні ємності; 3 – стабілізатор тиску газу;
5, 7, 10 – постійні пневматичні дроселі; 6 – змінний пневматичний дросель; 8 – калібрований капіляр;
9 – досліджувана рідина; 11 – давач тиску

Рисунок 5 — Схема приладу для вимірювання поверхньої енергії рідин методом максимального тиску в бульбашці газу

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця сучасних методів вимірювання поверхнього натягу рідин

Назва методу	Діапазон вимірювання поверхнього натягу рідин, мН/м	Похибка методики	Середовища
Методи лежачої або звисаючої краплі	0,1-75	0,2 %	Рідина-рідина, рідина-газ
Метод пластинки Вільгельма	1-75	0,1 %	Рідина-газ
Метод відриву кільця	1-75	0,4 %	Рідина-газ
Метод ваги крапель	0,1-72	0,3%	Рідина-рідина, рідина-газ
Метод обертової краплі	0,001-75	0,4 %	Рідина-рідина
Метод максимального тиску в газовій бульбашці	10-75	0,2 %	Рідина-газ

діапазон вимірюваного поверхнього натягу, методична похибка, можливість вимірювання міжфазного натягу між рідинами (табл. 2). В нафтовидобутку контактуючими середовищами є водний розчин поверхнево-активної речовини і нафта, то очевидно слід надати перевагу методам, що дозволяють досліджувати міжфазний натяг між рідинами. З іншого боку розчин поверхнево-активної речовини суттєво знижує міжфазний натяг між рідинами, а отже необхідно використовувати метод, з низькою межею вимірювання. Для двох рідин таким методом є метод обертової краплі, у випадку вимірювання поверхнього натягу між рідиною і газом можна використати методи ваги крапель або лежачої (звисяючої) крапель.

Висновки. З урахуванням специфіки і умов використання розчинів поверхнево-активних речовин у нафтогазовидобутку, які можуть бути відтвореними в процесі вимірювання

поверхнього натягу на межі контакту "розчин поверхнево-активних речовини - газ", міжфазного натягу на межі контакту "розчин поверхнево-активних речовини - нафта (газовий конденсат)" найбільш придатними для таких вимірювань міжфазного натягу є методи лежачої або звисяючої крапель, об'єму крапель і обертової краплі.

Література

1. Михайлюк В., Рудий М., Використання поверхнево-активних речовин в процесах нафтовидобутку на родовищах ВАТ"Укрнафта". ПП „Галицька друкарня ПЛЮС”, 399 с.
2. Поверхнево-активні речовини. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхнево-активні_речовини#Застосування_ПАР (дата звернення: 17.02.2021).
3. Михайлюк В. Д., Рудий М. І. Нові технології обробки привибійної зони пласта з

використанням поверхнево-активних речовин Стан і перспективи розробки родовищ нафти і газу України”: збірник наукових праць наук.-практ. конф., 18–21 листопада 2003 року. Івано-Франківськ, 2003. С. 209 – 210.

4. Бабалян Г. А., Ованесов Г. П., Пелевин Л. А. Применение поверхностноактивных веществ с целью увеличения нефтеотдачи. М.: Недра, 1970. 108 с.

5. Кондрат Р. М., Мороз Л. Б., Михайлюк В.Д. Дослідження застосування поверхнево-активних речовин для інтенсифікації видобування нафти на завершальній стадії розробки родовищ URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/2524/1/3366p.pdf> (дата звернення: 17.02.2021).

6. Властивості рідин. Поверхневий натяг. URL: <https://sites.google.com/site/molekulyarna-fizika/osnovni-ponatta-molekularno-kineticnoie-teoriiie/vlastivosti-ridin-poverhnevij-natag> (дата звернення: 17.02.2021).

7. Русанов А. И., Прохоров В. А. Межфазная тензиометрия. СПб: Химия, 1994. 400с.

8. Барна О. Б. Методика і установка для дослідження профілю розгорнутого меніска для визначення поверхневого натягу та крайового кута змочування Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. №18(189). 2012. С. 20-28.

9. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания М.: Химия, 1976 232 с.

10. І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Білішчук, О. Б. Барна, Л. А. Витвицька. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз: монографія: у 2 т. Т. 2 Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, вимірювання крайового кута змочування. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. 297 с.

3. Mykhailiuk V. D., Rudyi M. I. Novi tekhnolohii obrobky pryvybiinoi zony plasta z vykorystanniam poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn Stan i perspektyvy rozrobky rodovyshch nafty i hazu Ukrainy”: zbirnyk naukovykh prats nauk.-prakt. konf., 18–21 lystopada 2003 roku. Ivano-Frankivsk, 2003. S. 209 – 210.

4. Babalian H. A., Ovanesov H. P., Pelevyn L. A. Prymenenye poverkhnosnoaktyvnykh veshchestv s tseliu uvelycheniya nefteotdachy. M.: Nedra, 1970. 108 s.

5. Kondrat R. M., Moroz L. B., Mykhailiuk V.D. Doslidzhennia zastosuvannia poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn dlia intensyfikatsii vydobuvannia nafty na zavershalnii stadii rozrobky rodovyshch URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/2524/1/3366p.pdf> (data zvernennia: 17.02.2021).

6. Vlastyvoli ridyn. Poverkhnevyi natiah. URL: <https://sites.google.com/site/molekulyarna-fizika/osnovni-ponatta-molekularno--kineticnoie-teoriiie/vlastivosti-ridin-poverhnevij-natag> (data zvernennia: 17.02.2021).

7. Rusanov A. Y., Prokhorov V. A. Mezhfaznaia tenzyometryia. SPb: Khymyia, 1994. 400s.

8. Barna O. B. Metodyka i ustanovka dlia doslidzhennia profilu rozghornutoho meniska dlia vyznachennia poverkhnevoho natiahu ta kraiovoho kuta zmochuvannia Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V.Dalia. №18(189). 2012. S. 20 – 28.

9. Summ B. D., Horiunov Yu. V. Fyzyko-khymycheskye osnovi smachyvaniya y rastekaniya M.: Khymyia, 1976. 232 s.

10. І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Білішчук, О. Б. Барна, Л. А. Витвицька. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз: монографія: у 2 т. Т. 2 Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, вимірювання крайового кута змочування. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. 297 с.

References

1. Mykhailiuk V., Rudyi M., Vykorystannia poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn v protsesakh naftovydobutku na rodovyshchakh VAT"Ukrnafta". – РР „Halytska drukarnia PLIuS”, 399 s.

2. Poverkhnevo-aktyvni rehovyny. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Poverkhnevo-aktyvni_rehovyny#Zastosuvannia_PAR (data zvernennia: 17.02.2021).

УДК 658.012.011.56

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-53-62

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

О. В. Кучмистенко, М. В. Шавранський, Б. С. Незамай, О. Г. Малько

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

В роботі викладений синтез нечіткого регулятора системи управління частотою обертання ротора газотурбінного двигуна. Продемонстровані результати математичного моделювання системи з цифровими нечітким регулятором, які формують керуючий вплив на нестационарний об'єкт керування. Подана порівняльна оцінка роботи, яка характеризується поточною помилкою системи адаптивного управління і системи, розрахованої на базі НЛ, дає можливість зробити висновок, що застосування fuzzy (нечіткого) - регулятора для систем управління розглянутими типовими нестационарними об'єктами є доцільним, оскільки поточна помилка в системі з fuzzy-регулятором не перевищує поточну помилку в адаптивній системі. При формуванні структурних схем СУ з fuzzy-регуляторами важливим видається вибір вхідних параметрів fuzzy-регулятора. Лінгвістичні правила управління самі по собі не можуть бути реалізовані на сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їх формалізації. У зв'язку з цим дуже важливим є задача вибору методу формалізації експертних знань. Крім того, оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій належності чимало роль відіграє вибір їх вигляду і параметрів. При реалізації нечіткого управління в сучасних ЕОМ необхідно задавати конкретні значення параметрів функцій належності, зокрема межі їх зміни. Тому важлива методика параметричного налаштування fuzzy-регулятора. При проектуванні регулятора із розрахованих для різних варіантів мінімальних критеріїв якості, вибрано використання експоненціальних функцій належності (ФН), які при оптимізації параметрів НР дають найменше із мінімальних значень показника J.

Ключові слова: газотурбінний двигун, нечітка логіка, функції належності, система управління, нестационарний об'єкт, fuzzy (нечіткий) – регулятор.

В работе изложен синтез нечеткого регулятора системы управления частотой вращения ротора газотурбинного двигателя. Продемонстрированы результаты математического моделирования системы с цифровыми нечетким регулятором, которые формируют управляющее воздействие на нестационарный объект управления. Представленная сравнительная оценка адаптивного управления на базе нечеткой логики (НЛ) рассматриваемого нестационарного объекта. Сравнительная оценка работы, которая характеризуется текущей ошибкой системы адаптивного управления и системы, рассчитанной на базе НЛ, позволяет сделать вывод, что применение fuzzy (нечеткого) - регулятора для систем управления рассмотренными типичными нестационарными объектами целесообразно, поскольку текущая ошибка в системе с fuzzy-регулятором не превышает текущую ошибку в адаптивной системе. При формировании структурных схем СУ с fuzzy-регуляторами важным представляется выбор входных параметров fuzzy-регулятора. Лингвистические правила управления сами по себе не могут быть реализованы на современных ЭВМ. Необходимая процедура их формализации. В связи с этим очень важно задача выбора метода формализации экспертных знаний. Кроме того, поскольку нечеткие множества формализуются с помощью функций принадлежности немалую роль играет выбор их вида и параметров. При реализации нечеткого управления в современных ЭВМ необходимо задавать конкретные значения параметров функций принадлежности, в частности пределы их изменения. Поэтому важна методика параметрической настройки fuzzy-регулятора. При проектировании регулятора с рассчитанных для различных вариантов минимальных критериев качества, выбрано использование экспоненциальных функций принадлежности (ФП), которые при оптимизации параметров НР дают наименьшее из минимальных значений показателя J.

Ключевые слова: газотурбінний двигател, нечеткая логика, функции принадлежности, система управления, нестационарный объект, fuzzy (нечеткий) - регулятор.

The synthesis of the fuzzy regulator of the rotor speed control system of a gas turbine engine is presented in the work. The results of mathematical modeling of a system with a digital fuzzy controller, which form a control effect on a non-stationary control object, are demonstrated. A comparative assessment of adaptive control based on fuzzy logic (FD) of the considered nonstationary object is given. A comparative evaluation of the work, which is characterized by the current error of the adaptive control system and the system calculated on the basis of NL, allows us to conclude that the use of fuzzy controller for control systems considered typical non-stationary objects is appropriate because the current error in the system fuzzy-regulator does not exceed the current error in the adaptive system. When forming the structural schemes of SU with fuzzy-regulators, it seems important to choose the input parameters of the fuzzy-regulator. Linguistic control rules alone cannot be implemented on modern computers. The procedure of their formalization is necessary. In this regard, the task of choosing a method of formalizing expert knowledge is very important. In addition, since fuzzy sets are formalized by membership functions, the choice of their form and parameters plays a significant role. When implementing fuzzy control in modern computers, it is necessary to set specific values of the parameters of membership functions, in particular the limits of their change. Therefore, the technique of parametric adjustment of the fuzzy controller is important. When designing the controller from the minimum quality criteria calculated for different variants, the use of exponential membership functions is chosen, which when optimizing the HP parameters give the least of the minimum values of the indicator J.

Key words: gas turbine engine, fuzzy logic, membership functions, control system, non-stationary object, fuzzy-regulator.

Вступ. В наш час велика увага приділяється побудові (синтезу) і інтелектуалізації системи управління (СУ) нестационарними процесами, як об'єктами керування (ОК), оскільки вирішення задач при швидкій зміні режимів роботи цих об'єктів покладається саме на СУ. Процес прийняття рішень і СУ такими об'єктами є достатньо складною, оскільки функціонує в умовах невизначеності і багатьох факторів впливу. Це пов'язано з відсутністю достатньо повних апріорних даних, а також з необхідністю застосування методів і засобів керування, які знижують ступінь невизначеності вхідної інформації. Рівень невизначеності визначається інтенсивністю збурюючих впливів, точні кількісні характеристики, яких важко, а інколи неможливо вимірювати в реальному часі, від складності математичної формалізації процесу прийняття рішень, від впливу людського фактора та суб'єктивності будь-яких оцінок і рішень людини-оператора при управлінні складними об'єктами в інтерактивному режимі.

Існуючі СУ не дозволяють враховувати неповноту інформації, а також лінгвістичну невизначеність керуючих рішень, які приймаються оперативно-диспетчерським персоналом. Таким чином виникає необхідність в розробці і представленні в розпорядження диспетчера засобів аналізу ситуації з метою прийняття керуючих рішень. Динаміка і невизначеність СУ нестационарними процесами і об'єктами роблять задачу керування досить складною. Бажану ступінь надійності СУ можна

отримати тільки при повному інформаційному забезпеченні і оптимальному керуванні такими об'єктами.

На даному етапі спостерігається інтенсивний розвиток і практичне застосування нечітких систем для цілей управління і регулювання багатьма технічними об'єктами. Класичне управління істотно обмежувало теоретично можливі різновиди цілей, у зв'язку з необхідністю представляти мету узагальненою функцією. При нечіткому управлінні необхідність в цільових функціях і в рішенні задач оптимального управління відпадає, тому можна успішно справлятися зі всім різноманіттям цілей і навіть з цілями, що взаємно суперечать. У багатьох наукових працях управління на базі теорії нечітких множин і нечіткої логіки розглядають в контексті методології штучного інтелекту, де наголошується, що основу проектування інтелектуальних нечітких регуляторів складає конструювання знань з використанням методів уявлення і пошуку знань. Тому пропонується створення нечітких промислових регуляторів здійснювати на принципах теорії штучного інтелекту.

У роботі [1] нечіткі регулятори розглядаються як одна з базових моделей регуляторів інтелектуальних систем управління (ІСУ). При цьому наголошується, що значним обмеженням практичного застосування регуляторів ІСУ є відсутність формальних підходів, властивих теорії автоматичного управління (ТАУ), для вирішення завдань

аналізу і синтезу СУ. Проте наголошується, що fuzzy-регулятори володіють найбільшими "здібностями" до формалізації процесів проектування. Але штучний інтелект є процесом обробки символів, а нечітка логіка - ні. У багатьох випадках регулятор на базі НЛ здатний виробляти рішення швидше, ніж експертна система на основі правил ЯКЦО-ТО. Тим часом, все більший інтерес представляє можливість розробки так званих "гібридних" ІСУ [2, 3], які об'єднують властивості штучних нейронних мереж до навчання і наочність фаззі-логіки.

Постановка завдання: Проаналізувати особливості управління газотурбінним двигуном на базі методів теорії нечітких множин (ТНМ) і нечіткої логіки. Удосконалити відому структурну схему СУ із fuzzy-регулятором;

Метою даної роботи є аналіз і застосування методів нечіткої логіки для синтезу fuzzy-регулятора СУ нестационарними процесами, як об'єктами керування.

Об'єктом дослідження є нестационарні процеси у газотурбінному двигуні, які функціонують за умов невизначеності та обмежень на параметри ОК.

Результати: здійснено моделювання невизначеності експертних знань про СУ нестационарним об'єктом шляхом використання термів лінгвістичних змінних: „негативна” і „позитивна”, що дозволило на основі матриці знань розробити логіко-лінгвістичну модель прийняття раціональних рішень для СУ нестационарним процесом, як ОК.

Все ширше в різних галузях промисловості і народного господарства знаходять застосування газотурбінні двигуни (ГТД). І це не тільки авіація вони також використовуються в якості приводів нагнітачів газоперекачуючих агрегатів компресорних станцій при транспортуванні газу, приводів електрогенераторів пересувних і пікових електростанцій в суднових енергетичних установках і на інших промислових об'єктах, де вимагається розвиток великих одиничних потужностей (від 1 до 25 МВт) в одному агрегаті при його мінімальній масі і габаритах.

Комплекс вимог, які висуваються до газотурбінних двигунів пов'язані з їх енергетичною ефективністю, безпекою, надійністю і екологічністю експлуатації. Поряд

з цими вимогами, актуальними є вимоги до якості перехідних процесів, пов'язаних із запуском агрегату, різкою зміною відбраного навантаження (потужності). В більшості рішення задач задоволення всім цим вимогам покладається на СУ ГТД.

В переважній більшості ГТД частота обертання ротора (роторів) є керуючою величиною. В якості керуючого фактора в СУ частотою обертання ротора n використовується витрата (подача) палива G_T в камеру згоряння. На різних режимах роботи і при різних зовнішніх умовах параметри двигуна істотно змінюються.

Розглянемо газотурбінний двигун як нестационарний об'єкт, для якого частота обертання ротора n – керуюча змінна, а витрата палива G_T - керуючий вплив. Лінеаризуючи залежність моменту турбіни M_T і компресора M_K від частоти обертання ротора n і не враховуючи впливу теплової і масової ємності двигуна, для конкретного режиму роботи записують передавальну функцію двигуна наступним чином [4]:

$$G_{ГТД}(s) = \frac{n(s)}{G_T(s)} = \frac{K_{ГТД}}{T_{ГТД}s + 1},$$

де коефіцієнт підсилення $K_{ГТД}$ і постійна часу $T_{ГТД}$ визначається як:

$$K_{ГТД} = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} - \frac{\partial M_K}{\partial G_K} \right)_0 G_{T0}}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 n_0}; \quad T_{ГТД} = \frac{2\pi J}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0},$$

при чому, вхідний і вихідний сигнали записуються у відносних безрозмірних відхиленнях від усталеного режиму ($n = \Delta n / n_0$; $G_T = \Delta G_T / G_{T0}$, де n_0 , G_{T0} – базові значення параметрів, які вибрані для визначного режиму роботи двигуна, наприклад номінального або максимального). На різних режимах роботи і при різних зовнішніх умовах коефіцієнт підсилення і постійна часу двигуна суттєво змінюються, тому для кожного режиму необхідно визначати свої значення коефіцієнтів $K_{ГТД}$ і $T_{ГТД}$.

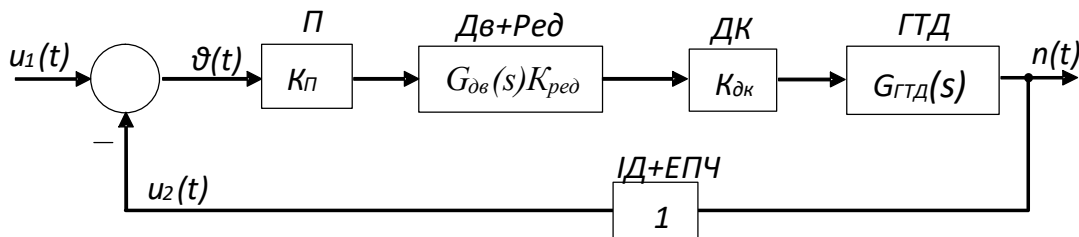


Рисунок 1 – Структурна схема аналогової електро механічної СУ частотою обертання ротора ГТД

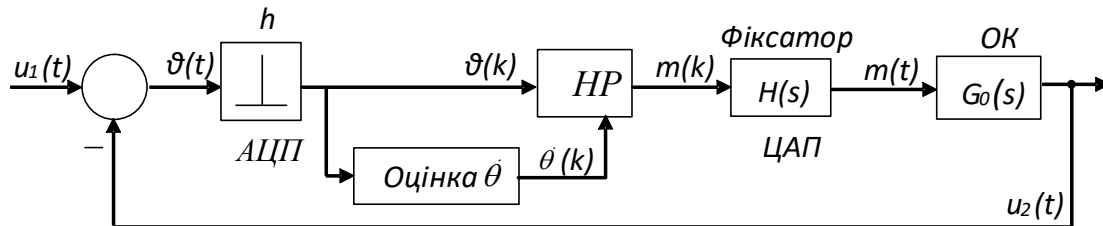


Рисунок 2 – Структурна схема системи управління з цифровим нечітким регулятором

Відмітимо, що передавальна функція $G_{ГТД}(s)$ для нестационарного ОК, яким є газотурбінний двигун, отримана методом „заморожених” коефіцієнтів при умові достатньо повільної зміни параметрів об’єкта.

Структурна схема аналогової електро механічної СУ частота обертання ротора двигуна при веденні на рис. 1 [4].

Частота обертання ротора газотурбінного двигуна задається напругою $u_1(t)$ і вимірюється імпульсним давачем ІД, частота вихідного сигналу якого визначається виразом $f = kmn$, n -число обертів двигуна, m - число зубців індуктора, k – коефіцієнт передачі. Змінна напруга, яка знімається з виходу ІД, за допомогою електронного перетворювача частоти ЕПЧ перетворюється в сигнал $u_2(t)$, величина якого пропорційна числу обертів двигуна n . Напруга $u_2(t)$ порівнюється з заданою напругою і сигнал помилки після підсилювача П поступає на двофазний асинхронний двигун Дв, який через редуктор Ред регулює дросельний кран ДК, змінюючи витрату палива в газотурбінний двигун. Імпульсний давач разом з електронним перетворювачем частоти можна описати пропорційною ланкою з передавальною функцією, яка рівна 1. При цьому система (див. рис. 1) має одиничний від’ємний зворотній зв’язок [4].

Розглядаючи послідовне з’єднання підсилювача, асинхронного двигуна, дросельного крана, газотурбінного двигуна і

частотного давача з електронним перетворювачем частоти в якості загального ОК і застосовуючи цифровий НР, можна перетворити структурну схему на рис. 1 в структурну схему, яка зображена на рис. 2, де $u_1(t)$ - вхідний вплив, а $u_2(t)$ – вихід системи, а $u_1(t) - u_2(t) = \theta(t)$ – помилка системи. Використання цифрового НР вимагає додаткового застосування аналого-цифрового (АЦП) і цифро-аналогового (ЦАП) перетворювачів.

Тепер передавальну функцію ОК в структурній схемі на рис. 1 можна записати у вигляді:

$$G(s) = K_{п}G_{дв}(s)K_{ред}K_{дк}G_{ГТД}(s) = \alpha [s(s+a)(s+b)]^{-1},$$

де $\alpha = abK_{п}K_{дв}K_{ред}K_{дк}K_{ГТД}$, $a = 1/T_{дв}$, $b = 1/T_{ГТД}$.

Розглянемо систему управління з цифровим нечітким регулятором НР (рис. 2).

Для визначеності будемо припускати, що число термів, за допомогою яких оцінюються лінгвістичні змінні (вхідні і вихідні параметри нечіткого регулятора) помилка системи θ , швидкість зміни (перша похідна) помилки $\dot{\theta}$, керуючий вплив на об’єкт m , рівне 7. Відобразимо діапазони: $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$ і $[m_{\min}, m_{\max}]$ зміни вхідних і вихідних параметрів на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1] = [0, 6]$, де $L_i = 7$ - число, яке

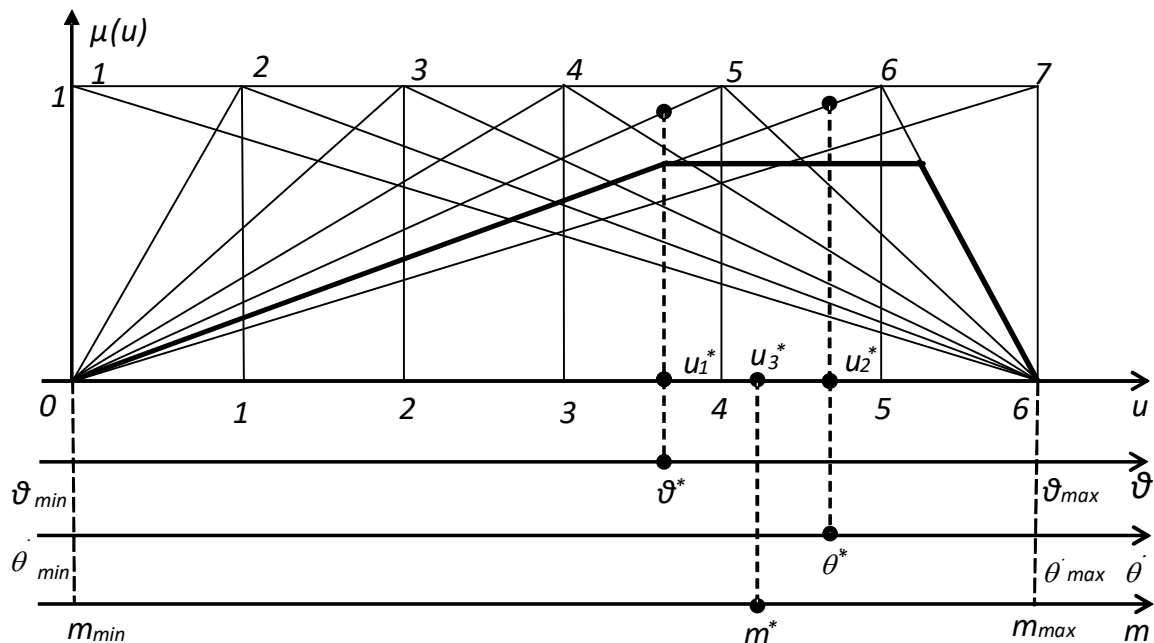


Рисунок 3 – Функції належності семи нечітких підмножин на множині $U = [0, 6]$

відповідає кількості термів кожної лінгвістичної змінної x_i , $i = \overline{1, n}$, $n = 3$. При цьому перерахунок фіксованого значення параметра $x_i^* \in [x_{ni}, x_{ei}]$ у відповідний елемент $u^* \in [0, 6]$ визначається пропорцією [5]:

$$(x_{ei} - x_{ni}) / (6 - 0) = (x_i^* - x_{ni}) / (u^* - 0),$$

із якої отримуємо:

$$u^* = 6(x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}). \quad (1)$$

Таким чином, на основі виразу (1) знаходимо:

$$u_1^* = 6(\theta^* - \theta_{min}) / (\theta_{max} - \theta_{min}); \quad (2)$$

$$u_2^* = 6(\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{min}) / (\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}_{min}); \quad (3)$$

$$u_3^* = 6(m^* - m_{min}) / (m_{max} - m_{min}). \quad (4)$$

На множині $U = [0, 6]$ задамо 7 нечітких підмножин, функції належності яких показані на рис. 3.

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами (u_1, μ_1) і (u_2, μ_2) , вигляду (6).

Тоді, відповідно до рис. 3, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини [6, 7]:

$$\mu^1(u) = 1 - u / 6, \quad u \in [0, 6];$$

$$\mu^2(u) = \begin{cases} u, & u \in [0, 1]; \\ (6 - u) / 5, & u \in [1, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^3(u) = \begin{cases} u / 2, & u \in [0, 2]; \\ (6 - u) / 4, & u \in [2, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^4(u) = \begin{cases} u / 3, & u \in [0, 3]; \\ (6 - u) / 3, & u \in [3, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^5(u) = \begin{cases} u / 4, & u \in [0, 4]; \\ (6 - u) / 2, & u \in [4, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^6(u) = \begin{cases} u / 5, & u \in [0, 5]; \\ 6 - u, & u \in [5, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^7(u) = u / 6, \quad u \in [0, 6].$$

При подачі на нечіткий регулятор (НР) значень вхідних змінних θ^* і $\dot{\theta}^*$ з кроком квантування h здійснюється перерахунок величин u_1^* і u_2^* за формулами (2) і (3) і ФН $\mu^j(u)$, $j = \overline{1, 7}$.

Сформуємо матрицю знань (лінгвістичне правило управління) для нечіткого регулятора наступним чином:

$\theta \setminus \dot{\theta}$	a_2^1	a_2^2	a_2^3	a_2^4	a_2^5	a_2^6	a_2^7
a_1^1	Н	Н	Н	Н	ПМ	ПС	П
a_1^2	Н	НС	НС	НС	ПМ	ПС	П
a_1^3	Н	НС	НМ	НМ	ПМ	ПС	П
a_1^4	Н	НС	НМ	О	ПМ	ПС	П
a_1^5	Н	НС	НМ	ПМ	ПМ	ПС	П
a_1^6	Н	НС	НМ	ПМ	ПМ	ПС	П
a_1^7	Н	НС	НМ	П	П	П	П

В матриці знань a_1^j і a_2^j - лінгвістичні оцінки помилки і швидкості зміни помилки, які розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині, $j = \overline{1,7}$; a_3^j - лінгвістичні оцінки керуючого впливу на об'єкт, які вибрані із терм-множини змінної m :

$a_3^j \in \{\text{негативна (Н), негативна середня (НС), негативна мала (НМ), нульова (О), позитивна мала (ПМ), позитивна середня (ПС), позитивна (П)}\}$.

Нехай $\mu^j(x_i)$ ФН параметра $x_i \in [x_{ni}, x_{vi}]$ нечіткому терму a_i^j , $i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,7}$. Тоді $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$ - залежить від двох змінних ($x_1 \equiv \theta$; $x_2 \equiv \dot{\theta}$) функція належності вектора параметрів рішення (вибраному керуючому впливу на об'єкт) m_j , $j = \overline{1,7}$, визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2) = \bigvee_{p=1}^{k_j} [\mu^l(x_2) \wedge \mu^r(x_3)] \quad (5)$$

де k_j - число однакових термів a_3^j , які розміщені в комірці із координатами (l, r) матриці знань; l - номер рядка, на якому розміщений терм a_1^l ; r - номер стовпця, на якому розміщений терм a_2^r , $(l, r, j = \overline{1,7})$.

Якщо сформуємо лінгвістичне правило управління НР у вигляді:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j),$$

$$\text{то } (m^* = a_3^j), \quad j = \overline{1,7}$$

(це відповідає використанню лише головної діагоналі матриці знань), то система нечітких логічних рівнянь (5) значно спроститься і прийме вигляд:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2);$$

$$\mu^{m^*}(x_1, x_2) = \max_{j=1,7} \mu^{m_j}(x_1, x_2). \quad (6)$$

У відповідності з матрицею знань, яка сформалізована рівнянням (5), або (6), fuzzy-регулятор „приймає рішення” про те, до якого терму j і з яким ступенем істинності $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$ відноситься керуючий вплив m_j . Для визначення конкретного значення керуючого впливу m^* формується результуюча фігура (чотирикутник): ФН вибраного j -го терму, обмежена прямою з ординатою, рівна $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$.

Відбувається пошук абсциси "центру тяжіння" результуючої фігури за формулою:

$$u_3^* = \frac{\sum_{k=1}^4 (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_{r+1} + (2a_k + a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^4 (a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)}, \quad (7)$$

де a_k, b_k - координати вершин результуючої фігури.

Одержане значення u_3^* на основі формули (4) перетвориться в значення керуючого впливу на ОК:

$$m^* = m_{min} + (m_{max} - m_{min}) u_3^* / 6. \quad (8)$$

При дослідженні СУ (рис. 4) припустимо, що задана функція зміни частоти обертання ротора газотурбінного двигуна задається вхідною напругою:

$$u_1(t) = \begin{cases} \frac{2t^2}{\tau_r^2} \text{ при } 0 \leq t \leq \frac{\tau_r}{2}; \\ \frac{1}{2} + \frac{2t - \tau_r}{\tau_r} - \frac{(2t - \tau_r)^2}{2\tau_r^2} \text{ при } \frac{\tau_r}{2} \leq t \leq \tau_r; \\ 1 \text{ при } t \geq \tau_r, \end{cases}$$

де τ_r – час розгону газотурбінного двигуна.

Припустимо, що залежності параметрів передавальної функції $G(s)$ від часу роботи газотурбінного двигуна визначаються як:

$$T_{ГТД}(t) = 0,9849 - 0,1188t + 0,0063t^2 - 0,00012t^3;$$

$$\alpha(t) = 16,5475 - 4,4469t + 0,4843t^2 - 0,02315t^3 - 0,0004t^4;$$

$$T_{ДВ} = 0,35 \text{ с.}$$

При моделюванні системи опишемо динаміку окремих ланок, використовуючи апроксимацію за формулою трапецій.

Для аперіодичної ланки із змінними параметрами:

$$x_v = \frac{2 - b_{v-1}h_0}{2 + b_v h_0} x_{v-1} + \frac{h_0}{2 + b_v h_0} (\alpha_v u_v + \alpha_{v-1} u_{v-1}).$$

Для аперіодичної ланки $(s + a)^{-1}$ із постійними параметрами:

$$x_v = \frac{2 - ah_0}{2 + ah_0} x_{v-1} + \frac{h_0}{2 + ah_0} (u_v + u_{v-1}).$$

Для інтегруючої ланки:

$$x_v = x_{v-1} + \frac{h_0}{2} (u_v + u_{v-1}).$$

В записаних формулах u_v і x_v - вхідна і вихідна змінні ланки; $h_0 = 0,05h$ - крок моделювання; $h = 0,01\text{с}$ - крок квантування (інтервал подачі даних в НР).

Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим НР закону зміни вхідного впливу. Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів наступні:

$$[\theta_{\min} = -0,1; \theta_{\max} = 0,1], [\dot{\theta}_{\min} = -0,2; \dot{\theta}_{\max} = 0,2] \text{ і } [m_{\min} = -0,015; m_{\max} = 0,015].$$

Час розгону двигуна $\tau_r = 6 \text{ с.}$

На рис. 4 продемонстровано результати дослідження точності відпрацювання СУ

заданого закону зміни вхідного впливу: a – поточна помилка $\theta(t) = u_1(t) - u_2(t)$; b – керуючий вплив на ОК m ; e – вхід $u_1(t)$ і вихід $u_2(t)$ системи.

Розглянемо другий варіант синтезу цифрового нечіткого регулятора СУ частотою обертання ротора газотурбінного двигуна.

Для простоти рішення задачі синтезу НР припустимо, що число термів, з допомогою яких оцінюється лінгвістичні змінні (вхідні і вихідні параметри НР) помилка системи θ , швидкість зміни (перша похідна) помилки $\dot{\theta}$, прискорення (друга похідна) помилки $\ddot{\theta}$, керуючого впливу на об'єкт m , мінімальне, тобто рівне 2.

Відобразимо діапазони: $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$, $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$ і $[m_{\min}, m_{\max}]$ зміни вхідних і вихідних параметрів на єдину універсальну множину $U_i = [0, L_i - 1] = [0, 1]$, де $L_i = 2$ - число, що відповідає кількості термів кожної лінгвістичної змінної x_i , $i = 1, n$, $n = 4$. При цьому перерахунок фіксованого значення параметра $x_i^* \in [x_{ni}, x_{ei}]$ у відповідний елемент $u^* \in [0, 1]$ визначається пропорцією [7]:

$$(x_{ei} - x_{ni}) / (1 - 0) = (x_i^* - x_{ni}) / (u^* - 0),$$

із якої отримуємо:

$$u^* = (x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}). \quad (9)$$

Таким чином знаходимо:

$$u_1^* = (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}); \quad (10)$$

$$u_2^* = (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min}); \quad (11)$$

$$u_3^* = (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}); \quad (12)$$

$$u_4^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}). \quad (13)$$

На множині $U = [0, 1]$ задамо дві нечіткі підмножини, функції належності, яких трикутної форми ($\mu^1(u)$ і $\mu^2(u)$) показані на рис. 4.

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами (u_1, μ_1) і (u_2, μ_2) , вигляду (6)

Тоді, відповідно до рис. 4, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu^2(u) = u, \quad u \in [0, 1]. \quad (14)$$

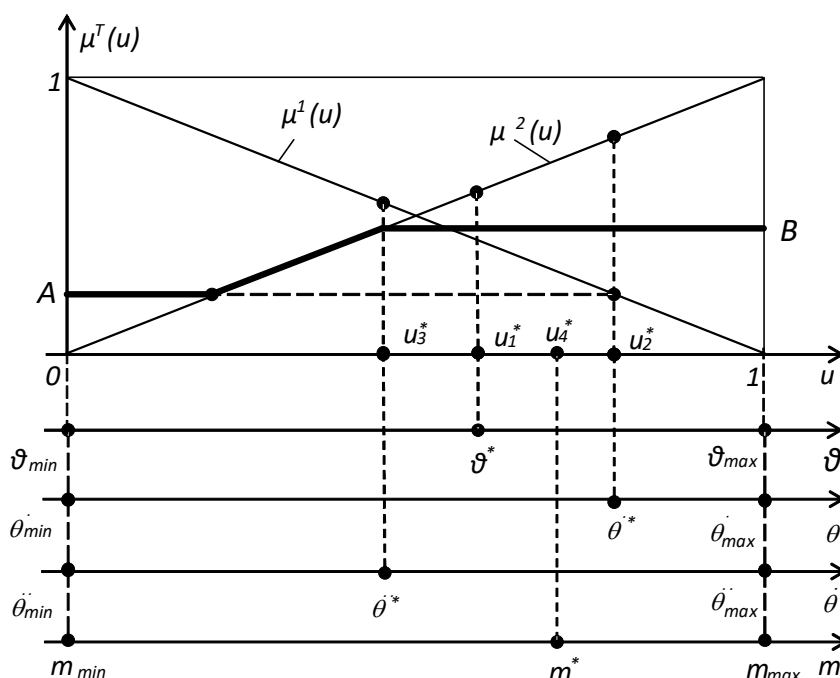


Рисунок 4 – Функції належності двох нечітких підмножин на множині $U = [0, 1]$

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами (u_1, μ_1) і (u_2, μ_2) , вигляду (6)

Тоді, відповідно до рис. 4, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu^2(u) = u, \quad u \in [0, 1]. \quad (14)$$

При подачі на НР значень вхідних змінних $\theta^*, \dot{\theta}^*$ і $\ddot{\theta}^*$ з кроком квантування h здійснюється перерахунок величин u_1^*, u_2^*, u_3^* за формулами (10) - (12) і ФН $j = \overline{1, 2}$, за формулами (14).

Сформулюємо лінгвістичне правило управління НР у вигляді:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ і } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \\ \text{то } (m^* = a_4^j), \quad j = \overline{1, 2}, \quad (15)$$

де a_1^j, a_2^j і a_3^j - лінгвістичні оцінки помилки швидкості зміни (першої похідної) помилки і другої похідної помилки, які розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині, $j = \overline{1, 2}$; a_4^j - лінгвістичні оцінки керуючого впливу на об'єкт, які вибрані із

терм-множини змінної m . Лінгвістичні оцінки вибираємо із терм-множини лінгвістичних змінних $\theta^*, \dot{\theta}^*$ і $\ddot{\theta}^*$ і m :

$$a_i^j \in \{\text{негативний (1), позитивний (2)}\}.$$

Іншими словами, всі сигнали (визначені вище лінгвістичні змінні) в СУ характеризуються як негативні ($j = 1$) або позитивні ($j = 2$).

Нехай $\mu^j(x_i)$ ФН параметра $x_i \in [x_{ni}, x_{vi}]$ нечіткому терму a_i^j , $i = \overline{1, 3}$; $j = \overline{1, 7}$. Тоді μ^{m_j} ($\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$) - залежить від трьох змінних ($x_1 \equiv \theta$; $x_2 \equiv \dot{\theta}$; $x_3 \equiv \ddot{\theta}$) функція належності вектора параметрів рішення (вибраному керуючому впливу на об'єкт) m_j , $j = \overline{1, 7}$, визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2, x_3) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2) \wedge \mu^j(x_3) \quad (16).$$

Таким чином, $\mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3)$ - функція належності керуючого впливу нечіткій множині „негативний”, а $\mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3)$ - функція належності керуючого впливу нечіткій множині „позитивний”. Результуюча ФН для керуючого

впливу у відповідності з робочим правилом НР записується у вигляді:

$$\mu^m(x_1, x_2, x_3) = \mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) \vee \mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3). \quad (17)$$

У виразах (16) і (17) \wedge - логічне і, \vee - логічне або.

У відповідності з лінгвістичними правилами керування, які формалізовані системою нечітких логічних рівнянь (16) ФН керуючого впливу $\mu^1(u_4)$ нечіткій множині „негативний” обмежена зверху значенням:

$$A = \min[\mu^1(u_1^*), \mu^1(u_2^*), \mu^1(u_3^*)], \quad (18)$$

а ФН керуючого впливу $\mu^2(u_4)$ нечіткій множині „позитивний” обмежена зверху значенням:

$$B = \min[\mu^2(u_1^*), \mu^2(u_2^*), \mu^2(u_3^*)]. \quad (19)$$

Результуюча ФН для керуючого впливу на основі виразу (13) визначається як:

$$\mu(u_4) = \mu^1(u_4) \vee \mu^2(u_4), \quad (20)$$

тобто одержується формуванням максимуму (товста лінія на рис. 4):

$$\mu(u_4) = \max[\mu^1(u_4), \mu^2(u_4)]. \quad (21)$$

Для визначення конкретного значення керуючого впливу m^* формується „результуюча фігура”, обмежена результуючою ФН.

Відбувається пошук абсциси "центру тяжіння" результуючої фігури за формулою [9]

$$u_4^* = \frac{\sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_{r+1} + (2a_k + a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) (b_{k+1} + b_k)}, \quad (22)$$

де N - число вершин, a_k, b_k - координати вершин результуючої фігури.

Одержане значення u_4^* на основі формули (22) перетвориться в значення керуючого впливу на ОК:

$$m^* = m_{min} + (m_{max} - m_{min}) u_4^*. \quad (23)$$

Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим fuzzy-регулятором закону зміни вхідного впливу, заданого поліномом:

$$\alpha_1(t) = 1,3316 \times 10^{-3} + 0,1653269t - 0,4785008t^2 + 0,1037928t^3 - 8,8016 \times 10^{-3}t^4 + 3,404 \times 10^{-4}t^5 - 5,093 \times 10^{-6}t^6.$$

Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів (вибираються при проектуванні НР і уточнюються шляхом математичного

моделювання з метою одержання прийнятних показників якості перехідного процесу в замкнутій системі):

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1,02; 1,02], \quad [\dot{\theta}_{min}, \dot{\theta}_{max}] = [-4; 4], \\ [\ddot{\theta}_{min}, \ddot{\theta}_{max}] = [-24; 24] \quad \text{і} \quad [m_{min}, m_{max}] = [-1, 1].$$

Припустимо, що задана функція зміни частоти обертання ротора газотурбінного двигуна $u_1(t)$, залежності параметрів $\alpha(t), T_{ГТД}(t)$ і $T_{ДВ}$ передавальної функції $G_0(s)$ від часу роботи газотурбінного двигуна визначаються за приведеними вище формулами. Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим fuzzy-регулятором закону зміни вхідного впливу.

Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів наступні:

$$[\theta_{min} = -1; \theta_{max} = 1], \quad [\dot{\theta}_{min} = -4,5; \dot{\theta}_{max} = 4,5], \\ [\ddot{\theta}_{min} = -32; \ddot{\theta}_{max} = 32] \quad \text{і} \quad [m_{min} = -1; m_{max} = 1].$$

Час розгону газотурбінного двигуна $\tau_r = 6$ с. Крок квантування $h = 0,01$ с.

Висновок

В роботі досліджена система адаптивного управління частотою обертання ротора газотурбінного двигуна при розглянутих вище параметрах ОК і вхідному впливі. Порівняльна оцінка роботи (характеризується поточною помилкою) системи адаптивного управління і системи, розрахованої на базі НЛ, дає можливість зробити висновок, що застосування НР для управління частотою обертання ротора ГТД є доцільним, оскільки поточна помилка в системі з нечітким регулятором не перевищує поточну помилку в адаптивній системі.

Список використаних джерел

1. Зак Ю. А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных : Fuzzy-технологии. Зак. - 2-е изд. Москва, 2016. 352 с.
2. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic [electronic resource]: An Introduction with Engineering Applications / by Michael Hanss. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. // Springer e-books - v.: digital
3. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive PID controller for nonlinear systems with H_∞ tracking performance. *Physics and Control*, 2003. Proceedings. 2003 International Conference (Volume: 4), 20-22 Aug. 2003. 2003. P. 1315-1319.

4. Тельнов К. А., Файнштейн А. А., Шабашов С. З. Автоматизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Учебное пособие. Ленинград: Недра, 1983. 280 с.

5. Macedo Mourelle, Luiza de. Fuzzy Systems Engineering [electronic resource] / Theory and Practice edited by Luiza de Macedo Mourelle, Nadia Nedjah. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH., 2005 Springer e-books - v.: digital.

6. Sementsov G.N., Kuchmistenko O. V. Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline. *Academic Bulletin*. 2004. № 13. P. 84-86.

7. Семенцов Г.Н. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами: навч. посіб. ІФ.: ІФНТУНГ, 2012. - 173 с.

References

1. Zak Yu. A. Prynaty'e resheny'j v uslovy'ях nechetky'x y' razmytyx dannyx : Fuzzy-texnologiy`. Zak. - 2-e y'zd. Moskva, 2016. 352 s.

2. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic [electronic resource]: An Introduction with Engineering Applications / by Michael Hanss. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. // Springer e-books - v.: digital

3. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive PID controller for nonlinear systems with H_{∞} tracking performance. *Physics and Control*, 2003. Proceedings. 2003 International Conference (Volume: 4), 20-22 Aug. 2003. 2003. R. 1315-1319.

4. Tel'nov K.A., Fajnshtejn A. A., Shabashov S. Z. Avtomaty'zacy`ya gazoperekachy`vayushhy'x agregatov s gazoturby`нным pry`vodom. Uchebnoe posoby'e. Leny`ngrad: Nedra, 1983. 280 s.

5. Macedo Mourelle, Luiza de. Fuzzy Systems Engineering [electronic resource] / Theory and Practice edited by Luiza de Macedo Mourelle, Nadia Nedjah. - Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH., 2005 // Springer e-books - v.: digital.

6. Sementsov G.N., Kuchmistenko O. V. Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline. *Academic Bulletin*. 2004. # 13. P. 84-86.

7. Sementcov G.N. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами: навч. посіб. ІФ.: ІФНТУНГ, 2012. 173 с.

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 622.24.05-004.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-63-74

ВЕБ-ОРІЄНТОВАНА КОМПОНЕНТНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТРУБОПРОВІДІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ СПРЯМОВАНИМИ ХВИЛЯМИ

І. З. Лютак, З. П. Лютак, А. В. Хамурда*

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

В роботі представлено розроблення підхід для контролю наявності включень всередині сталених трубопроводів малого, середнього та великого діаметрів ультразвуковими спрямованими акустичними симетричними та асиметричними модами нульового або першого порядків, що створена у вигляді системи контролю із розподіленими параметрами. Розподіленими параметрами системи контролю є ультразвукові первинні перетворювачі та передавачі радіо сигналу, що отриманий первинними перетворювачами. Внаслідок особливостей поширення спрямованих ультразвукових хвиль на відстані від кількох метрів до десятків метрів, однією парою первинних перетворювачів можна контролювати значні частину небезпечної чи потенційно небезпечної ділянки трубопроводу, що може бути визначена як за результатами геодезичних вимірювань, так і за проектною документацією, наприклад повітряні переходи чи технологічні коліна. Приведено результати зміни параметрів поширення мод ультразвукових спрямованих хвиль в залежності від зміни фізико-механічних параметрів граничного до стінок трубопроводів середовища та виявлено, що симетрична та асиметрична моди по різному реагують на зміну зовнішнього середовища, що дозволяє підвищити точність контролю, та виявляти типи зовнішнього середовища (рідина чи тверде тіло). Результати представлені у вигляді графіків та таблиць. В роботі запропоновано створювати систему на основі компонентного підходу, з метою уніфікації частин системи та реалізації можливості будувати її з частин різних виробників для збільшення її універсальності та адаптації під економічні можливості замовника такої системи контролю. Компонентами системи контролю є підсистеми первинних ультразвукових перетворювачів, передавання інформації та зберігання та оброблення. В роботі представлено аналіз підсистеми передавання та запропоновано бездротову ієрархічну структуру з врахуванням особливостей її експлуатації на великих віддальх та в межах населених пунктів із сильним рівнем шумів радіосигналу. Компонентом зберігання та обробки даних було запропоновано програмне рішення на основі ліцензії із безплатним користуванням Apache, що реалізує файлову розподілену систему із високими вимогами до її безпеки даних та продуктивності. Проаналізовано особливості роботи запропонованого програмного рішення, яке дозволяє проводити аналіз результатів з використанням веб-технологій.

Ключові слова: ультразвукові методи контролю, трубопроводи, веб-орієнтовані системи.

В работе представлены разработки для контроля наличия включений внутри стальных трубопроводов малого, среднего и большого диаметров ультразвуковыми направленными акустическими симметричными и асимметричными модами нулевого или первого порядков, созданы в виде системы контроля с распределенными параметрами. Распределенными параметрами системы контроля являются ультразвуковые первичные преобразователи и передатчики радиосигнала, полученный первичными преобразователями. Вследствие особенностей распространения направленных ультразвуковых волн на расстоянии от нескольких метров до

десятков метров, одной парой первичных преобразователей можно контролировать значительную часть опасного или потенциально опасного участка трубопровода, которая может быть определена как по результатам геодезических измерений, так и по проектной документации, например воздушные переходы или технологические колени. Приведены результаты изменения параметров распространения мод ультразвуковых направленных волн в зависимости от изменения физико-механических параметров предельной к стенкам трубопроводов среды и выявлено, что симметричная и асимметричная моды по-разному реагируют на изменение внешней среды, что позволяет повысить точность контроля и выявлять типы внешней среды (жидкость или твердое тело). Результаты представлены в виде графиков и таблиц. В работе предложено создавать систему на основе компонентного подхода, с целью унификации частей системы и реализации возможности строить ее из частей различных производителей для увеличения ее универсальности и адаптации под экономические возможности заказчика такой системы. Компонентами системы контроля является подсистемы первичных ультразвуковых преобразователей, передачи информации, хранения и обработки. В работе представлен анализ подсистемы передачи и предложены беспроводную иерархическую структуру с учетом особенностей ее эксплуатации на больших расстояниях и в пределах населенных пунктов с сильным уровнем шумов радиосигнала. Компонентом хранения и обработки данных было предложено программное решение на основе лицензии с бесплатным использованием Apache, которое реализует файловую распределенную систему с высокими требованиями к ее безопасности данных и производительности. Проанализированы особенности работы предложенного программного решения, которое позволяет проводить анализ результатов с использованием веб-технологий.

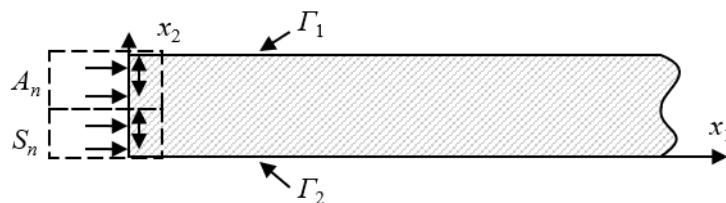
Ключевые слова: ультразвуковые методы контроля, трубопроводы, веб-ориентированные системы.

The paper presents the development of an approach to control the presence of inclusions inside steel pipelines of small, medium and large diameters by ultrasonic guided acoustic symmetric and antisymmetric modes of zero or first order. The approach created as a control system with distributed parameters. The distributed parameters of the control system are ultrasonic primary transducers and transmitters of the radio signal received by the primary transducers. Due to the peculiarities of the propagation of directional ultrasonic waves at a distance from several meters to tens of meters, one pair of primary transducers can control a significant part of the dangerous or potentially dangerous section of the pipeline. The dangerous section can be determined by geodetic measurements or by design documentation, such as air transitions or technological knees. The results of changing the propagation parameters of ultrasonic directional wave modes depending on the changes in the physical and mechanical parameters of the boundary to the walls of the pipelines are presented. It is found that symmetric and asymmetric modes react differently to changes in the environment, which allows to increase control accuracy and determining type of the environment (liquid or solid). The results are presented in the form of graphs and tables. The paper proposes to create a system based on a component approach, in order to unify parts of the system. It allows to realize the possibility of building it from parts of different manufacturers to increase its versatility and adaptation to the economic capabilities of the customer of such a control system. The components of the control system are the subsystems of primary ultrasonic transducers, information transmission and storage and processing. The paper presents an analysis of the transmission subsystem and proposes a wireless hierarchical structure taking into account the peculiarities of its operation at long distances and within settlements with a high level of radio signal noise. The data storage and processing component offered a software solution based on the Apache free license, which implements a file distribution system with high requirements for its data security and performance. The peculiarities of the proposed software solution, which allows the analysis of results using web technologies, have been analysed.

Keywords: ultrasonic control methods, pipelines, web-oriented systems.

Вступ. Сучасні тенденції розвитку трубопровідних систем диктують нові, підвищені, вимоги, щодо надійної їх експлуатації, забезпечення збереження навколишнього середовища та оптимально використання ресурсу трубопроводів у зв'язку із економічною конкуренцією. Вирішенням поставлених завдань є створення та застосування на практиці систем контролю реального часу, що в умовах трубопровідних систем додає вимоги щодо розподілених вимірювальних компонентів. Створення систем контролю із розподіленими компонентами відбувається протягом двох останніх десятиліть. Основні технічні вимоги до систем контролю із розподіленими параметрами, що описувались авторами на початку їх створення на даний час накладають особливості, що включає веб-орієнтовані підходи та обробку великих даних [1]. В загальному можна розділити напрямки досліджень створення нових систем контролю із розподіленими параметрами на: 1) дослідження систем збору первинної інформації (давачів), що повинні ефективно працювати в різних погодних умовах, включаючи системи захисту та самодіагностики ключових компонентів; 2) систем первинної збору інформації та ліній передачі, що включає аналіз похибок, довжину ліній, спосіб передачі (дротовий та бездротовий, комбінований); 3) програмного забезпечення та комп'ютерного обладнання із зберігання та оброблення даних. Системи збору та оброблення інформації можна поділити на дві групи. В першій групі первинні давачі є дорогим і прецизійним обладнанням, що точно пристосоване до технологічного циклу виготовлення, і в цьому випадку рухомими є частини труб, які стаціонарно контролюються системою контролю. В процесі експлуатації трубопроводів необхідно створювати первинні вимірювальні блоки виходячи із задачі дешевизни виготовлення, надійності (відсутності механічних рухомих частин) та значного покриття довжини ділянки контролю. В цьому випадку ми пропонуємо використовувати ультразвукові давачі, що генерують та реєструють ультразвукові спрямовані хвилі. Особливістю такого вимірювального блоку є покриття ділянки контролю до 10 м та дешевизна виготовлення. Існуючі дослідження використання

ультразвукового методу у розподілених системах контролю використовують традиційні методи неруйнівного контролю, проте недавні дослідження дозволяють використовувати спрямовані ультразвукові хвилі [2]. Дана система розроблена для контролю труб діаметром кілька сантиметрів і полягає в послідовному розташуванні давачів вздовж трубки для отримання акустичного сигналу. Ультразвукові давачі тут повністю охоплюють окіл трубки. Для генерування та отримання інформації від акустичного сигналу розроблені спеціальні процесори на матрицях FPGA. Система використовується при контролі різних температурних режимів та механіко-хімічного складу досліджуваного об'єкту. Для генерування спрямованих хвиль використовуються нульові поздовжні та зсувні моди. Інформаційна складова акустичної хвилі є часом поширення прямого та луно-імпульсу спрямованих хвиль від локальних відбивачів типу технологічні коліна, ґратки і інші блоки досліджуваного об'єкту. Особливістю досліджуваного об'єкту є закінчення, що має відповідати параметрам повного акустичного відбивача. В розподіленій системі може бути десятки таких компонентів розташованих вздовж трубопроводу. Таку систему вимірювання з розподіленими параметрами не можна застосувати для трубопроводів малого, середнього та великого діаметрів, оскільки система на трубопроводах має експлуатуватись на відкритій місцевості, що не робить доцільним виготовлення одного компоненту блоку первинного перетворювача як системи із багатьох п'єзокристалів, що розташовані по околу труби із спеціальними процесорами обробки інформації. Тому підхід розроблення нового блоку генерування та реєстрації інформаційного сигналу із акустичної хвилі, що утворена спрямованими модами для блоку вимірювальної системи технічного стану трубопроводів із розподіленими параметрами є актуальним та новим. Сучасні вимоги до експлуатації системи контролю обґрунтовують розроблення веб програм для зручної презентації результатів вимірювання, оброблення даних користувачів та безпеки даних. Дані вимірювання в таких системах постійно збільшуються і можуть досягати розміру пентабайт. Тому при розробленні



A_n , S_n – відповідно асиметрична та симетрична моди ультразвукових хвиль, де n є порядковим числом моди; x_1 – напрямок поширення хвилі вздовж осі труби; x_2 – напрямок товщини стінки труби; Γ_1 – границя розділу стінки труби із внутрішньою її частиною; Γ_2 – границя розділу стінки труби із зовнішнім середовищем

Рисунок 1 – Модель поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінці металевого трубопроводу

системи потрібно планувати ефективний спосіб збереження та обробки даних. Як правило, дані повинні зберігатись на декількох серверах із частковим копіюванням інформації. При обробці таких даних запити від серверів здійснюються на конкурентній основі із паралельними обробленням інформації. Сучасні тренди щодо обробки такої інформації пропонують підхід переривань і кускової обробки частин даних паралельно. Для технічного забезпечення паралельної обробки частин даних можуть використовуватись хмарні технології обчислення. Відповідно додатковими технічними рішеннями запропонованого підходу є використання спільного доступу до даних та розподіленої пам'яті. Прикладом таких комп'ютерних систем можуть бути гібридні паралельні обчислювальні системи, які на даний час успішно використовуються для вирішування комплексних проблем мереж, таких як обмеженість в розмірі даних.

Мета роботи. В роботі пропонується розроблення системи контролю із розподіленими параметрами, що використовує спрямовані ультразвукові хвилі і сучасний підхід до зберігання та обробки інформації. Запропонований підхід на відміну від існуючих дозволить використовувати блоки генерування та прийому інформаційного сигналу від акустичної хвилі, що поширюється в стінці сталюого трубопроводу малого, середнього та великого діаметрів у відкритому просторі. Система спрямована на контроль технічного стану трубопроводу на який впливає суцільність стінок, та наявність рідини всередині труб.

Теоретичне обґрунтування. Спрямовані ультразвукові хвилі можуть складатись із різних типів мод в залежності від способу їх збудження та частоти. Для стінок сталюих трубопроводів найбільш ефективним є збудження симетричної та асиметричної мод. Симетричні моди мають більшу складову поперечних коливань, а відповідно асиметричні моди переважну енергію коливань зосереджують в поздовжніх коливаннях. Для математичного опису поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінці трубопроводу скористаємось спрощеннями, що дозволять побудувати модель обчислення їх параметрів. Вважатимемо що хвиля поширюється в двомірному просторі, який обмежений верхнім та нижнім розділом середовищ між пружним та вакуумом. У випадку другого середовища газу, ми його для спрощення не будемо враховувати при обчисленні поширення пружних коливань, оскільки він практично не впливає на параметри поширення. У випадку другого середовища рідини – то така модель буде мати вплив на поширення спрямованої хвилі, оскільки нормальний компонент зміщення елементарного об'єму пружного середовища направлений нормально до границі розділу буде віддавати хвильову енергію в рідину (рис. 1).

Поширення акустичних коливань по околу труби (нормально до зображення, рис. 1) будемо вважати розширенням променя, що не впливає на частотні характеристики акустичних хвиль (групової та фазової швидкостей), а вносить зміни лише в амплітуду (енергію) сигналу. Зменшення амплітуди сигналу внаслідок розширення променя є рівномірним, описуються відомими рівняннями, є константою для труби

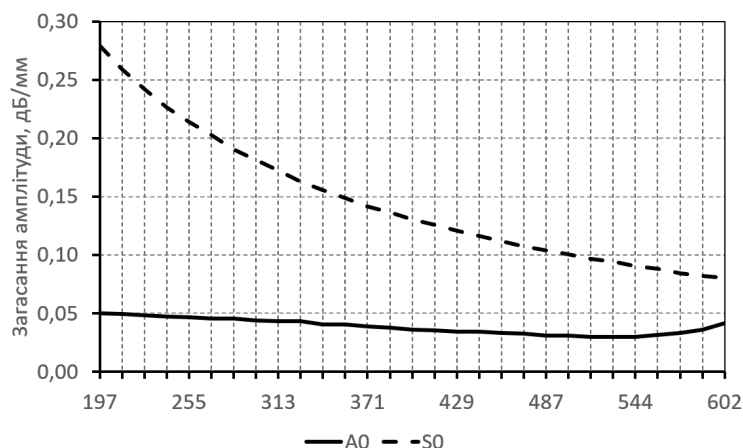


Рисунок 2 – Загасання симетричної S_0 та асиметричної A_0 мод ультразвукових коливань

одного діаметру та товщини стінки та не є інформаційним параметром системи контролю.

Поширення будь-якого акустичного коливання в пружному середовищі можна описати відомим рівнянням Ейлера для опису коливань елементарного об'єму середовища та закону Гука та збереження енергії [3]:

$$C_{kl} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_l \partial x_k} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де C_{kl} – компоненти матриці констант жорсткості, $k, l = 1..6$; $i, j = 1, 2, 3$; ρ – густина пружного середовища; t – час; u – елементарний об'єм середовища.

Подальше спрощення рівняння (1), що описує поширення ультразвукової хвилі, будемо базувати на основі того, що при поширенні хвилі враховуємо тільки нормальний її стиск та зсув елементарного об'єму:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} &= c_{11} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + c_{12} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ \rho \cdot \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} &= c_{22} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + c_{12} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{66} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рівняння (2) є значно легшим для проведення обчислення, оскільки є тільки 4 компоненти жорсткості, які не дорівнюють нулю. Складність обчислення (2) полягає в тому, що поширення хвилі відбувається в часі і коливання елементарного об'єму пружного середовища теж проходить в часі. Для спрощення обчислення запропонований підхід

перетворення системи рівнянь (2) в частотну область, застосувавши перетворення Фур'є до коливань елементарного об'єму пружного середовища [3]:

$$\begin{aligned} -\rho \cdot \omega^2 \cdot \hat{u}_1 &= \hat{c}_{11} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1^2} + \hat{c}_{12} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_2^2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ -\rho \cdot \omega^2 \cdot \hat{u}_2 &= \hat{c}_{22} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_2^2} + \hat{c}_{12} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_1}{\partial x_1 \partial x_2} + \hat{c}_{66} \frac{\partial^2 \hat{u}_2}{\partial x_1^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\mathbf{u} = \{\hat{u}_1, \hat{u}_2\}$ – перетворення Фур'є зміщення елементарного об'єму; $\hat{c}_{ij} = \text{Re}(\hat{c}_{ij}) + j \text{Im}(\hat{c}_{ij})$ – комплексне число, дійсна частина якого відповідає константі жорсткості пружного середовища, а уявна частина відповідає загасанню амплітуди.

Система рівнянь (3) дозволяє враховувати загасання амплітуди при поширенні хвилі вздовж стінки трубопроводу. Таким чином можна проводити теоретичні дослідження у випадку коли дві границі розділу середовищ є повітрям і коли внутрішня сторона труби є рідиною, змінюючи граничні умови. Проведені дослідження [3] показують, що наявність рідини впливає на загасання амплітуди асиметричної моди і не значне загасання амплітуди симетричної моди у порівнянні із поширенням хвиль, коли границі розділу є пружне середовище – повітря (рис. 2).

Детальне калібрування системи контролю повинне здійснювались на об'єкті контролю. В залежності від жорсткості зчеплення K_c обчислено [3] та експериментально

підтверджено коефіцієнт передачі акустичної енергії між границями розділу асиметричної моди A_{0i1}/A_{0i2} та симетричної моди S_{0i1}/S_{0i2} визначеними як відношення амплітуд хвиль при зовнішньому середовищі повітря та при наявності іншого зовнішнього середовища, наприклад рідина або інший матеріал (табл. 1).

Таблиця 1 – Коефіцієнти передачі хвильової енергії через границю розділу в залежності від їх жорсткості зчеплення

K_r , ГПа/мм	A_{0i1}/A_{0i2}	S_{0i1}/S_{0i2}
0,00	1,00	1,00
0,18	0,99	0,98
0,32	0,99	0,97
0,43	0,98	0,96
0,60	0,98	0,95
0,73	0,97	0,93
0,88	0,96	0,92
1,02	0,96	0,90
1,16	0,95	0,87
1,30	0,94	0,84
1,44	0,93	0,82
1,59	0,92	0,79
1,73	0,91	0,73

Критерії монтування компонентів системи контролю з розподіленими параметрами повинно залежати від геометрії досліджуваної ділянки. Очевидно, що збирання рідини в трубопроводах в яких робочим середовищем є газ відбувається на технологічних колінах та прогинах значних ділянок, наприклад повітряних переходів. Тому перед початком встановлення вимірювальних компонентів необхідно здійснити вимірювання просторового положення ділянки трубопроводу. У визначених місцях прогину (в початку і в кінці) встановлюються генератор ультразвукових коливань та приймач. Давачі мають один набір п'єзоелектричних перетворювачів і прикріплюються до нижньої стінки труби. Генератор регулярно збуджує п'єзоелектричний первинний перетворювач, який генерує коливальну енергію, що передається в стінку труби. Приймальний давач реєструє отримані коливання від моди спрямованої хвилі і передає сигнал на пункт збору первинної інформації. Типи мод спрямованих ультразвукових хвиль визначаються дисперсними рівняннями, товщиною стінки труби, частотою первинного перетворювача та кутом вводу коливань в стінку

(кутом нахилу падаючої об'ємної ультразвукової хвилі на поверхню стінки труби). Для проведення досліджень нам достатньо генерувати нульові або перші моди симетричної та асиметричної ультразвукової хвилі, оскільки в них зосереджено найбільше коливної енергії, що розподіляється всередині стінки при утворенні набору мод. Нульові моди поширюються на найдовшу відстань і тим самим є найбільш оптимальними при проектуванні системи контролю. Очевидно, що із збільшенням товщини стінки труби частота генерації коливань повинна зменшуватись для забезпечення можливості генерування нульових або перших мод. Відповідно із збільшенням товщини стінки довжина ділянки контролю збільшується. У випадку, коли довжина ділянки трубопроводу, що потребує контролю є більшою за допустимий діапазон чутливості ультразвукового приймача, приймається рішення, щодо підсилення енергії моди ультразвукової хвилі. Підсилення можна здійснити шляхом закріплення додаткового генератора ультразвукових коливань, що розташований на прямій лінії між першим генератором та приймачем і має відстань до першого генератора яка кратна цілому числу довжин хвиль вибраної моди. Типова структура блоку збору та передачі інформаційного сигналу показано на рис. 3.



Рисунок 3 – Організація системи контролю одного блоку збору інформації

Система аналізу (рис. 3) включає в себе попередній блок аналого-цифрового перетворення та реалізації протоколу зв'язку із блоком збору первинної інформації, що під'єднується до кількох первинних блоків. Передача інформації може відбуватись як через провідні лінії, так і на основі безпроводних технологій. Використання того чи іншого способу не впливає на систему контролю із розподіленими параметрами, а визначається економічною доцільністю при проектуванні

системи чи технічним рівнем подальшого обслуговування.

Зберігання інформації та проведення обчислень. Проведення контролю розподіленою системою вимагає розроблення спеціальних підходів до зберігання та оброблення отриманої інформації. Першим кроком проектування системи зберігання даних до таких систем, як правило, є управління доступом для різних клієнтів системи. Оскільки об'єкт контролю є великим за розмірами, до даних про різні контролювані ділянки можуть мати доступ на первинному рівні отримання цих даних різні люди (чи організації). В цьому випадку дані по окремих ділянках повинні зберігатись на серверах тих компаній чи відділів великої компанії, які несуть за контрольовану ділянку відповідальність.

Первинна інформація від систем контролю також повинна дублюватись, для можливості відтворення у випадку збоїв із збереженням та для контрольної перевірки даних при виявленні несанкціонованих змін. Таким чином дані отримані безпосередньо від системи контролю за визначеною ділянкою трубопроводу повинні:

1) зберігатись на щонайменше на двох серверах, які розташовані фізично в різних місцях і відповідно рівень доступу персоналу до яких має бути окремим, тобто працівник, що має доступ до першого сервера не може мати доступу до другого і навпаки. Така умова збільшує безпеку зберігання даних та персоніфікує відповідальність за втрату інформації;

2) мати можливість бути порівнюваними між собою, для виявлення розбіжностей. Така умова не дозволяє зберігати дані на зовнішніх носіях, оскільки при великих масивах їх складно завантажувати назад в систему для подальшого порівняння чи аналізу;

3) повними для їх аналізу програмним забезпеченням для ділянки контролю;

4) бути скопійованими чи мати різний рівень доступу до них із центрального сервера, щоб дозволити проводити аналіз всього об'єкту контролю. Причому, у випадку великих масивів даних, проведення аналізу на запит центрального сервера повинен здійснювались локальними серверами.

Проведений аналіз вимог до даних показує необхідність застосування кластерних рішень

чи розподілених комп'ютерних систем. При виборі розподілених комп'ютерних систем важливим чинником їх використання є продуктивність, яка в свою чергу залежить від архітектури. Наприклад, при аналізі засобами Ornet виявилось, що трирівнева архітектура має набагато більше продуктивності у порівнянні із дворівневою архітектурою [4]. Аналізувати параметри розподілених комп'ютерних систем може програмне забезпечення Hadoop, яке розподіляє процеси зберігання даних, управління програмним забезпеченням обробки великих даних. Система Hadoop може містити як незв'язані так і зв'язані дані на розподілених комп'ютерних системах (кластерах) і забезпечує можливість проводити їх аналіз [5]. На даний момент програмне забезпечення Hadoop є безплатним як частина проекту Apache Software Foundation. Однією із особливостей Hadoop є можливість продовжувати обчислення при відмові однієї чи декількох серверів (нод) системи. Таким чином це програмне забезпечення повністю відповідає вимогам щодо зберігання та аналізу даних отриманих із розподіленої системи контролю.

Основними компонентами Hadoop є реалізація розподіленої файлової системи та компонент MapReduce, який виконую дві функції співставлення та зменшення. Це дозволяє розділяти процеси на багато задач, кожна з яких виконується окремо в кластері. Розподілена файлова система реалізована за архітектурою Головний-Підпорядкований. А кожен комп'ютер, що входить до системи Hadoop є однією іменованою ногою, що реалізовує цю файлову архітектуру із застосування протоколу передавання інформації TCP. Іменована нода сама по собі не містить файли, а лише метадані про блоки файлів і їх місце, яке міститься в нодах з даними. Фактично іменована нода контролює ноди з даними та слідкує за наповненістю місця в цих нодах. Кількість копій файлів зберігається в іменованій ноді. Клієнти не можуть отримати доступ до файлів безпосередньо, а лише за отриманим дозволом від іменованої ноди. Без дозволу іменованої ноди не можуть розділятися і виконуватись процеси (рис. 4).

Програмні продукти, які виконуються в системі зберігають дані на нодах даних. При запуску програми нода даних з'єднується із

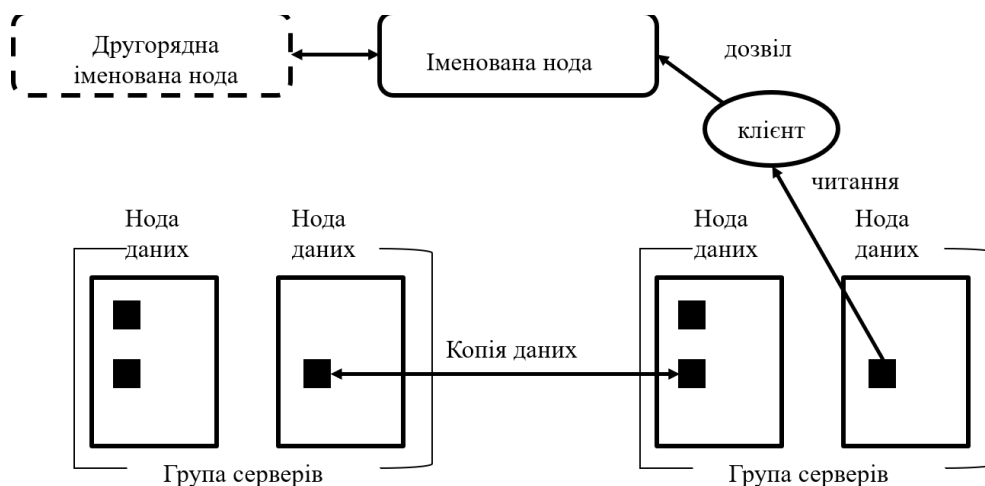


Рисунок 4 – Архітектура розподіленої файлової системи

іменованою ногою із перевіркою версії і ідентифікаційного номера. У разі несанкціонованого доступу нода даних відключається. Кожних три секунди розподілена файлова система перевіряє з'єднання нод даних із іменованими даними. І кожної десятої перевірки відбувається генерація повідомлень про стан нод даних до іменованих нод. Таким чином незважаючи на розподілену систему і множини зв'язків між нодами доступ до несанкціонованих даних заборонено на рівні реалізації нод даних розподіленої файлової системи. Для забезпечення перевірки доступу при фізичному копіюванні даних із сервера всі файли системи розділені на малі частини, які зберігаються на різних нодах даних. Це додатковий захист від копіювання даних, оскільки копіювання може здійснювались тільки на засобах розподіленої файлової системи із застосуванням повного механізму перевірки з'єднань між нодами.

Роль другорядної іменованої ноди полягає в тому, що цей сервер щогодини з'єднується із головним сервером (іменованою ногою) з метою отримати інформацію про образ файлової системи і файлів історії операцій. У випадку простою іменованої ноди другорядна нода виконує функції головного сервера. Доступ до файлів в розподіленій файлової системі здійснюється за допомогою програм (клієнтів), які можуть виконувати стандартний набір файлових операцій: читання, видалення, створення. Програма клієнт сама здійснює перевірку ідентифікації запиту до файлів, які

зберігаються на ноді даних у іменованої ноди. Тобто при запуску клієнта він створює набір з'єднаних зв'язків із нодами даних та доступами до іменованих нод для однієї файлової операції. Звичайно, розподілена файлова система має вищий рівень відмов у порівнянні із одиничним сервером, через збільшення кількості комп'ютерів і мереж. Для забезпечення надійного зберігання даних їх копіюють (реплікують) в інші ноди даних. Копії даних використовуються не тільки для збільшення надійності зберігання, а також для збільшення швидкодії файлової системи: при завантаженості нод даних іменована нода перевіряє швидкодію файлових операцій і переключує частину нових запитів для роботи із репліками даних.

Зворотна до читання файлів операція запису файлів здійснюється компонентом MapReduce, який розділяє файли в тому числі великі за об'ємом на частини створюючи з'єднаний ланцюг даних. Записи частин файлів здійснюється паралельно із співставленням частин файлів до одного файлу. Частиною обов'язків MapReduce є слідкування за часом виконання операцій та плануванням послідовності операцій на майбутнє.

Архітектура системи контролю з розподіленими параметрами. Важливою частиною розподіленої системи в тому числі і системи контролю ядром якої є передача даних від первинного перетворювача до серверів зберігання. Особливість аспекту передачі даних

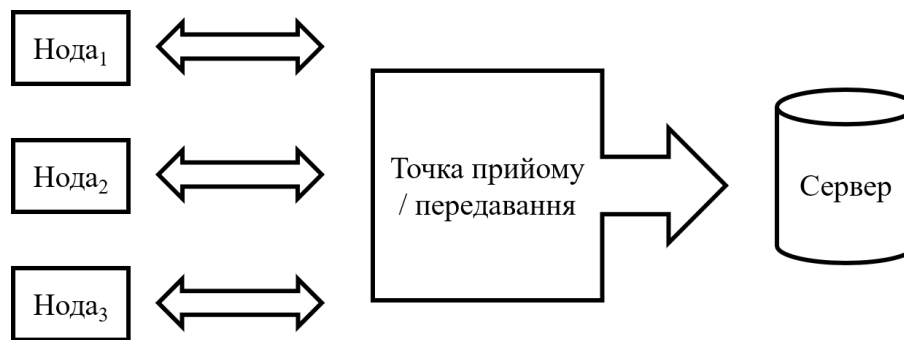


Рисунок 5 – Структура системи передавання даних на основі ієрархічної архітектури

це відстань та економічне обґрунтування використовуваних засобів. На наш погляд найбільш загальним є підхід реалізації системи передавання даних від первинних перетворювачів до серверів зберігання є безпроводне. Провідні системи є доцільним використовувати тільки при їх наявності і можливості спільного використання із одночасно з первинною метою застосування проводів. Фактично, щоб зменшити вартість системи передачі даних, та частина, яка має бути зроблена у великій кількості (кріпиться до первинний перетворювачів), має бути найбільш простою у виконанні. Прикладом, запропонованого підходу є система передачі даних, яка називається LoRaWAN [6]. В рамках підходу, що запропонована в такій системі, використовують тільки просту передачу даних від передавача напряму до системи збору. Системи збору і передавання, що обслуговують кілька первинних перетворювачів, також технічно реалізована без використання додаткових функції окрім пакетного передавання даних далі до наступної точки прийому. Точки збору і передавання даних фактично використовуються як ворота із функцією тунельного передавання даних. На цих точках не ведеться ніякої системи аналізу вхідних даних чи ідентифікації первинних нод. Ця ідентифікація відбувається на серверах зберігання даних. Система LoRaWAN для більшого здешевлення реалізації не має власних протоколів передавання інформації, а на ній може бути використаний будь-який із існуючих, який може бути реалізований в межах архітектури представленої на рис. 5.

Така ієрархічна архітектура дозволяє відокремити доступ чи власність обладнання,

що здійснює первинне передавання даних від серверів, що збирають і аналізують інформацію. Точка прийому і передавання даних має також і таймер для оцінки часу передавання із кроком 1 мкс з метою оцінки часу прийому. Простота передавання даних не означає, що доступ до них є безконтрольним. Дані пересилаються із 128-ми бітним ключем який відіграє роль ключа мережі та програми. Такий ключ забезпечує надійність передавання даних типу точка-точка. Технічні параметри передавання сигналу на прикладі давачів компанії Semtech є модульований сигнал в діапазоні 2.4 ГГц, що може проходити бетонні стіни та передаватись на відстані до 9 км на відкритому просторі [7]. Особливістю передавачів такого типу є ортогональний фактор поширення сигналу, що дозволяє одночасно передавати сигнал із сусідніх нод, якщо інтерферований сигнал на 18 дБ більший за фактор поширення. Фізичний рівень реалізує модуляцію спектру розгортання, який має гарні автокореляційні властивості. Гарні автокореляційні властивості створюються за рахунок збільшення відношення час/частота, що на нашу думку є більш правильним для реалізації систем контролю з розподіленими параметрами, де надійність і якість донесення інформаційної складової сигналу є більш важливою за збільшення часу передавання та оброблення. Збільшення захисту від пошкодження інформаційної складової при безпроводному передаванні сигналу здійснюється через підхід присвоєння миттєвої частотної траєкторії до кожного символу. Символом є кількість біт інформаційної складової сигналу, що представляється тунельним фактором розширення. На приймачі проводиться зворотна операція по

виокремленню інформаційної складової сигналу, що полягає в оптимальному фільтруванні шляхом зменшення піків сигналу через мультиплікацію локально генерованого піку сигналу. Практичним застосуванням системи передавання є використання сигналу в діапазоні 125 ... 250 кГц, де символ S має значення в діапазоні 7 ... 12. Швидкості передачі необроблених даних прямо пропорційна величині символу, частоти сигналу та величини блоку даних і обернено пропорційне величинам інформаційного слова та фактору 2^S . Символ є фактично псевдо-ортогональним кодом і різні символи можуть бути коректно декодовані навіть у випадку одночасного передавання, тобто пересікання в часі і частоті. Умовою одночасного передавання символу є різне його значення та значення сигналу до інтерферованого сигналу плюс рівня шумів (СШ) має бути вищим порогу ізоляції. Для збільшення надійного декодування значення двох символів мають мати найбільш різні значення. Це дозволяє створювати адаптивний механізм передавання даних де зі збільшенням надійності і якості сигналу, що передається йде збільшення часу передавання та оброблення. Звичайно, для системи розподіленого контролю трубопроводів адаптацію сигналу переводимо в режим найбільшої якості із найдовшим часом передавання та обробки.

Сигнали передаються у вигляді фреймів, який починається із восьми піків для синхронізації із приймачем. Після початку фрейму йде сигнал, що відокремлює фрейм одну від одної, який складається із 4.25 довжини символу (ВФ). Цей ВФ також може бути закодований спеціальним словом синхронізації для позначення публічного / приватного рівня інформації, що буде передаватись. Значення слова кодування може біти рівним або 0x34 для публічного типу фрейму або 0x12 відповідно до приватного. Наступна частина фрейма складається із восьми бітного сигналу фізичного рівня для перевірки автентичності відправленого сигналу, значення цього біту не відкривається і є частиною реалізації обладнання комерційними компаніями. Завершується восьмибітний сигнал перевіркою на помилки. Інформація, що є в цьому восьми бітному сигналу використовується для

позначення довжини корисного сигналу та стратегії декодування. Корисний сигнал на фізичному рівні завершує сигнал перевірки суми, що завершує фрейм. В табл. 2 представлено зібрана (узгоджена) інформація від виробників обладнання по параметрам сигналу [8].

Таблиця 2 – Параметри передавання сигналу бездротовими технологіями

Значення символу	7	8	9
Тривалість символу, мс	1	2	4
СШ, дБ	-9,5	-12	-14,5
Чутливість, дБм	< -130	< -130	< -130

В табл. 2 дані представлені для умов рівня помилок на пакет до 10% при відношенні довжини блоку інформації до довжини слова 4/5. По відношенню до колізій фреймів всередині системи, то для їх ідентифікації і успішного декодування потрібно, щоб різниця між рівнями сигналу була мінімум 6 дБ.

Результати. Представлена математична модель поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінках сталених трубопроводів та аналіз зміни сингалу внаслідок зміни граничного до стінок середовища за своїми фізико-механічними параметрами (густина, пружність) дозволяє створювати системи контролю наявності включень всередині труб при відносно невеликій кількості первинних перетворювачів. Сама конструкція первинних перетворювачів не вимагає особливостей виготовлення і може бути використаними комерційно доступні із чутливим елементом зробленим із п'єзо матеріалу. Практика показує, що такі первинні перетворювачі можуть довго (роками) експлуатуватись без значного спотворення результатів контролю.

Використання безплатного серверного забезпечення для організації зберігання, читання та оброблення даних утворених розподіленою системою контролю є оптимальним рішенням виходячи із економічного погляду та безпеки доступу до даних, також важливим чинником, що додає переваг до використання Nadoob. Аналіз роботи системи Nadoob вказує на значну швидкодію роботи розподіленої файлової системи. Також, важливим чинником є також і постійна підтримка системи Nadoob з боку

розробників, що гарантує оперативне оновлення алгоритмів та видалення похибок.

Створення як частини системи контролю із розподіленими параметрами підсистеми бездротової передачі даних дозволить експлуатувати розробку в більш універсальних умовах без залежності від інфраструктури додаткового обладнання, яке в деяких випадках є відсутнім, а в інших належить організаціям, що на пряму не є частиною компанії, з експлуатації трубопроводу. Представлена система передавання даних також може використовуватись для місць з великою протяжністю труб на одиницю площі, наприклад газо перекачувальних станцій, оскільки має можливість регулювати параметри сигналу для одночасного його передавання та декодування без втрати інформації. Представлена система передавання також може використовуватись і на ділянках у віддаленій чи малозаселеній місцевості для контролю значної протяжності трубопроводів, оскільки частина системи, що кріпиться до первинних перетворювачів є проста у виконанні і несе значної частини собівартості системи.

Висновки. Встановлено, що спрямовані ультразвукові хвилі нульових симетричної та асиметричної мод по різному реагують на зміну фізико-механічних параметрів граничного середовища до стінок трубопроводів, що дозволяє отримувати більш інформативну складову із отриманих акустичних сигналів через аналіз їх амплітуди у випадку відсутності та наявності зміни фізико-механічних параметрів граничного середовища, так і через порівняння величини зміни двох мод можна проводити ідентифікацію типу зміни, наприклад рідина чи тверде тіло.

Знайдено та проаналізовано компоненти та їх параметри, що є сумісними і можуть разом утворювати єдину систему контролю з безпроводними параметрами (реалізація серверного обладнання для зберігання та обробки даних та системи передавання сигналу на великі відстані та складних умовах конфігурації трубопроводу), якими можна конструювати систему контролю для трубопроводів малого, середнього та великого діаметрів для контрольованих ділянок, що можуть експлуатуватись як біля населених

пунктів (великі шуми сигналу у часовій і частотній області), так і у малонаселених та віддалених районах (відсутність джерел живлення та недостатність безпеки експлуатації компонентів системи контролю).

Література

1. Zeebaree, S. R., Shukur, H. M., Haji, L. M., Zebari, R. R., Jacksi, K., & Abas, S. M. (2020). Characteristics and analysis of hadoop distributed systems. *Technology Reports of Kansai University*, 62(4), 1555-1564.
2. Лютак І. З., Лютак З. П., Стрілецький Ю. Й. Удосконалення методу контролю стінок трубопроводів ультразвуковим методом із застосуванням інформаційно-програмного забезпечення. *МПКЯ*, №2(35). 2015, С. 27-37.
3. Hosten B., Casataings M. Finite elements methods for modeling the guided waves propagation in structures with weak interfaces. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. Vol 760. P. 142 149. ISSN 0001-4966.
4. B. R. Ibrahim, S. R. M. Zeebaree, and B. K. Hussan, "Performance Measurement for Distributed Systems using 2TA and 3TA based on OPNET Principles," *Science Journal of University of Zakho*, vol. 7, no. 2, pp. 65–69, Jun. 2019, doi: 10.25271/sjuoz.2019.7.2.603.
5. P. Mittal, V. Jain, and T. Ahuja, "File System and Hadoop Distributed File System-An Analogy," *International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science*, vol. 4, 2015.
6. Rizzi, M., Ferrari, P., Flammini, A., & Sisinni, E. (2017). Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(12), 3340-3349.
7. A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W.M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things". *Sensors* 2016, 16, 1466.
8. C. Goursaud, J.-M. Gorce, "Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges," *EAI endorsed Transactions on Internet of Things*, 2015.[Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01231221>

References

1. Zeebaree, S. R., Shukur, H. M., Haji, L. M., Zebari, R. R., Jacksi, K., & Abas, S. M. (2020). Characteristics and analysis of hadoop distributed systems. *Technology Reports of Kansai University*, 62(4), 1555-1564.
2. Lyutak I. Z., Lyutak Z. P., Striletskiy Yu. Y. Udoshkonalennya metodu kontrolyu stInok truboprovodiv ultrazvukovim metodom Iz zastosuvannyam InformatsIyno-programnogo zabzpechennya. *MPKYa*, #2(35). 2015, S. 27-37[in UKR]
3. Hosten B., Casataings M. Finite elements methods for modeling the guided waves propagation in structures with weak interfaces. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. Vol 760. P. 142 – 149. ISSN 0001-4966.
4. B. R. Ibrahim, S. R. M. Zeebaree, and B. K. Hussan, "Performance Measurement for Distributed Systems using 2TA and 3TA based on OPNET Principles," *Science Journal of University of Zakho*, vol. 7, no. 2, pp. 65–69, Jun. 2019, doi: 10.25271/sjuoz.2019.7.2.603.
5. P. Mittal, V. Jain, and T. Ahuja, "File System and Hadoop Distributed File System-An Analogy," *International Journal of Innovations & Advancement in Computer Science*, vol. 4, 2015.
6. Rizzi, M., Ferrari, P., Flammini, A., & Sisinni, E. (2017). Evaluation of the IoT LoRaWAN solution for distributed measurement applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(12), 3340-3349.
7. A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W.M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things". *Sensors* 2016, 16, 1466.
8. C. Goursaud, J.-M. Gorce, "Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges," *EAI endorsed Transactions on Internet of Things*, 2015.[Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01231221>

УДК 004.896

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-75-92

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ОБ'ЄМУ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ

Л.О. Потеряйло, В.В. Процюк, К.І. Кравців*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15,
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; milapoterailo@gmail.com*

В статті розглянуто питання ускладнень, що виникають в ході технологічних процесів буріння, пов'язаних з геолого-геофізичними і зовнішніми умовами, урбанізацією територій та виявленням невідповідності фактичних умов буріння від проєктованих в зв'язку зі змінами, що відбуваються під впливом кліматичних та геологічних змін, які виникають в проміжку часу від закінчення складання проєкту та фактичним початком розробки родовища. Проаналізовано взаємозв'язок факторів, які ускладнюють процес буріння з етапами проєктування та організацією зв'язків бази прецедентів, на основі яких моделюються технологічні процеси буріння. Розкрито фази циклу міркувань на основі знань з проєкцією на інформаційний цикл управління процесами буріння. Представлено архітектуру автоматизації технологічних процесів буріння з посиланням на піраміду комп'ютерно-інтегрованого виробництва. В статі показано можливість застосування методів машинного навчання до завдань аналізу даних, пов'язаних із процесом буріння. Запропоновано використання комбінованого підходу для адаптації даних використовуваних для прийняття рішень на основі знань. Розглянуто проблему недостатньої кількості прецедентів для навчання знання-орієнтованої системи інтелектуальної підтримки процесів прийняття рішень та обґрунтовано забезпечення засобами повномасштабних тренажерів необхідного обсягу даних для здійснення моделювання ускладнень технологічного процесу буріння, що характеризується високим ризиком. Авторами визначено рівень очікуваного співвідношення між основними об'єктами знання-орієнтованої системи інтелектуального прийняття рішень щодо ходу технологічного процесу: проблемами машинного навчання з одного боку та нафтогазовими свердловинами з іншого боку.

Ключові слова: геолого-технічні дані, ускладнення, машинне навчання, знання-орієнтована система, бурові тренажери.

В статье рассмотрены вопросы осложнений, возникающих в ходе технологических процессов бурения, связанных с геолого-геофизическими и внешними условиями, урбанизацией территорий и выявлением несоответствия фактических условий бурения от проектируемых в связи с изменениями, происходящими под влиянием климатических и геологических изменений, возникающие в промежутке времени от окончания составления проекта и фактическим началом разработки месторождения. Проанализирована взаимосвязь факторов, которые затрудняют процесс бурения с этапами проектирования и организацией связей базы прецедентов, на основе которых моделируются технологические процессы бурения. Раскрыто фазы цикла рассуждений на основе знаний с проекцией на информационный цикл управления процессами бурения. Представлено архитектуру автоматизации технологических процессов бурения со ссылкой на пирамиду компьютерно-интегрированного производства. В статье показана возможность применения методов машинного обучения к задачам анализа данных, связанных с процессом бурения. Предложено использование комбинированного подхода для адаптации данных используемых для принятия решений на основе знаний. Рассмотрена проблема недостаточного количества прецедентов для обучения знания ориентированной системы интеллектуальной поддержки процессов принятия решений и обоснованно обеспечения средствами полномасштабных тренажеров необходимого объема данных для моделирования осложнений технологического процесса бурения, который характеризуется высоким риском. Авторами определен уровень ожидаемого соотношения между основными объектами знания ориентированной системы интеллектуального принятия решений по ходу технологического процесса: проблемами машинного обучением с одной стороны и нефтегазовыми скважинами с другой стороны.

Ключевые слова: геолого-технические данные, осложнения, машинное обучение, знание-ориентированная система, буровые тренажеры.

The article considers the issues of complications arising during the technological processes of drilling related to geological, geophysical and external conditions, urbanization and detection of inconsistencies between the actual drilling conditions from the projected ones due to changes in climate and geological changes, which occur in the period from the end of the project and the actual start of development of the field. The interrelation of the factors that complicate the drilling process with the stages of design and organization of precedents, on the basis of which the technological processes of drilling are modeled, is analyzed. The phases of the cycle of reasoning based on knowledge with a projection on the information cycle of drilling process control are revealed. The architecture of automation of technological processes of drilling with reference to the pyramid of computer-integrated production is presented. The article shows the possibility of applying machine learning methods to data analysis tasks related to the drilling process. The use of a combined approach to adapt the data used for knowledge-based decision-making is proposed. The problem of insufficient precedent for training knowledge-oriented system of intellectual support of decision-making processes is considered and the provision of full-scale simulators with the necessary amount of data for modeling complications of high-risk drilling process is substantiated. The authors determine the level of the expected ratio between the main objects of the knowledge-oriented system of intelligent decision-making on the course of the technological process: the problems of machine learning on the one hand and oil and gas wells on the other.

Key words: geological and technical data, complications, machine learning, knowledge-oriented system, drilling rigs.

Вступ

Однією з важливих задач автоматизації в сфері буріння є забезпечення безпеки геолого-технологічних процесів та цілісності інформації, що циркулює між учасниками розробки нафтогазових родовищ. Дані щодо функціонування бурового, свердловинного і сервісного обладнання, шляхом їх індексування і зберігання в розподіленій базі даних, можуть бути використані для інтелектуального управління технологічними процесами, як на рівні нафтовидобувної компанії, підрядних організацій, сервісних так і супервайзінгових підрозділів.

Кращі світові практики показали ефективність застосування принципів «цифрового родовища» (digital oilfield) на нафтогазових об'єктах, що забезпечує в процесі експлуатації газонафтовидобутку не менше 10%, зменшення часу простоїв свердловин близько 50% від початкового рівня [1].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Способи вимірювання геолого-технологічних параметрів буріння в реальному часі та розвиток технології цифрових давачів - це питання досліджень, пов'язаних з надійністю та безпекою під час буріння нафтових свердловин, що робить можливим діагностування проблем та розробку стратегії виробництва.

При моделюванні технологічних процесів буріння базу знань формують з геолого-

технологічної інформації отримання, якої може бути здійснено в такі чотири основні способи:

- параметри реєструються автоматично за допомогою давачів, що монтуються безпосередньо на буровій площадці (в основному це технологічні параметри буріння). Дискретність реєстрації задається на рівні програмно-апаратного комплексу;

- параметри реєструються автоматично за допомогою апаратури, що знаходиться на станції геолого-технологічних досліджень, наприклад блоку газового каротажу;

- параметри вимірюються вручну за допомогою спеціальних приладів. Виміряні значення параметрів заносяться вручну або автоматично в програми для їх обробки і візуалізації;

- параметри обчислюються за допомогою апаратно-програмного комплексу і можуть бути технологічними, геологічними, техніко-економічними і параметрами газового каротажу [2].

Інформаційне середовище моделюється на основі описаних даних, з використанням ШІ (штучного інтелекту), що спирається на алгоритми, керовані даними. Такі розрахунки зумовлені збільшенням обсягу великих даних, давачів і мереж, а також перехресної інформації, тому розвиток ШІ, пов'язаний з великими даними, давачами та мережами.

Розмір даних про технологічні процеси визначає складність для знання-орієнтованої системи, що їх опрацьовує [3].

В роботі [4] визначено залежності системи прийняття рішень (ручне, автоматизоване, інтелектуальне) і обсягів інформації, що отримуються з давачів бурового обладнання. Описано застосування програмно-технічних засобів для забезпечення створення високопродуктивної системи управління процесами буріння.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

При використанні прецедентів найбільш ефективних технічних рішень, оптимізації капітальних вкладень в перспективні проекти, нові проекти реконструкції і технічного переозброєння діючих потужностей виникає проблема систематизації отриманого досвіду і розробки єдиного комплексного підходу до автоматизації свердловин та інтеграції інтелектуальних додатків як частини загальної філософії контролю та управління процесами.

Однією з задач, що не знайшли ефективного вирішення при розробці та впровадженні систем симуляції в вітчизняній нафтогазовій галузі є проблема доступності даних, організація їх збору, структурування, зберігання і розподілу. Оснащення бурильника і інженерів конкретними і швидкими рішеннями, заснованими на впровадженні технологій штучного інтелекту при моделюванні і обробці польових даних в реальному часі, є основою для підвищення операційної ефективності і зниження витрат при будівництві нафтових і газових свердловин, забезпечення виробничої та екологічної безпеки. Недостатня кількість інформації, її неточність і суперечливість є дуже важливим фактором [5].

Під час збору даних давачі можуть давати збої і як наслідок мати характер невідповідності - передаються неправильні та недостовірні дані. При виникненні несправності давача, необхідно прийняти рішення: вилучити дані або змінити їх. Фундаментальним для передбачення цього типу завдань є побудова бази знань, яка використовує багато сучасних підходів до штучного інтелекту та експертних систем, а також тісно інтегровану традиційну логіку.

Підходи до розпізнавання корисних даних представляють відкриту область для досліджень. У деяких випадках, таких як відсікання та стискання, вони вказуватимуть на

необхідність налаштуватися і, разом із інтелектуальним пошуком параметрів керування за допомогою моделювання, і становлять важливу область дослідження. Оскільки множина зразків рішень на основі знань стає дуже великою, виникає проблема створення ідеального комбінованого підходу для адаптації.

Найчастіше у реальному бурінні важко чітко встановити точний опис складного процесу, який є складною комбінацією механічних, електричних, хімічних та термодинамічних сутностей. Описи, як правило, погано інтерпретуються або взагалі не інтерпретуються. Частіше фактичні факти процесів у даному класі суттєво відрізняються від теоретичних абстракцій, які розуміються на рівні наукових досліджень. Моделювання є початковим кроком між активною розробкою програми, яка може автоматично закрити цикл зворотного зв'язку та безпосередньо впливати на виробничі відносини, та розробкою суто автоматизованого циклу, що може вплинути та впорядкувати операції в предметній області.

Ряд досліджень визнають наявність проблеми недостатнього навчання – недостатню кількість даних аварій та нештатних ситуацій [6].

При проведенні дослідження було опрацьовано деякі реальні дані, що надходять з експлуатаційних свердловин, передані ПАТ «Укрнафта». Але при прийнятті рішень система повинна розпізнавати випадки, які є не тільки нетиповими, але такими які в реальних умовах буріння повинні бути зведені до мінімуму. Стратегія проведення технологічних процесів передбачає вжиття всіх можливих засобів щодо недопущення нештатних, аварійних ситуацій і ускладнень.

Процес буріння за своєю природою характеризується високим рівнем невизначеності, до цього також потрібно додати, що при виникненні аварійних ситуацій виникає відповідальність виконавців, у разі невідповідності професійних дій.

Формулювання цілей статті

Цілями статті є визначення факторів, що характеризують буріння як невизначений процес та фази формування інтелектуального рішення. На основі наявних даних в ході циклів міркувань на основі знань, у взаємозв'язку з

інформаційним циклом процесу буріння, результатом повинно стати висвітлення етапів та способів адаптації даних при моделюванні нештатних ситуацій та обґрунтування вибору стратегії моделювання знання-орієнтованої системи здатної формувати інтелектуальні рішення на основі відтворених даних про процеси буріння.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Технологічно спорудження свердловин пов'язане із цілою низкою задач, серед яких найважливіша – забезпечення успішного буріння із попаданням вибою у визначене коло допуску. Проблеми, що виникають при їх вирішенні, як правило, спричинені недостатньою інформативністю щодо гірничо-геологічних даних під час проектування профілю свердловини та неточністю виконання робіт при їх спорудженні. При проектуванні та організації зв'язків бази прецедентів, на основі яких будуть моделюватись технологічні процеси буріння слід детально вивчити фактори, які ускладнюють процес буріння.

Використання в процесі розробки технологій геоданих є першим кроком для моделювання процесів буріння і організації експлуатації нафтогазової свердловини. Невід'ємною частиною при цьому є проведення геолого-технологічних досліджень, які з урахуванням сучасних можливостей і обладнання об'єднують різні напрямки: приладовий контроль буріння на основі інформаційно-вимірювальних систем; газовий каротаж; експресні петрофізичні дослідження.

В процесі проведення бурових робіт, будівництва та експлуатації родовищ з причин, пов'язаних з природними і техногенними факторами, виникають різного роду інциденти, які поділяють за низкою ознак на ускладнення і аварії. Виникаючі при бурінні ускладнення є прогнозованими і очікуваними з урахуванням накопиченого досвіду буріння, наявних геологічних і технологічних факторів. Моделювання технологічних процесів дозволяє усунути ряд ускладнень на початкових стадіях.

Аналіз інформації щодо проблемних питань під час будівництва свердловин на родовищах ПАФ «Укрнафта» за останні роки свідчать, що з причин порушення технологічного процесу

будівництва свердловини нерідко переходять в категорію аварійних і в середньому 20-25% від часу будівництва йде на боротьбу з ускладненнями та аваріями. Скорочення втрат робочого часу для усунення ускладнень і їх наслідків є однією з можливостей для збільшення коефіцієнта продуктивності робіт, скорочення часу при будівництві свердловин.

Як джерела даних при проведенні досліджень використовувалися дані 94 випадки ускладнень з розробки 25 свердловин 23 родовищ ПАТ «Укрнафта» (Анастасівське, Артюхівське, Бугруватівське, Козіївське, Старо-Самбірське, Барзаківське, Бугруватівське, Будівське, Долинське, Лопушнянське, Пн.Долинське, Рудівське, Рудівсько-Червонозаводське, Сх.Решетняківське, Тереснянське, Велико-Бубнівське, Гнідинцівське, Лесяківське, Решетняківське, Сх.-Решетняківське, Сх.Калинівське, Ярошівське), архівні дані геолого-технологічних досліджень вітчизняних компаній-розробників. В результаті проведеного аналізу підтверджені і оброблені дані по ускладненнях різних типів. Основними видами є: осипи і обвалення нестійких порід, втрата герметичності колони, звуження стовбура свердловини текучими породами, поглинання бурового розчину, нефтеводогазопроявлення. Частка цих ускладнень становить більше 85% від загального числа фіксованих ускладнень; при цьому в річному балансі непродуктивних витрат частка витрат на їх усунення становить від 5 до 25% собівартості видобутого продукту. Різноманіття причин виникнення цього виду ускладнень і їх взаємозв'язок вимагає заходів щодо їх попередження.

Серед аварій основне місце займають руйнування бурильної колони(її елементів), прихвати бурильного інструменту внаслідок різних причин (в основному внаслідок дії перепаду тиску в зоні проникних порід і заклинювання колони бурильних труб), а також зминання обсадних колон.

Особливості та параметри джерела аварій визначають характер і масштаби засобів протидії. Джерелом аварій може бути бурове обладнання, природні чинники і суб'єктивні причини. Перш за все, це аварії, що сталися з вини виконавця, тобто виникли через

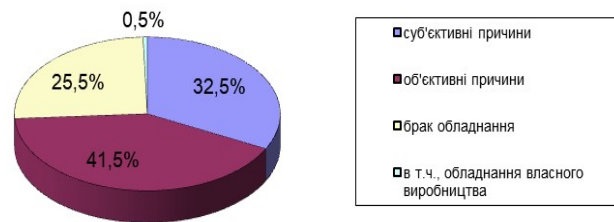


Рисунок 1 - Аналіз причин виникнення аварій

суб'єктивні причини, їх частка складає понад 30%.

Найбільш повне врахування особливості геологічної будови при виборі бурового обладнання і технології бурових робіт та застосування технічних заходів, що запобігають виникненню ускладнення в процесі буріння є важливим аспектом у процесі буріння свердловин. Практика свідчить, що рекомендовані технології, які ефективні для одних регіонів, не завжди придатні для застосування для буріння свердловин на іншому родовищі.

Досвід діяльності провідних західноєвропейських і американських фірм свідчить, що найбільш сприятливими гірничо-геологічними умовами для буріння похило скерованих і горизонтальних свердловин є поклади вуглеводнів, що відносяться до масивних і потужних товщ вапняків, доломітів, пісковиків. Для українських нафтогазових регіонів, головними з яких є Донецько-Дніпровська і Карпатська – геологічні умови значно складніші.

Буріння похило-скерованих свердловин на площах Прикарпатського регіону в значній мірі ускладнене із-за чергуванням м'яких, середньої твердості та твердих нестійких гірських порід різної абразивності, їхньою перем'ятістю, складною складчастою будовою, наявністю у розрізі гірських порід, що відрізняються фізико-механічними властивостями. Характерною властивістю гірських порід родовищ Прикарпаття є різноманітність текстур, стратиграфічна неузгодженість та високий ступінь їх неоднорідності, обумовлений в першу чергу відмінностями складу і будови порід. Вищий ступінь неоднорідності спостерігається в масивах, які складені різноманітними гірськими породами. Крім того, в масивах гірських порід часто трапляються геологічні порушення та

тектонічні розриви, що характеризують велику довжину і розташовані перпендикулярно, під кутом або паралельно напластуванню цих порід [7].

Осадовий комплекс порід в Дніпровсько-Донецькій западині утворений аргілітами, вапняками, доломітами, глинами, ангідритами, мергелями. Всі ці породи рідко утворюють потужні однорідні товщі в окремих частинах западини, а частіше виступають у вигляді перешарування певних комплексів порід з перевагою того чи іншого літологічного різновиду. Колектори нафти і газу Дніпровсько-Донецької западини утворені теригенними відкладами – пісковиками та алевролітами і лише на окремих родовищах – карбонатами, вивітрелими і тріщинуватими кристалічними породами. а за своїми гірничо-геологічними властивостями є геологічним утворенням, в якому зосереджені різні за мінералогічним складом породи, різноманітні за ступенем консолідованості пласти, достатньо високі пластові тиски і температури, високомінералізовані пластові води, природні скупчення нафти, газу і конденсату [8].

Дані про структуру пласта, його ефективної нафтонасиченої товщини, розшарування на окремі пласти і зони дозволяють виконати побудову структурних карт і геологічних профілів з нанесенням положення газонафтових і водонафтових контурів. Дані, що характеризують геометрію пласта, дозволяють визначити запаси нафти і газу, і вибрати варіанти розміщення свердловин. Отже, чим повніше сформована база знань, щодо геолого-промислових умов, тим точніше визначається система розробки нафтового покладу. Визначальним фактором для формування такої бази є збір та організація інформації, формування інтегрованої бази технічних, технологічних і геолого-геофізичних даних.

З урахуванням складності операцій, що виконуються при розробці нафтогазових родовищ, наявністю невизначеностей, пов'язаних з геолого-геофізичними і зовнішніми умовами, тренажери буріння можна віднести до категорії ефективних інтелектуальних інструментів попередження ускладнень і аварійних ситуацій при будівництві нафтових і газових свердловин.

Урбанізація території, на якій здійснюється нафтопромислова діяльність, технічно ускладнює буріння і значно збільшує фінансові витрати. Проблема забезпечення ізоляції промислової системи від навколишнього середовища в нафтогазовому господарстві посідає важливе місце. При будівництві свердловини герметичність забезпечується обсадною трубою і засобами різьбових з'єднань. Оскільки подальше збільшення числа розвідувальних та експлуатаційних свердловин, а також обсягів видобутку корисних копалин нерозривно пов'язане з порушенням екологічної рівноваги, то захист навколишнього середовища і охорона надр мають бути враховані при моделюванні технологічних процесів. При бурінні глибоких свердловин на нафту мають місце найвищі екологічні навантаження на навколишнє середовище. Так в місцях буріння геологорозвідувальних і експлуатаційних свердловин в атмосферу надходять викиди газів і продуктів згоряння при роботі двигунів і випаровуванні легколетких речовин. Підвищується загазованість і запиленість повітря за рахунок хімічних реагентів, тонкодисперсних порошків вапна, цементу, глинопорошків, обважнювачів. Радіус впливу діяльності однієї бурової на атмосферне повітря і ґрунт простежується більш ніж на 2 км.

Технологічні процеси видобутку, збору, підготовки нафти і газу при високій урбанізації території, потребують додаткові витрати пов'язані з контролем повітряного середовища в населеному пункті, витрати на додаткове технічне оснащення. Фонтанні свердловини з дебітом 400 т/добу нафти чи 500000 м³/добу газу і більше, розташовані на відстані менше 500 м від населеного пункту, оснащуються внутрішньосвердловинним обладнанням. На промисловому об'єкті буріння при облаштування і забезпеченні безпеки обслуговуючого персоналу і населення значний

вплив має рівень урбанізації території при виборі систем управління і регулювання, місця розміщення засобів контролю, організації протиаварійного захисту.

Урбанізація є фактором виникнення природних та техногенних геохімічних аномалій, що зумовлені підвищеним вмістом вуглеводневих газів у ґрунтовому шарі, в результаті чого в окремих підвальних приміщеннях житлових будівель та інших споруд можливе накопичення значної кількості вуглеводневих газів, що призводить до виникнення небезпечних ситуацій. Найбільш проблемним з цієї позиції в Україні є Бориславське нафтове родовище [9].

Попереднє моделювання технологічних процесів і ситуацій на об'єкті буріння може стати одним з шляхів часткового розв'язку проблеми урбанізованих територій під час розробки нафтогазових родовищ.

Рішення, що містяться в інформаційній базі знання-орієнтованої системи повинні передбачати:

- оптимізацію використання природних ресурсів;
- виключення можливості незворотних техногенних змін природного середовища, в тому числі і при можливих аварійних викидах шкідливих речовин;
- оцінку надійності і безаварійності виробничих процесів і обладнання;
- оцінку ризику виникнення і можливих наслідків прогнозованих аварійних ситуацій, пов'язаних з викидом шкідливих речовин;
- а також бути спрямовані на запобігання, локалізацію, ліквідацію аварії і захист працюючих і населення від небезпечних виробничих факторів.

Розкриття вуглеводних пластів повинно проводитися після перевірки і встановлення готовності бурової і персоналу до розтину пласта на віртуально змодельованому об'єкті засобами інтелектуальної системи, що дає можливість захисту працюючих і населення в зоні можливої загазованості в разі аварійного викиду нафти і газу (відкритого фонтана).

Вуглеводні, що надходять з пошкодженої свердловини, завдають істотної шкоди економіці та екології регіону. Нафта і нафтопродукти є одними з найбільш поширених і небезпечних техногенних забруднювачів, їх

видобуток, транспортування і переробка роблять у край згубний вплив на навколишнє середовище. За даними статистики на нафтогазовому комплексі відбувається приблизно 60 аварій різного масштабу щорічно, наслідками є розлив нафти, що потрапляє у водойми, загибель робітників виробництва, а також великі збитки. Ці дані не повністю достовірні і повні, так як більшість виробничих аварій ховаються від широкого кола громадськості.

Негативний вплив на екологію відбувається починаючи з розчищення певної ділянки для установки бурового обладнання. Далі, збиток, що завдається навколишньому середовищу, починає зростати через випадки розливу сирої нафти. За даних умов ґрунт, підземні та надземні водні джерела отримують забруднення, для відновлення необхідні роки. Також при вилученні з надр нафти, газу і підземних вод, які підтримують пластовий тиск, відбуваються незворотні деформації земної поверхні. Таким чином, головне завдання - звести до мінімуму небажані наслідки, раціонально використовуючи природні умови [10].

При проектуванні бази знань інтелектуальної системи слід враховувати особливості територій, де планується здійснення нафтогазової діяльності. Для українських реалій це є моделювання технологічних процесів враховуючи складність геологічних умов буріння, прийняття рішень на основі минулого досвіду виконання технологічних процесів на урбанізованих територіях, як з погляду зниження аварійності так і захисту від негативних впливів на екологію та населення цих територій. Геологічні умови українських нафтогазових регіонів доволі складні. Результати теоретичних, експериментальних і промислових досліджень потрібно вносити в базу знань інтелектуальної системи, що дає можливість здійснити поправки в технологію буріння і успішно провести будівництво свердловини в реальних умовах.

При реалізації інвестиційних проектів будівництва особливо важливим стає початкове формування переліку завдань з буріння і будівництва свердловин на основі наявних сучасних технологій, цілей і завдань функціонування об'єкта, прийнятих

технологічних рішень і черг. В цьому аспекті слід розглянути питання ускладнення процесу буріння внаслідок невідповідності фактичних умов буріння від проєктованих в зв'язку зі змінами, що відбуваються під впливом кліматичних та геологічних змін, які виникли в проміжку часу від закінчення складання проєкту та фактичним початком розробки родовища.

Згідно дослідження [11] слід розглядати чотири режими роботи свердловини - фактичний, проєктний, режимний і потенційний. Дебіт цифрової свердловини прагне до режимного, дебіт інтелектуальної свердловини - до потенційного (рис. 2).

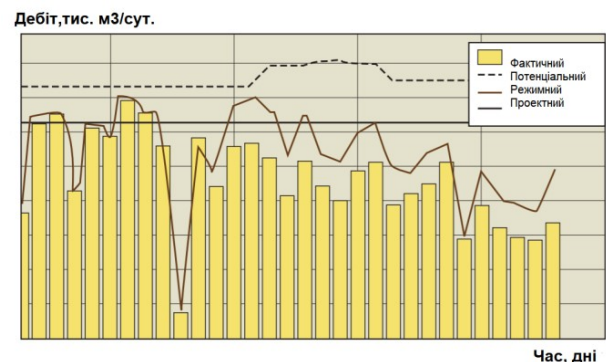


Рисунок 2 – Порівняння режимів роботи свердловин

За непрямыми параметрами в процесі будівництва уточнюється геологія пласта і приймається рішення про коригування траєкторії буріння, щоб весь час залишатися в межах нафтового пласта. Для цього використовують давачі, що передають інформацію про ґрунт з давачів бурового обладнання. Засобами інтелектуальної системи використовуючи методи машинного навчання може бути здійснено аналіз таких даних - рівень вібрації, швидкість буріння і обертання ротора, навантаження на долото. Ці параметри залежать від фізико механічних і геологічних характеристик розкриття гірської породи. Аналіз даних методами машинного навчання дозволяє оперативно визначати літологічний склад і непрямі властивості породи. У разі якщо параметри гірської породи, згідно яких розроблено проєкт, відрізняються від фактичних, є можливість коректування траєкторію свердловини. Технологія машинного навчання передбачає самонавчання під час

буріння, тому прогноз літології гірських порід здійснюється на основі минулого досвіду.

Для досягнення на великих глибинах високої точності виходу свердловини на точку з наперед заданими координатами є необхідним застосування безперервного високоточного та надійного електронного телеметричного супроводу із залученням сучасних ІС та технологій. Опрацювання інформації цих приладів може використовуватись для формування бази даних симулятора.

Основними векторами цифровізації бурових робіт є наступні:

- створення сучасних інтерактивних середовищ для забезпечення збору, систематизації і аналізу всієї оперативної інформації в режимі реального часу і забезпечення на цій основі ефективного управління процесом будівництва свердловин;

- автоматизація виробничих процесів на основі впровадження систем штучного інтелекту;

- створення і впровадження нових інструментів для дистанційного моніторингу та управління операційною діяльністю;

- використання інтегрованих крос-функціональних показників ефективності систем і діяльності компанії в цілому, що дозволяють оптимізувати всі етапи операційної діяльності [12].

Знання орієнтована система дозволяє керувати ризиками буріння шляхом прогнозування нештатних ситуацій. Якість прогнозу залежить від сучасності інженерних методів и підходів, тобто методів що враховують прецеденти на бурових майданчиках. Симуляція технологічних процесів дозволяє персоналу виявляти і попереджувати на ранній стадії ускладнення при бурінні і експлуатації, і забезпечує досягнення оптимальної продуктивності свердловини.

За оцінками експертів, міждисциплінарний інформаційний підхід до буріння і будівництва забезпечує зниження витрат на усунення аварійних ситуацій, що призведе до зниження загальної вартості будівництва свердловин і добувається продукту від 5 до 25% від початкових витрат.

Одна з цілей моделювання технологічних процесів запобігання ускладнень і аварійних

ситуацій в процесі будівництва нафтових і газових свердловин - це кратне скорочення витрат будівництва високотехнологічних свердловин. Упровадження системи, що забезпечує запобігання ускладнень і аварійних ситуацій в процесі будівництва нафтових і газових свердловин дозволить досягти синергетичного ефекту від обробки великих обсягів геоданих і їх обробки, інтерпретації та прийняття рішень методами штучного інтелекту в режимі реального часу.

Основою оптимізації процесів є інтеграція окремих апробованих рішень в інтелектуальний технологічний комплекс, що забезпечує якості прийнятих рішень управління на базі реальних параметрів родовища і використання геолого-технологічної інформації, безперервного аналізу ефективності керуючих впливів і оцінки ризиків, моделювання з урахуванням особливостей технологічних особливостей об'єкта.

Комплексне застосування цифрових технологій і алгоритмів як основи оптимізації витрат забезпечує можливість безаварійного управління об'єктами будівництва і експлуатації, зниження впливу людського фактору і компетенцій, збільшення ефективності інвестиційних вкладень, забезпечує продовження термінів рентабельної експлуатації в складних умовах і вимогах.

Виробничу систему слід розглядати як ієрархічно структуровану систему, що дає гнучкий та рівномірний спосіб моделювання всіх рівнів ієрархії виробничої системи.

Для розробки комплексної стратегії та рішень, щоб експертні системи та технології, засновані на знаннях, мали значний вплив, вони повинні мати підтримку та відповідати архітектурі CIM (computer-integrated manufacturing). Архітектура CIM - це структура інформаційних систем, яка дозволяє промисловим підприємствам інтегрувати інформаційні та бізнес-процеси, вона досягає цього шляхом встановлення напрямку інтеграції; та визначивши інтерфейси між користувачами та постачальниками цієї інтеграційної функції.

Наступна спрощена схема представляє типову архітектуру інтелектуальної автоматизації технологічних процесів буріння з посиленням на піраміду CIM (на піраміду

Інструменти, методи та методології, поєднані з інтегрованим штучним інтелектом, співпрацюючою експертною системою, розподіленими оболонками рішень для штучного інтелекту та критичним для часу ШІ є центральними для їх інтелектуального рішення. Більше того, загальна парадигма міркувань є поширеною моделлю для багатьох вертикальних ринкових застосувань. Ця модель міркувань є інтелектуальним циклом міркувань (рис.4).

Основою підвищення якості управління та алгоритмічного формування керуючих впливів в нафтогазових системах є повторюваний корекційний цикл «Великі геоданих - Моделювання - Інтегроване управління - Зростання вартості основних активів». Застосування ШІ дозволяє не тільки оптимізувати вартість будівництва при бурінні і облаштуванні окремих свердловин, а й забезпечити підвищення рівня видобутку нафти і газу, знизити втрати, здійснивши запобігання аварій.[1]

При побудові інтелектуального рішення розглядаємо чотири фази.

Перший етап - це етап набуття знань. На цьому етапі оболонка рішення, засобами форм, запитань та інші механізмів формують інформаційну основу. Це забезпечується створенням конфігурації, структури даних, цілей, правил та ключових значень параметрів.

Після завершення фази набуття знань система може вступити в цикл розумних міркувань. Цей цикл призначений для керування даними та асинхронності.

На другій фазі циклу додаток, заснований на знаннях, намагається визначити необхідність чогось робити. База знань повинна керуватися даними та здатна зосередити свою увагу, враховуючи стан вирішення проблеми та те, що відбувається в цілому в проблемному середовищі.

Після завершення цього етапу база знань або визначила або не визначила необхідність щось робити, а також ознаки та характеристики проблеми. Якщо вона визначила необхідність щось робити, база знань переходить на третю фазу функціонування. На цьому етапі база знань розробляє стратегію та тактику для вирішення проблеми, яка була з'ясована на етапі ідентифікації. У циклі розумних міркувань основу можна розглядати в інтелектуальному

сенсі як базу знань, що складається з ряду фундаментальних методів для певної галузі. На третьому етапі фаза знань приймає проблему, яка була виявлена на другому етапі, та аналізує її на основі своєї бази знань методологій для вирішення конкретної області. Важливо, щоб на цій фазі база знань була здатна розробляти стратегії та тактики, що представляють собою гібриди та комбінації будь-яких цікавих методів, що моделюються. Найчастіше інтелектуальне рішення проблеми - це не якась проста ортогональна методологія, а скоріше гібрид фундаментальних методів. На завершення третього етапу циклу розумних міркувань база знань сформулювала стратегію та тактику вирішення проблеми та її атрибутів, які були визначені на другому етапі.

На четвертому етапі застосування бази знань вживає відповідних дій на основі стратегії та тактики, сформульованих на третьому етапі.

Важливо розуміти, що цей розумний цикл міркувань не є суто циклічним, послідовним циклом. Ідентифікація необхідності щось робити може мати місце, коли база знань вживає заходів щодо попередньої проблеми. Цикл розумних міркувань призначений для передачі топології на відміну від остаточної послідовності міркувань.

При цьому значно трансформується і сам технологічний цикл управління процесом видобутку, який формується інформаційним циклом «Вимірювання - Корекція - Контроль - Прогноз - Вплив» з урахуванням реалізації прийнятих раніше критеріїв. Комплексне застосування цифрових технологій і алгоритмів як основи оптимізації витрат забезпечує можливість безаварійного віддаленого управління об'єктами будівництва і експлуатації, зниження впливу людського фактору і компетенцій, збільшення ефективності інвестиційних вкладень, забезпечує продовження термінів рентабельної експлуатації в складних умовах і вимогах.

На рис. 4 наведена прийнята в проекті розробки порівняльна модель ідентифікації закономірностей і класифікації ускладнень для виявлення нештатних ситуацій за допомогою навчальних алгоритмів, аналізу розподілу і сегментації параметрів процесу буріння на підставі одержуваних геолого-технологічних даних.



Рисунок 4 – Модель ідентифікації закономірностей (цикл розумних міркувань)



Рисунок 5 – Модулі, що співпрацюють в інтелектуальному додатку

В архітектурному плані слід розглядати реалізацію циклу розумних міркувань як складену з ряду концентричних шаруватих систем (рис. 5). Внутрішня система являє собою високопродуктивне, повністю налаштоване ядро часу виконання, яке завжди здатне вжити критично важливих для часу дій на основі поточної найкращої оцінки речей, що потрібно зробити, враховуючи поточне середовище. Зовнішній шар складається з інтелектуального компонента міркувань, який намагається з'ясувати, як змінити ядро виконання.

Запропонований підхід експертного налаштування значною мірою спирається на концепцію інтегрованого штучного інтелекту.

Експертний компонент ШІ використовується для виявлення необхідності налаштування та вирішення того, який метод настройки застосовувати з урахуванням ситуації, пошуку, розпізнавання шаблонів, навчання, виправдання та пояснення тощо.

Оптимізація організації даних спрощує та підвищує ефективність роботи експертної системи оцінюючи дані в залежності від обставин. Цей підхід, застосовується до систем, в яких параметри налаштування, є функціями вимірюваних змінних, таких як рівень або температури. Завдяки апріорній специфікації графіків параметрів, вивченню методики щодо графіків параметрів з часом, експерт система

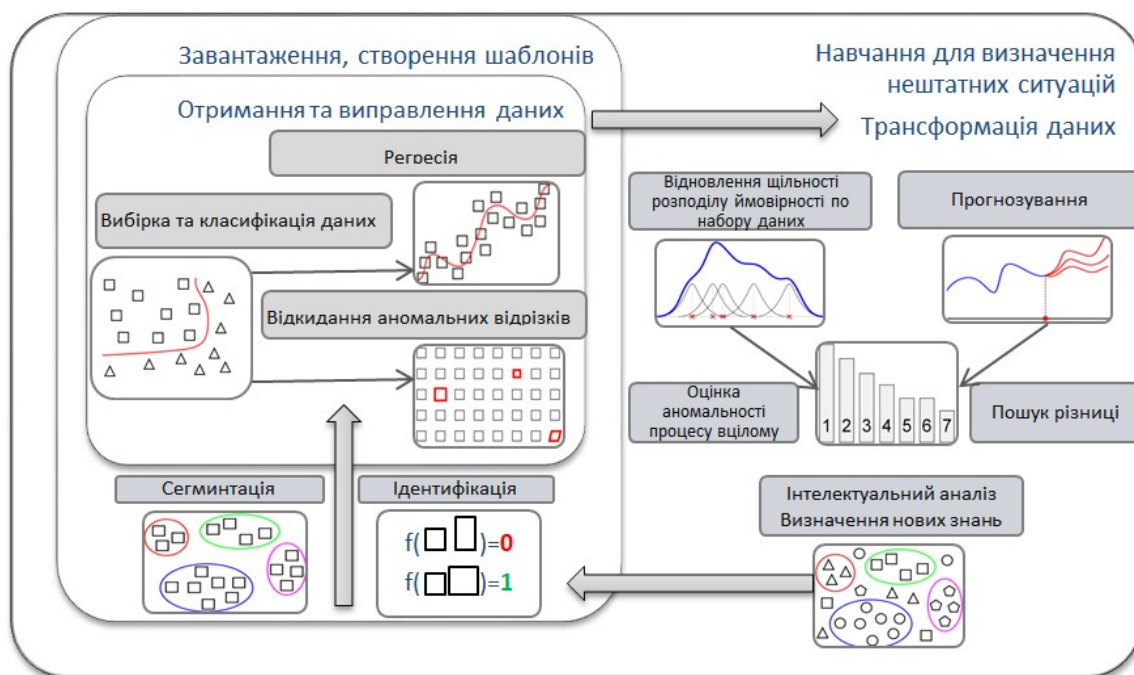


Рисунок 6 – Структурна схема застосування методів машинного навчання при опрацюванні даних з метою прийняття рішень

повинна мати змогу міркувати і використовувати константи налаштування, які застосовуються в певних діапазонах експлуатації середовища установки на деяких структурах управління.

Традиційні обчислювальні середовища, такі як РС, є ідеальною архітектурною та реалізаційною платформою для інтелектуального середовища моделювання. Вони забезпечують потужне програмне забезпечення пропозиції продуктів, а також важливі засоби розподіленої комунікації. У галузі технологій реляційних баз даних вони мають основу для стабільної архітектури зберігання для бази знань інтелектуального середовища моделювання. Побудувавши інтелектуальне середовище моделювання на традиційному комп'ютері в поєднанні з пропонованою структурою реляційної бази даних, можна створити надзвичайно гнучку, інтегровану та розширювану інтелектуальну систему автоматизації. Зберігання всіх об'єктів, пов'язаних із поточними результатами моделювання, у реляційній базі даних забезпечує міцну основу для розуміння процесів у всій архітектурі СІМ. Структурна схема застосування методів машинного навчання при

опрацюванні даних, виявленні і прогнозуванні позаштатних ситуацій, прийняття рішень приведена на рис. 6.

Оскільки множина зразків рішень на основі знань стає дуже великою, зростає і реальність створення ідеального комбінованого підходу для адаптації. Організація та вдосконалення даних виявляються важливими компонентами ефективного керованого даними процесу [13].

Через складність та різноманітність вихідних даних процедура адаптації поділяється на два основні етапи:

I. Виправлення даних.

II. Попередня обробка даних.

На етапі виправлення даних аналізуються вихідні файли, що містять необроблені дані, і для кожної змінної будується правильне представлення. Після цього набір даних буріння підпорядковується набору правил та інструкцій, метою якого є виправлення помилок та невідповідностей, виявлених при уважному огляді кожного набору даних. Деякі з цих правил мають загальну дію для свердловин, тоді як деякі пристосовані до конкретних аномалій, виявлених лише в даних деяких конкретних свердловин.

На етапі попередньої обробки даних набори даних із фіксованими даними завантажуються та перетворюються з метою отримання корисних додаткових змінних (наприклад, для обліку наявності колон, або діяльності зі зміни ственду тощо). Після цього на перетвореному наборі даних виконується ряд перевірок узгодженості, щоб виявити, чи є в наборі даних залишкова помилка. Далі дані записуються у файл та надаються для подальших кроків аналізу.

Створення бази даних для симуляції процесу буріння передбачає виявлення множин, що характеризують ускладнення і нормальну роботу, виділення тестових навчальних вибірок, скорочення отриманих даних, стиснення та їх фільтрація. Дані буріння з різних джерел, формуються у підмножини.

- підмножина «Давачі» містить повний часовий ряд змінних, що відстежуються під час досліджуваних робіт на свердловині (тобто, від початку бурової діяльності або до її успішного завершення, або відмови через ускладнення).

- підмножина «Ускладнення» повідомляє про групу даних проблем, що виникли під час бурових робіт. Зокрема, прихоплення труби, які перелічені разом із мітками часу початку та розв'язання.

- підмножина «Колона» повідомляє дати та глибину початку операцій з встановлення колони.

- в підмножині «Літологія» перелічені глибинні тракти, пов'язані з певним літологічним складом.

- підмножина «Траєкторія» доповнює набір даних «Давачі», надаючи відносні координати бурового долота в деяких точках стовбура свердловини. Дуже корисно реконструювати траєкторію відхилених свердловин.

Перед операцією попередньої обробки вихідних даних необхідно встановити рівень фіксації цілісності даних. Підмножини даних бурових свердловин мають багато змінних, які пов'язані між собою логічними та/або математичними співвідношеннями, що безпосередньо впливає на їх потенційне використання на етапі моделювання та прогнозування. Аналіз підмножин показує, що необхідним є виправлення даних, щоб перетворити вихідні дані у відповідну форму для проведення обчислень.

Деякі з цих виправлень є загальними для кожної підмножини даних, і тому здійснюються системно (так само як для нових, майбутніх наборів даних). Інші є специфічними лише для цієї свердловини і виявляються при уважному вивченні часових рядів змінних кожної свердловиною. Вони можуть розглядатися як виправлення всіх невідповідностей та помилок, виявлених до цього часу під час аналізу, і є продуктом перевірок узгодженості, здійснених на етапі попередньої обробки даних.

Перевіряється надійність значення, яке використовується для позначення відсутнього значення з давачів замінюється на NaN (Not-a-Number), відсутні значення часових рядів заповнюються лінійною інтерполяцією між екстремумами, значення відсутнього значення глибини свердловини на певний момент, забезпечується шляхом прийняття мінімуму (або максимуму, відповідно до його ознаки) значення глибини проникнення долота.

Кодування міток часу, що з'являються в наборах даних узгоджуються згідно відповідного формату часового поясу Європа/Київ (GMT+2), ліквідується неузгодженість при переході на літній час чи навпаки.

Здійснюється перевірка знаку значення (додатний або від'ємний), невідповідні значення встановлюються на нуль.

Встановлюються фактичні значення параметрів буріння через взаємозв'язок інших параметрів, наприклад значення швидкості буріння встановлюється рівним нулю, коли показник проникнення долота не змінюється є постійним, оскільки, коли долото не бурить, швидкість проникнення дорівнює нулю за визначенням. Це не так у жодному з вихідних наборів необроблених даних.

Налаштовуються одиниці виміру, наприклад швидкість проникнення перетворюється в м/год. з мм/год.

При високій мінливості показників, оцінюється рівень шуму і згладжуються показники, наприклад показників швидкості проникнення при паузі в бурінні після початкової установки свердловини.

Після того, як цілісність даних забезпечена за допомогою модуля фіксації, наступним кроком є попередня обробка даних. Це передбачає вибір системи ознак подій,

перетворення даних відповідним чином для подання їх на вхід системі (виявлення значних підмножин, нормування, стандартизація), зокрема:

1. Визначення тривалості експлуатації обсадної колони. Діапазон експлуатації колони - це проміжок часу від початку дії колони (який доступний у наборі даних «Колона», хоча з певною невизначеністю щодо точного часу) до завершення, який визначає момент відновлення буріння. Така точка не відома заздалегідь, тому її потрібно обчислювати безпосередньо використовуючи дані підмножини «Давачі».

2. Обчислення змінних глибини свердловини. Ці змінні відображення стану свердловини, яка ще не захищена колоною. Це дуже важливо в випадку прогнозу ускладнень прихоплення, оскільки прихоплення труби трапляються поза обсаженою частиною стовбура свердловини, і ця інформація повинна бути включена до набору даних.

Іншими операціями, які виконуються на етапі попередньої обробки, є такі:

- Налаштування знаків змінних буріння. На самому початку етапу попередньої обробки знак змінних буріння регулюється, щоб мати негативні глибини.

- Перевірка узгодженості: Перелік перевірок узгодженості, який відображає спеціальні знання апріорні для конкретного параметру - чи мають змінні правильний знак і чи відповідає їх динаміка заздалегідь заданим мемам.

Остаточна версія попередньо оброблених та фіксованих даних трансформується для отримання корисних структур даних. Логічний підхід до рішення передбачає дискретну

інтерпретацію даних давачів за часом і за розмірами.

Отриманий набір даних має два індекси, один, який відображає глибину проникнення злиття, а інший - на час злиття. Таким чином, ми маємо значення давачів, агрегованих за двома різними осями. Враховуючи потрібну (глибину, час, особливість), тепер можна отримати всі дані давача, пов'язані з цим.

Таким чином розглядається три фази опрацювання даних:

1. Отримання: дані збираються із збережених даних давача свердловини для конкретної фази буріння.
2. Трансформація: дані опрацьовуються, агрегуються за глибиною.
3. Завантаження: перетворені дані завантажуються (зберігаються) у зручних структурах даних.

Однією з великих вимог, а також одним із потенціалів штучного інтелекту є здатність будувати системи, які можуть навчитися. Навчання - це важлива здатність знання-орієнтованої системи, яка вимагає здійснення вибору, організації та параметризації налаштування підходів у реальній системі. Методи навчання повинні мати можливість визначити, яких підходів до налаштування слід уникати на певних структурах управління.

Ключовим аспектом нової інженерії знань та підходу до організації проекту є наявність чіткої методології, за допомогою якої можна вибрати проблеми в галузі, які потрібно вирішити. Якщо не задати всіх вищезазначених питань, не можливо чітко зрозуміти глибину проблеми або вимоги до її вирішення.

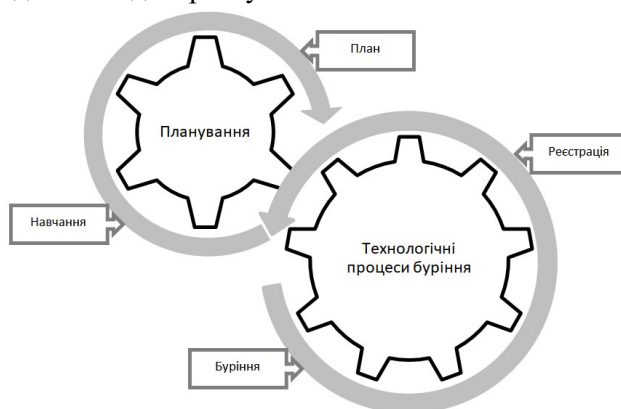


Рисунок 7 - Місце навчання в виробничому циклі процесу буріння

Будь-який процес є повторюваною послідовністю витрат часу та ресурсів для отримання результатів у всіх сферах застосування. Робочий процес будівництва свердловин - це безперервний цикл від планування свердловини до бурових робіт, де навчання включається в кожен цикл. З точки зору ймовірності, моменти для будь-якої діяльності, що починається і закінчується, є випадковими подіями на часовій шкалі. З кожною ітерацією плану, буріння, запису та вивчення циклу будівництва свердловин оптимальний рівень продуктивності стає все ближчим, оскільки він побудований на міцній основі, що підтримує загальний процес.

Застосування моделей дозволяє раціонально управляти ризиками, підвищувати якість і безпеку нафтогазових систем і за рахунок них бути успішними на ринку. Результати імовірнісного моделювання показали, що необхідна щільність становить близько 0,02%, тобто 2 дефекти (аномалії) на 10000 розглянутих операцій. До того ж доцільно зауважити, що оскільки щільність дефектів близько 1%, ймовірність міцності стабілізується на рівні 0,88.

На практиці застосування запропонованої моделі та методу дозволяє замовнику сформулювати більш обґрунтовані вимоги та технічні вимоги, розробнику впровадити їх раціонально, не витрачаючи витрачених коштів, а користувачеві максимально ефективно використовувати потенціал системи

Моделювання є основою застосування штучного інтелекту, є передумовою для подальшої інтелектуальної автоматизації.

Необхідною умовою побудови інтелектуальних додатків є точний, сучасний та корисний опис базових компонентів процесу. Цей опис є ключовим для подальших інтелектуальних міркувань на основі бази знань для формулювання рішень таких проблемних областей, як контроль та оптимізація, статистичний контроль процесів, планування та управління сигналізацією.

В побудованій моделі при достатній кількості структурних компонентів можна виконувати передбачення невідомих фактів і знань шляхом перенесення їх з одних об'єктів на інші, з огляду на подібність між цими об'єктами.

Метою моделювання є повторне відстеження процесу буріння та відображення стану свердловини раз за разом. Важливою вимогою при створенні інтелектуального середовища є достатній обсяг даних, в рамках даного дослідження про нестандартні ситуації, для коректного навчання системи. В рамках дослідження ця вимога може бути забезпечена засобами повномасштабного бурового тренажера. Симуляція технологічних процесів буріння з використанням бурового тренажера дозволяє відтворити процеси що відбуваються в реальних умовах буріння. Моделювання ускладнень засобами тренажера забезпечує необхідний обсяг даних для здійснення дослідження.

В області інтелектуального контролю та оптимізації очевидно, що ключовим компонентом є модель технології управління та топології. Інтелектуальне середовище у вигляді тренажера, здатне покращувати точність описів основних процесів і здійснювати параметричне оптимальне управління установкою буріння. У всіх важливих сферах контролю та управління процесом необхідність у точних та сучасних моделях має першорядне значення.

В обчислювальному плані симулятор являє собою програмний модуль, що забезпечує при кожному зверненні до нього прорахунок нового стану технологічного процесу, що моделюється, з урахуванням динамічної пам'яті об'єкта і всіх впливів, вироблених учасниками тренінгу (операторами і інструктором) з моменту попереднього розрахунку. При цьому крім чималої кількості «вимірюваних» змінних (витрат, температур, тисків, рівнів і ін.) прораховується і величезне число «внутрішніх» змінних [14].

Недостатність прецедентів або їх неадекватність становить ризик для відповідності навчання інтелектуальної системи, тому для побудови знання-орієнтованої системи доцільним є використання інструментів класу «Бурові тренажери». Характеристики тренажеру Drillsim5000 забезпечують моделювання інженерно-технічних, виробничо-експлуатаційних та техніко-економічних показників технологічних комплексів з урахуванням фактичного стану нафтогазових об'єктів.

Запропонована в дослідженні реалізація не успадковується безпосередньо від Drillsim5000, але побудовано частково на основі проекту Drillsim5000. Тренажер - це інструментарій для отримання необхідного обсягу даних для розробки та порівняння алгоритмів навчання.

Функціональні можливості тренажера DrillSim-5000 дозволяють зробити модель свердловини, максимально наближену до реально пробуреної свердловини. Припускаємо, що необхідний рівень точності можна досягти збільшенням кількості ітерацій в моделюванні. Обмеження полягають у кількості даних, які можуть бути використані.

Аналіз якості та принципів отримання даних щодо технологічних процесів буріння визначає порядок, в якому навчається знання-орієнтована система і є визначальним фактом для можливості обробки серій подій, що мають прецеденти в минулому.

Висновки

Проведено класифікацію ускладнень та аварій при здійсненні технологічних процесів з позиції аспекту отримання даних. Визначено фази циклу обробки даних буріння з інтеграцією методів ШІ у співвідношенні до циклу процесу буріння.

Визначено оптимальну структуру бази даних вхідної геолого-технічної інформації, згруповано дані по підмножинам при побудові системи з використанням методів ШІ.

Виявлено ряд загальних проблемних питань у запровадженні технологій штучного інтелекту в нафтогазовій галузі і визначено основні напрямки щодо їх вирішення в рамках застосування бурових тренажерів і вдосконалення методів потокової обробки великих обсягів геолого-геофізичних і технологічних даних.

Отримані результати показали, що якість комплексу оперативних технологічних і геолого-геофізичних даних, що одержуються і використовуються в процесі буріння свердловин, є основною технічною та інформаційною проблемою для своєчасного прогнозування і попередження аварій і ускладнень.

Недостатність інформативності при побудові знання-орієнтованої системи, пропонується розв'язувати шляхом отримання даних засобами тренажера, що забезпечить ефективне навчання інтелектуальної системи.

Список використаних джерел

1. Еремін Н.А., Архипов А.И. Сарданашили О. Н. Столяров В. Е. Цифровые технологии строительства скважин Digital well-building technologie Деловой журнал Neftegaz.RU. № 4 2020

2. Дмитриевский А.Н., Еремін Н.А., Столяров В.Е. (2020b). Роль информации в применении технологий искусственного интеллекта при строительстве скважин для нефтегазовых месторождений. Научный журнал Российского газового общества, 3(26). С. 22–37

3. М.М. Хасанов, Д.О. Прокофьев, О.С. Ушмаев, Б.В. Белозеров, Р.Р. Гильманов, А.С. Маргарит Перспективные технологии Big Data в нефтяном инжиниринге: опыт компании «Газпром нефть». *Нефтяное хозяйство*, 2016, № 12. С. 76 – 79

4. Столяров В.Е., Еремін Н.А., Еремін А.Н., Басниева И.К.. Цифровые газовые скважины: состояние и перспективы. *Нефтепромысловое дело*. 2018 г., № 7, С. 48 – 55, DOI: 10.30713/0207-2351-2018-7-48-55.

5. Гобир Л.М., Вовк Р. Б., Потеряйло Л. О., Шекета В. І. Ймовірнісна оцінка результатів інтерпретації даних та параметрів геофізичних досліджень. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. №3(68). С. 46-59

6. Дмитриевский А.Н., Дуплякин В.О., Еремін Н.А., Капранов В.В. Нейросетевое моделирование в системах предупреждения осложнений и аварийных ситуаций при строительстве нефтяных и газовых скважин. *Давачі и системи*. №12.2019. С.21 – 27

7. Разработка процесса принятия решений при моделировании и проектировании месторождений углеводородов на основе вывода по прецедентам. Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы VIII Международной научно-технической конференции; отв. ред. О. Н. Кузяков. Тюмень: ТИУ, 2019. 324 с. ISBN 978-5-9961-2225-7 .

8. Кабышев Б.П., Шпак П. Ф., Билык Л. Д. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой западины. Нефтегазоносность. Киев: Наукова думка, 1989. 204 с.

9. Функциональные возможности полномасштабного бурового тренажера DrillSim-5000 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.gubkin.ru/faculty/oil_and_gas_development/chairs_and_departments/drill_center/DrillSim-5000.php.

10. Крыгина А.С, Иванов Д.Б., Шарафиева З.Ф. Актуальные проблемы экологии добычи, транспорта и переработки нефти. материалы VII Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. 2018. С. 179

11. Еремин А.Н. Новая классификация цифровых и интеллектуальных скважин. Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области, № 2 (24) 3, 2016. С. 2 – 4

12. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. (2020). Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. Georesursy = Georesources, 22(3),pp.87–96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>

13. Потеряйло Л.О., Процюк В. В., Кравців К. І. Використання CBR при реалізації інженерних рішень систем класу «Бурові тренажери». VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», Дніпро, 4 листопада 2020р. Дніпро, 2020. С.146-148

14. Потеряйло Л.О., Процюк В. В., Кравців К. І. Моделювання імітаційної моделі керування процесами буріння на основі прецедентів. Всеукраїнська наук.-практ. конф. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» - ІТОПІ-2020. Івано-Франківськ, 8 жовтня 2020.

Referenses

1. Eremyn N.A., Arkhypov A.Y. Sardanashvyly O. N. Stoliarov V. E. Tsyfrovye tekhnologyy stroytelstva skvazhyn Digital well-building technologie Delovoi zhurnal Neftegaz.RU. № 4 2020

2. Dmytryevskiy A.N., Eremyn N.A., Stoliarov V.E. (2020b). Rol ynfomatsyy v pryumenenyy tekhnologyy uskusstvennoho yntellekta pry stroytelstve skvazhyn dlia neftehazovykh mestorozhdeniy. Nauchnyi zhurnal Rossyiskoho hazovoho obshchestva, 3(26). S. 22–37

3. M.M. Khasanov, D.O. Prokofev, O.S. Ushmaev, B.V. Belozarov, R.R. Hylmanov, A.S. Marharyt Perspektivnye tekhnologyy Big Data v neftianom ynzhyrynne: opyt kompanyy «Hazprom nef». Neftianoe khoziaistvo, 2016, № 12. С. 76 – 79

4. Stoliarov V.E., Eremyn N.A., Eremyn A.N., Vasnyeva Y.K.. Tsyfrovye hazovyye skvazhyny: sostoianye y perspektivy. Neftepromyslovoe delo. 2018 h., № 7, С. 48 – 55, DOI: 10.30713/0207-2351-2018-7-48-55.

5. Hobyр L.M., Vovk R. B., Poteriailo L. O., Sheketa V. I. Ymovirnisna otsinka rezultativ interpretatsii danykh ta parametriv heofizychnykh doslidzhen. Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. 2018. №3(68). S. 46-59

6. Dmytryevskiy A.N., Dupliakyn V.O., Eremyn N.A., Kapranov V.V. Neurosetevoye modelyrovanye v systemakh preduprezhdeniya oslozhneniy y avariynykh sytuatsiy pry stroytelstve neftiannykh y hazovykh skvazhyn. Davachi y systemy. №12.2019. S.21 – 27

7. Razrabotka protsessa pryinyatiya resheniy pry modelyrovanyu y proektyrovanyu mestorozhdeniy uhlevodorodov na osnove vывoda po pretsedentam. Novyye ynfomatsyonnyye tekhnologyy v neftehazovoi otrasly y obrazovanyu: materyaly VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsyy; otv. red. O. N. Kuziakov. Tiumen: TYU, 2019. 324 s. ISBN 978-5-9961-2225-7 .

8. Кабышев В.П., Шпак П. Ф., Былык Л. Д. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой западины. Нефтегазоносность. Киев: Наукова думка, 1989. 204 с.

9. Funktsyonalnye vozmozhnosti polnomasshtabnoho burovoho trenazhera DrillSim-5000 [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: https://www.gubkin.ru/faculty/oil_and_gas_development/chairs_and_departments/drill_center/DrillSim-5000.php.

10. Крыгина А.С, Иванов Д.Б., Шарафиева З.Ф. Актуальные проблемы экологии добычи, транспорта и переработки нефти. материалы VII

Mezhdunarodnoi konferentsyy s elementamy nauchnoi shkoly dlia molodezhy. 2018. S. 179

11. Eremyn A.N. Novaia klassyfykatsiia tsvyrovyykh y yntellektualnykh skvazhyn. Avtomatyzatsiia y IT v neftefazovoi oblasti, № 2 (24) 3, 2016. S. 2 – 4

12. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. (2020). Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and solutions. *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp.87–96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>

13. Poteriailo L.O., Protsiuk V. V., Kravtsiv K. I. Vykorystannia CBR pry realizatsii inzhenernykh rishen system klasu «Burovi trenazhery». VI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system», Dnipro, 4 lystopada 2020r. Dnipro, 2020. S.146-148

14. Poteriailo L.O., Protsiuk V. V., Kravtsiv K. I. Modeliuvannia imitatsionnoi modeli keruvannia protsesamy burinnia na osnovi pretsedentiv. Vseukrainska nauk.-prakt. konf. «Informatsiini tekhnolohii v osviti, tekhnitsi ta promyslovosti» - ITOTP-2020. Ivano-Frankivsk, 8 zhovtnia 2020.

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-93-102

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ОСНОВІ МЕТОДУ СТРУКТУРНИХ СХЕМ

**В. С. Борин, М. І. Козутяк, М. М. Кучак*

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. +380 (342) 72-71-67, e-mail: kafatp@ukr.net

Проведено аналіз сучасних методів графічного зображення систем автоматичного регулювання (САР). Графічний аналог оперативного управління є цінним на етапі пізнання характеру і логіки зв'язку між елементами управління, зручний на етапі перетворення управління, що змінюють наочними структурними перетвореннями, і створює основу для вирішення рівнянь сучасними методами машинної автоматики. Графічний аналог оперативного управління відображає систематизацію математичних операцій перетворення сигналу, що є основним недоліком застосування цього методу в інженерній практиці, так як він немає фізичного розуміння реальних ланок системи. Для даного етапу порівнювали наступні методи графічного зображення (САР): «Метод функціональних схем», - відображає фізичні зв'язки між реальними елементами САР що визначають функціональні і енергетичні перетворення сигналів. Цей метод застосовують на першому етапі аналізу САР. «Метод структурних зображень», - показує графічні зображення системи диференціальних рівнянь, що описують дану САР, де елементи не відображають реальних ланок ні об'єктів, ні математичних еквівалентних реальних ланок. «Метод структурних схем». Під методом структурних схем слідує розуміння сукупності динамічних ланок САР, що відображають в найбільш зручній формі взаємозв'язків, умовами передачі і перетворення сигналів управління і регульованих величин між ними. Основна перевага застосування структурних схем закладається в тому, що вони дозволяють просто оцінити суттєві зв'язки між елементами в САР, а отже, і вплив параметрів на перехідний процес. Представлено переваги та недоліки методу структурних схем. Необхідно підкреслити, що структурна схема на основі типових динамічних ланок повинна розглядатися не як ілюстрація до рівняння, що описує САР, а як досить зручний і наочний спосіб складання рівнянь системи по рівняннях окремих ланок. Значна увага приділена застосуванню структурних схем для зображення системи механічних ланок. Докладно представлені способи з'єднання механічних ланок. Наведено загальне правило побудови структурної схеми n – масової механічної системи.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, функціональна схема, структурне зображення, структурна схема, динамічна ланка, механічна ланка, рядна система, багаторядна система.

Проведен анализ современных методов графического изображения систем автоматического регулирования (САР). Графический аналог оперативного управления является ценным на этапе познания характера и логики связи между элементами управления, удобен на этапе преобразования управления, меняют наглядными структурными преобразованиями, и создает основу для решения уравнений современными методами машинной автоматики. Графический аналог оперативного управления отражает систематизацию математических операций преобразования сигнала, является основным недостатком применения этого метода в инженерной практике, так как у него нет физического понимания реальных звеньев системы. Для данного этапа сравнивали следующие методы графического изображения (САР): «Метод функциональных схем», - отражает физические связи между реальными элементами САР определяющие функциональные и энергетические преобразования сигналов. Этот метод применяют на первом этапе анализа САР. «Метод структурных изображений», - показывает графические изображения системы дифференциальных уравнений, описывающих данную САР, где элементы не отражают реальных звеньев ни объектов, ни математических эквивалентных реальных звеньев. «Метод структурных схем». Под методом структурных схем следует понимание совокупности динамических звеньев САР, отражающие в наиболее удобной форме взаимосвязей, условиями передачи и преобразования сигналов управления и регулируемых величин между ними. Основное преимущество применения структурных схем закладывается в том, что они позволяют просто оценить существенные связи между элементами в САР, а следовательно, и влияние параметров на переходный процесс. Представлены преимущества и недостатки метода структурных схем. Следует отметить, что структурная схема на основе типовых динамических звеньев должна рассматриваться не как иллюстрация к

уравнение, описывающее САР, а как довольно удобный и наглядный способ составления уравнений системы по уравнениям отдельных звеньев. Значительное внимание уделено применению структурных схем для изображения системы механических звеньев. Подробно представлены способы соединения механических звеньев. Приведено общее правило построения структурной схемы n - массовой механической системы.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, функциональная схема, структурная изображения, структурная схема, динамическая звено, механическая звено, однорядная система, многорядная система.

The analysis of modern methods of graphic representation of systems of automatic regulation (SAR) is carried out. The graphical analogue of operational control is valuable at the stage of learning the nature and logic of communication between control elements, convenient at the stage of control transformation, changing visual structural transformations, and creates a basis for solving equations by modern methods of machine automation. The graphical analogue of operational control reflects the systematization of mathematical operations of signal conversion, which is the main disadvantage of this method in engineering practice, as it has no physical understanding of the real parts of the system. For this stage, the following graphic imaging (SAR) methods were compared: "Functional circuit method" - reflects the physical relationships between the real elements of SAR that determine the functional and energy transformations of signals. This method is used in the first stage of SAR analysis. "Structural imaging method" shows graphical representations of a system of differential equations that describe a given SAR, where the elements do not reflect the real parts of either objects or mathematically equivalent real parts. "Method of structural schemes". . The method of structural diagrams follows the understanding of a set of dynamic units of the SAR, reflecting in the most convenient form of the relationship, the conditions of transmission and conversion of control signals and adjustable values between them. The main advantage of the use of structural schemes is that they allow you to simply assess the significant relationships between the elements in the SAR, and hence the impact of parameters on the transition process. The advantages and disadvantages of the method of block diagrams are presented. Considerable attention is paid to the use of structural diagrams to depict the system of mechanical components. Methods of connecting mechanical links are presented in detail. The general rule of construction of the structural scheme of n - mass mechanical system is given.

Key words: automatic control system, functional scheme, structural image, structural diagram, dynamic link, mechanical link, multiple system, multi-system.

Вступ

Система автоматичного регулювання (САР) складається з елементів, що взаємодіють між собою. Через елементи системи управління та по лініях зв'язку проходять керуючі сигнали і впливи, викликаючи зміни регульованих величин. Обернені зв'язки можуть бути як природніми, так і штучними. Природні обернені зв'язки виникають через природні елементи, що складають систему, або через способи з'єднання цих елементів і не можуть бути виключені з системи, а штучні вводяться для корекції характеристик елементів системи або самої системи для отримання необхідних показників регульованого процесу.

Аналіз умов проходження сигналів через елементи системи управління являється одним із фундаментних питань теорії автоматичного управління. При цьому виявляється ступінь впливу обернених зв'язків на показники системи, можливість ідеалізації системи для розрахунків шляхом відкидання природних зв'язків і спрощення фізичних елементів, а

також умови введення штучних зв'язків і вибір їх необхідних параметрів.

Задача аналізу проходження і перетворення сигналу в системі в теорії САР вирішується декількома способами, що мають одну і ту ж вихідну базу – аналітичне описання суті процесів, що відбуваються, в виді системи диференціальних рівнянь.

Вирішивши диференціальне рівняння системи, можна знайти характер зміни регульованої величини. Для знаходження диференціального рівняння системи необхідно мати диференціальне рівняння для окремих ланок, ділянок. Вирішенням системи отриманих диференціальних рівнянь, виключаючи проміжні змінні, можна отримати диференціальне рівняння системи, хоча це є достатньо важким процесом.

Метод, що використовує вхідну систему керування, відноситься до найбільш ранніх і основних методів теорії регулювання. Однак він втратив наочність в практичних інженерних розрахунках і користується великою працею.

Використання цього методу в інженерній практиці потребує вільного володіння

математичним апаратом як класичної форми запису диференційних рівнянь, так і алгебраїчної. Крім того, при використанні цього методу втрачається фізичне уявлення про природі досліджуваних фізичних елементів.

Постановка задачі дослідження

Як показав досвід проектних і налагоджуваних робіт приводів підйомних установок великої продуктивності, коли необхідно, не втрачаючи фізичного уявлення про реальні ланки, складає чітке уявлення про вплив параметрів обернених зв'язків, цей метод практично не застосовується.

В даний час існує наступні методи графічного зображення САР при їх аналізі. Метод функціональних схем відображає фізичні зв'язки між реальними елементами САР, що визначають функціональні і енергетичні перетворення сигналів. Блоками, ланками такої схеми являється реальні об'єкти або вузли. Цей метод застосовують на першому етапі аналізу САР.

Метод структурних зображень показує графічні зображення системи диференційних рівнянь, що описують дану САР спуско-підйомної установки, де елементи не відображають реальних ланок ні об'єктів, ні математичних еквівалентних реальних ланок.

Графічне зображення системи диференційних рівнянь дає наочність в розумінні послідовного використанні математичних операцій, що спрощує вирішення управління на ЕОМ.

Графічний аналог оперативного управління є цінним на етапі пізнання характеру і логіки зв'язку між елементами управління, зручний на етапі перетворення, що змінюють наочними структурними перетвореннями, і створює основу для вирішення рівнянь сучасними методами машинної автоматки.

Графічний аналог оперативного управління відображає систематизацію математичних операцій перетворення сигналу, що є основним недоліком застосування цього методу в інженерній практиці, так як він немає фізичного розуміння реальних ланок системи.

Графічний аналог оперативного управління також абстрагований, як і його вихідна система управління. Крім того, в деяких випадках із системи диференціальних рівнянь важко

виділити суттєві і несуттєві зв'язки і провести групування елементів, щоб представити їх комбінацією типових ланок.

Під методом структурних схем слідує розуміння сукупності динамічних ланок САР, що відображають в найбільш зручній (інженерній) формі взаємозв'язків, умовами передачі і перетворення сигналів управління і регульованих величин між ними.

Типові динамічні ланки відповідають реальним фізичним ланкам системи регулювання спуско-підйомної установки буринних труб. В цьому випадку зберігається безпосередня відповідність між ланками фізичної моделі і її структурним зображенням. Типова ланка тільки в відповідному частотному діапазоні відповідає реальній ланці. Це положення виходить із передумови ідеалізації системи, яка точно описується математично і приблизно характеризує реальні ланки системи в заданому діапазоні частот сигналів.

Типові ланки є направленими ланками, тобто перетворює сигнал в одному напрямку. В цьому випадку виконується умова незалежності передавальних функцій окремих ланок від їх з'єднання.

Необхідно підкреслити, що структурна схема на основі типових динамічних ланок повинна розглядатися не як ілюстрація до рівняння, що описує САР спуско-підйомної установки, а як досить зручний і наочний спосіб складання рівнянь системи по рівняннях окремих ланок.

При складанні структурних схем приймають наступні обмеження для динамічних ланок: по-перше, воно повинно бути направленою дією; по-друге, динамічні ланки, а значить і САР спуско-підйомної установки, повинне описуватися лінійними або лінеаризованим диференційним рівнянням.

Перша умова витікає із головної ідеї уявлення структурних схем. Друге - із умови можливості перетворення структурних схем. Всі види перетворення можна звести до наступного: 1) переміщення вузла сумування через розгалуження; 2) переміщення ланки через розгалуження; 3) переміщення ланки через вузол сумування; 4) переміщення ланки через другу ланку.

Для лінійних систем виконані всі види перетворення. Для нелінійних систем в силу недотримання принципу суперпозиції

(накладання) і комунікативному принципу можна виконати тільки 1-ше і 2-ге перетворення.

Тому застосування методу структурних схем для нелінійних систем не дає того ж результату, що для лінійних: в даному випадку неможливо отримати передавальну функцію системи.

Однак в більшості випадків, застосовуючи метод припасування, можливо не лінійність представити як суму лінійних ланок з різними коефіцієнтами передачі і ланками затримки.

Метод структурних схем розвинений для дослідження лінійних САР, об'єкти яких можуть бути представлені типовими динамічними ланками.

В структурній схемі, що складається з динамічних ланок, велике значення надається способам з'єднання ланок, як основному засобу побудови структурних схем.

Використовуючи різні способи з'єднання типових ланок, можна, комбінуючи окремі ланки, виявити суттєві зв'язки між ними. Особливу увагу слід приділити оцінці впливу несуттєвих зв'язків, які є в елементах, але можуть не враховуватися в структурних схемах.

Основна перевага застосування структурних схем закладається в тому, що вони дозволяють просто оцінити суттєві зв'язки між елементами в САР спуско-підйомної установки, а отже, і вплив параметрів на перехідний процес.

Це особливо наочно проявляється при проведенні пошукових робіт з ціллю вияснити структури системи для подальшого аналізу і синтезу. В цьому випадку не явна степінь впливу кожного оберненого зв'язку і як результат – неможна прийняти припущення, що спрощує дослідження.

При застосування в таких випадках звичайних методів знаходження перехідної функції по вихідній системі диференціальних рівнянь виникає необхідність в багатократному рішенні цієї системи при варіації параметрів.

Метод структурних схем полегшує математичне перетворення рівнянь, що описують поведінку елементів і системи в цілому; полегшує отримання передавальної функції для будь-яких двох величин системи шляхом простої згортки структурної схеми.

Стосовно до окремих ланок структурні методи розкривають внутрішню структуру кожної ланки, що сприяє більш явнішому розумінню істини процесів, що в них протікають, і дозволяє правильно підійти до покращення характеристик ланок налагодженням додаткових зовнішніх зв'язків.

Стосовно до системи в цілому, структурні методи дозволяють встановити раціональність структурної схеми з точки зору основної задачі, що покладена на неї, і компенсації діючих на систему збурень.

Структурний метод знайшов широке застосування в практиці моделювання на ЕОМ і полягає в тому, що досліджувана система спуско-підйомної установки набирається по окремих ланках, що відповідають відповідним ланкам структурної схеми в досліджуваній схемі. Набір задач по структурній схемі моделі дає явне уявлення про відповідності величин і параметрів в досліджуваній системі і моделі, що зручно при підборі коректувальних зв'язків.

Такий спосіб дозволяє здійснювати набір задач з поєднанням невеликого числа елементів моделі, відповідних типів ланок направленої дії, з яких зазвичай складається структурна схема САР спуско-підйомної установки буринних труб.

Недоліком застосування структурних схем є та обставина, що коли складена структурна схема елемента або всієї системи, повністю втрачає уявлення про проходження сигналів всередині окремих елементів.

В деяких випадках складання структурної схеми пов'язано з великими труднощами і може бути зроблено тільки на основі детального аналізу вихідних диференціальних рівнянь системи регулювання. В цьому випадку структурна схема не полегшує знаходження основного рівняння системи, однак вона становиться досить цінною, так як на ній в наглядній формі представлені всі вузли досліджуваної системи і всі існуючі між ними зв'язками. Це виявилось корисним у всіх подальших дослідженнях.

На (рис. 1) показана функціональна схема простої системи, що складається з приводного двигуна і робочої машини, робочий орган якого з'єднаний з приводом двигуна за допомогою пружного елемента.

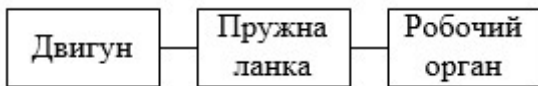


Рисунок 1 – Функціональна схема двигун-робоча машина

Така проста схема для приводного двигуна постійного струму з незалежним збуренням може бути представлена ідеалізованою фізичною моделлю (рис.2), для якої справедлива система рівнянь:

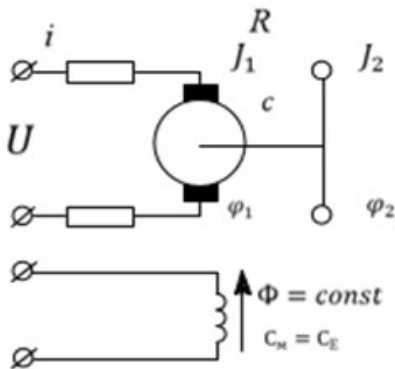


Рисунок 2 – Ідеалізована фізична модель

$$\begin{aligned} J_1 p^2 \varphi_1 + c(\varphi_1 - \varphi_2) &= i c_M; \\ J_2 p^2 \varphi_2 - c(\varphi_1 - \varphi_2) &= 0; \\ U &= iR + c_e p \varphi_1. \end{aligned}$$

де φ, i, U – функції оператора $p = \frac{d}{dt}$.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= i \frac{c_M}{J_1 p^2} - \varphi_1 \frac{c}{J_1 p^2} + \varphi_2 \frac{c}{J_1 p^2}; \\ \varphi_2 &= \varphi_1 \frac{c}{J_2 p^2} - \varphi_2 \frac{c}{J_2 p^2}; \\ i &= \frac{U}{R} - \varphi_1 \frac{c_e p}{R}. \end{aligned}$$

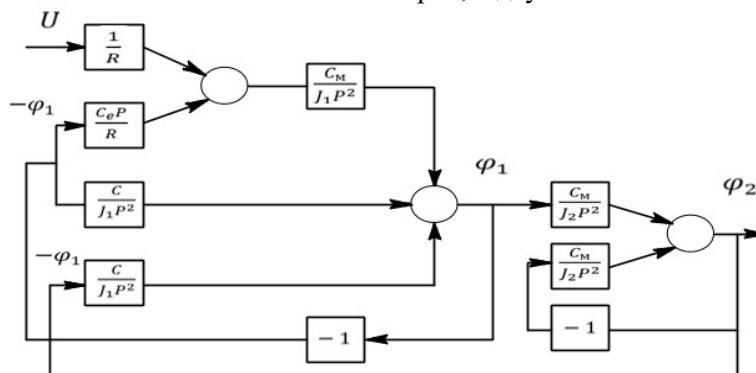


Рисунок 3 – Графічний аналог системи диференційного рівняння фізичної моделі

Користуючись загальноприйнятими засобами, легко скласти графічний аналог цієї системи (рис. 3).

Як уже сказано, застосування методу структурного аналізу базується на основі представлення будь-якої складної схеми в виді набору динамічних ланок направленої дії як по прямому каналу передачі, так і по каналу оберненого зв'язку. Поняття прямого каналу або каналу оберненого зв'язку залежить від визначення переваги досліджуваних величин системи.

Вирішивши систему, отримаємо диференційне рівняння стану ідеалізованої фізичної моделі, яке в загальноприйнятій формі для вирішення на ЕОМ буде мати вигляд:

$$p^4 \varphi_2 = U \frac{c_M c}{R J_1 J_2} - \frac{c_M c_e}{R J_1} p^2 \varphi_2 - \frac{c_M c_e c}{R J_1 J_2} p \varphi_2 - \frac{c}{J_2} p^2 \varphi_2 - \frac{c}{J_1} p^2 \varphi_1$$

і його графічний аналог для набору на ЕОМ (рис. 4).

Наприклад, для системи (рис. 5, а) прямий канал передачі представлений в вигляді двох ланок $W_p(p)$ і $W_0(p)$, а канал оберненого зв'язку – ланкою $W_{0,c}(p)$ при дослідження переваги величин $x_v(p)$, $x_{vix}(p)$ і додаткової величини $f_{ст}(p)$.

Якщо за головні величини прийняти $f_{ст}(p)$ і $x_{vix}(p)$, то структурна схема перетвориться (рис. 5, б), і прямий канал буде представлений ланкою $W_0(p)$, а канал зворотної зв'язку – ланками $W_p(p)$ і $W_{0,c}(p)$.

Поняття ланки направленої дії виходить з того факту, що до потоку енергії, що підходить до ланки, не може приєднатися яка-небудь частина енергії, без додавання додаткового зв'язку, що фіксується на виході ланки. Таким чином, фіксується один напрямок потоку енергії, відсутність взаємного зв'язку з виходом.

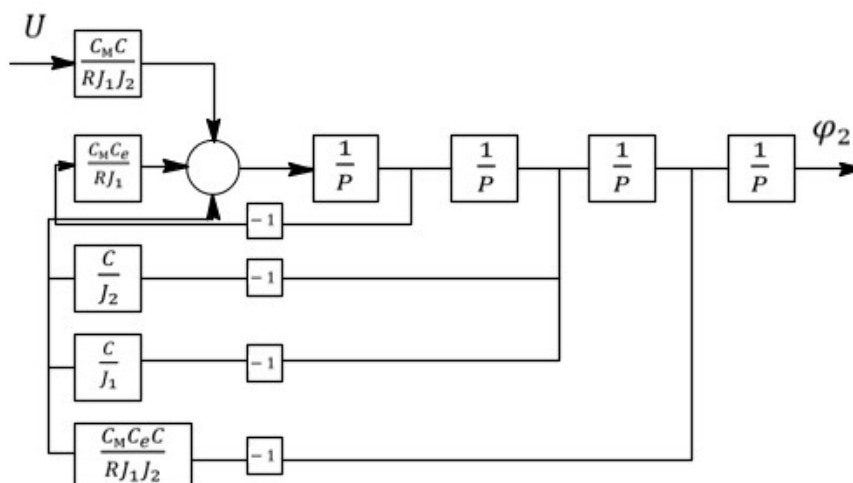


Рисунок 4 – Графічний аналог рівняння набору на ЕОМ

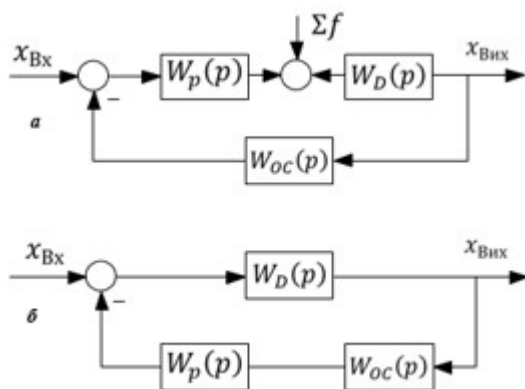


Рисунок 5 – Структурна схема регулювання

В реальних ланках завжди існує зв'язок між контуром вхідної величини і контуром вихідної. Наприклад, в генераторі постійного струму присутній контур вхідної величини – обмотка якоря, додаткові полюси, компенсаційна обмотка і навантаження. Між контурами існує взаємний зв'язок, що визначається коефіцієнтом взаєміндукції, тому і можливий в часі перехідних режимів взаємний обмін енергії між контурами (відсутній один напрям).

Однак в існуючих конструкціях електричних машин взаємний вплив контурів досить незначний: доля енергії, що передається наступним контуром в попередній, дуже малий. Тому, відкидаючи слабкий взаємний вплив наступного контуру на попередній, ідеалізуємо систему, отримуємо ланку напрямленої дії.

Будь-який складний електричний пристрій представлений як багатовимірний об'єкт, в якому протікає декілька процесів, пов'язаних

між собою через внутрішні прямі обернені і перехресні зв'язки.

При ідеалізації ланки як багатоконтурну систему, враховуючи ефективність зв'язків, і при відкиданні мало впливаючих (слабких) контурів, враховуючи їх як додаткові, система вироджується в більш просту систему.

Така ідеалізація правомірна в тому випадку, якщо нас цікавить поведінка системи в цілому по будь-яких координатах і ми розглядаємо дану систему як підсистему системи більш високого порядку.

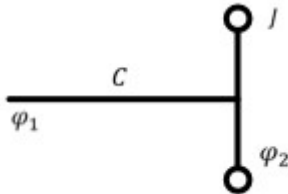
Наприклад, електромашинні підсилювачі для виявлення величини його конструктивних параметрів можна розглядати як багатомірну (багатоконтурну) систему самостійно. Однак при розгляданні системи регулювання немає необхідності розглядати дану систему в її багатоконтурному зображенні, і тому підсистема наводиться як ідеалізована ланка направленої дії по головних координатах $U_{вх}$ і $U_{вих}$.

Загальновідомий факт, що в системі механічних ланок (виступаючих в ролі робочих машин) вплив передають в різній степені як в прямому, так і в зворотному напрямку по лінії зв'язку передачі впливу.

Тому для можливості застосування методу структурних схем необхідно розглядати властивості елементарної механічної ланки і способи його з'єднання в систему механічних ланок.

Механічна ланка, що складається з пружності і маси (рис. 6), в крутячому режимі при наступних обмеженнях: відсутні

дисипативні сили; маси (моменти інерції) приймаються зосередженими; маса (момент інерції) і коефіцієнт жорсткості – незмінні і не залежать від узагальнених координат, статичне навантаження не вказується. Така ланка є ізольованою механічною ланкою.



J – момент інерції, кг·м²; c – коефіцієнт жорсткості пружинного елемента, Н·м/рад;
 φ_1 – кут закручування – вхідна величина, рад;
 φ_2 – кут закручування – вихідна величина, рад

Рисунок 6 – Схема механічної ланки

Якщо прийняти в якості узагальнених координат кут повороту, на основі рівняння руху Лагранжа II порядку, записуємо:

$$\frac{d\partial T}{dt \partial p\varphi} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = M_{\varphi},$$

де T – кінетична енергія ланки, Дж; Π – потенціальна енергія деформації пружного елемента ланки, Дж; φ , $p\varphi$ – відповідно кут повороту валу (рад) і його похідна, рад/с; M_{φ} – узагальнюючий момент, Н·м.

Як відомо,

$$\frac{d\partial T}{dt \partial p\varphi} = J \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2}; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_1} = c(\varphi_1 - \varphi_2); \quad M_{\varphi} = 0,$$

Тоді

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - c(\varphi_1 - \varphi_2) = 0.$$

Переходячи до операторного зображення функції при нульових початкових умовах і розглядаючи величину кута φ_1 на вході ланки, а φ_2 як вихід, отримуємо передавальну функцію ізольованої механічної ланки:

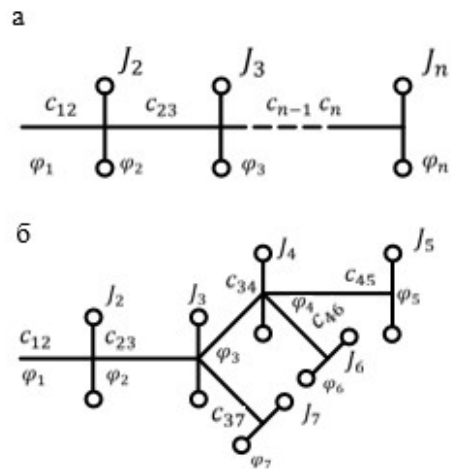
$$W_y(p) = \frac{\varphi_2(p)}{\varphi_1(p)} = \frac{c}{Jp^2 + c}.$$

Якщо $T_y = \sqrt{\frac{J}{c}}$ – постійна часу пружної ланки, тоді

$$W_y(p) = \frac{1}{T_y^2 p^2 + 1}.$$

З отриманого виразу бачимо, що ізольована механічна ланка в структурному відношенні представляє собою консервативну ланку з постійною часу T_y і передавальним коефіцієнтом, рівним одиниці.

Найбільш характерним способом з'єднання механічних ланок в систему є: рядний спосіб (нерозгалужена система) – в системі ланок відсутні вузли розгалуження (рис. 7, а); багаторядний спосіб (розгалужена система) – в системі ланок присутні вузли розгалуження (рис. 7, б).



а – рядний; б – багаторядний

Рисунок 7 – Способи з'єднання механічних ланок

У вузлах можуть бути маси, а можуть і не бути. Розглянемо отримані передавальні функції і структурну схему для систем механічних ланок.

Розглянемо систему послідовно з'єднаних двох механічних ланок (рис. 8, а).

При обмеженні, аналогічно прийнятих для ізольованої ланки, отримуємо вираз для кінетичної енергії системи

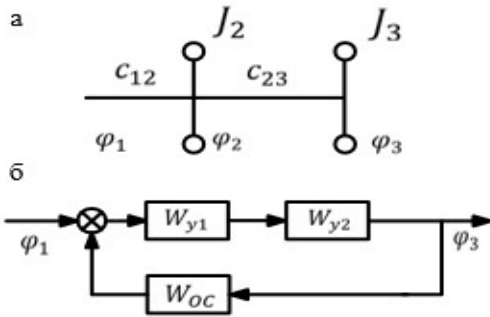
$$T = \frac{J_1(p\varphi_2)^2}{2} + \frac{J_2(p\varphi_2)^2}{2}$$

і потенціальної енергії системи:

$$\Pi = \frac{c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2}.$$

Звідси, використовуючи рівняння Лагранжа, отримуємо систему рівнянь по узагальненим координатам:

$$\begin{aligned} J_1 p^2 \varphi_2 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= 0; \\ J_1 p^2 \varphi_2 - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= 0. \end{aligned}$$



а – фізична модель; б – структурна схема

Рисунок 8 – Рядна система двох ланок

Знайдемо відношення φ_3/φ_1 , що представляє по відповідній передавальній функції розглянутої механічної ланки, що складається з двох послідовно з'єднаних ланок:

$$W_y(p) = \frac{\varphi_3(p)}{\varphi_1(p)} = \frac{c_{12}c_{23}}{(J_1p^2 + c_{12})(J_2p^2 + c_{23}) + J_2c_{23}p^2}$$

Якщо:

$$T_{y1} = \sqrt{\frac{J_1}{c_{12}}}; \quad T_{y2} = \sqrt{\frac{J_2}{c_{23}}}$$

і

$$W_{y1} = \frac{1}{T_{y1}^2 p^2 + 1}; \quad W_{y2} = \frac{1}{T_{y2}^2 p^2 + 1};$$

$$W_{oc} = \frac{J_2}{c_{12}} p^2$$

З передавальної функції ізольованих механічних ланок і деяких зворотних зв'язків, отримаємо передавальну функцію системи:

$$W_y(p) = \frac{W_{y1}W_{y2}}{1 + W_{y1}W_{y2}W_{oc}}$$

якій відповідає структурна схема (рис. 8, б).

Як бачимо, при з'єднанні механічних ланок в систему і зображення її в вигляді структурної схеми з'являються зворотні зв'язки, що відображають якраз той відомий факт, що механічна система не володіє направляючою дією.

Зворотній зв'язок відображає фізичний процес передачі енергії через пружні елементи від дії зосереджених мас до точки дії. Такі зв'язки називаються природними на відміну від штучних.

При з'єднанні електричних ланок, які володіють напрямленою дією, в систему ланок, така система не породжує зворотних зв'язків, так як немає суттєвих зворотних взаємодіючих між собою ланок. Аналогічно для системи, що складається з трьох послідовно з'єднаних механічних ланок (рис. 9, а), отримано передавальну функцію:

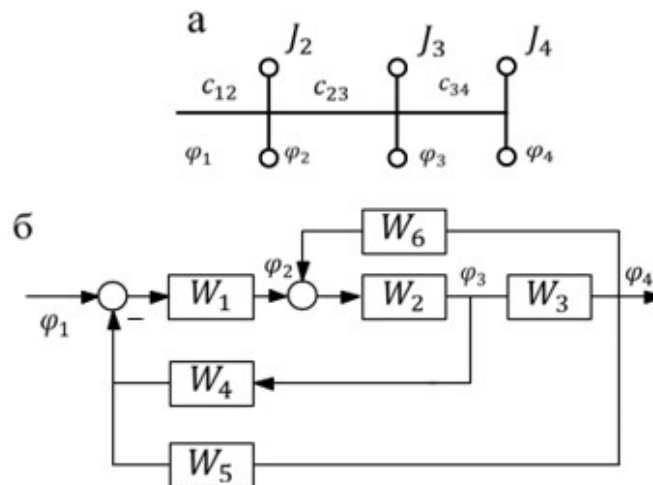
$$W_y(p) = \frac{\varphi_4(p)}{\varphi_1(p)} = \frac{W_1W_2W_3}{1 + W_2W_3W_6 + W_1W_2W_4 + W_1W_2W_3W_5}$$

де

$$W_1 = \frac{1}{T_{y1}^2 p^2 + 1}; \quad W_2 = \frac{1}{T_{y2}^2 p^2 + 1}; \quad W_3 = \frac{1}{T_{y3}^2 p^2 + 1};$$

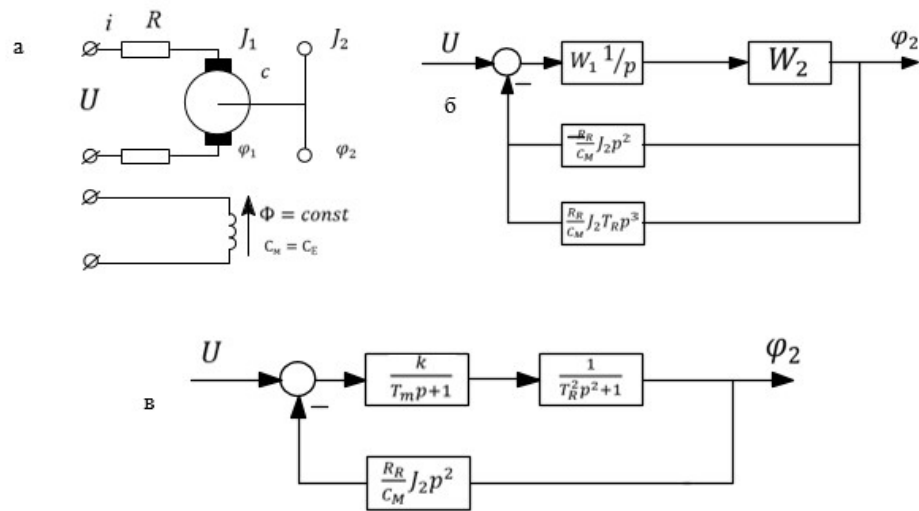
$$W_4 = \frac{J_2 p^2}{c_{12}}; \quad W_5 = \frac{J_3 p^2}{c_{12}}; \quad W_6 = \frac{J_3 p^2}{c_{23}}$$

якій відповідає структурна схема (рис. 9, б).



а – фізична модель; б – структурна схема;

Рисунок 9 – Рядна система трьох ланок



а – фізична модель; б – структурна схема

Рисунок 10 – Рядна система трьох ланок

Як бачимо, в отриманій структурній схемі трьох механічних ланок (пружність – маса) прямий канал структурної схеми представлений послідовним з'єднанням трьох передавальних функцій ізольованих механічних ланок. Обрані зв'язки відображають взаємодію механічних ланок один з одним.

Аналіз результатів досліджень

Розглянуто методику складання структурної схеми де на вході системи присутня електрична ланка в виді двигуна як джерела збурення.

Така електромеханічна система є найбільш загальною схемою робочих машин спускопідйомної установки.

Для спрощення поставленої задачі розглянуто електромеханічну систему при наявності однієї механічної ланки (рис. 10, а).

Для розглянутої електромеханічної системи можна отримано систему рівнянь:

$$J_1 p^2 \varphi_1 + c(\varphi_1 - \varphi_2) = i c_M,$$

$$J_2 p^2 \varphi_2 + c(\varphi_1 - \varphi_2) = 0;$$

$$U = i R_A + c_e p \varphi_1 + L p i,$$

з якої легко отримати передавальну функцію системи

$$W(p) = \frac{\varphi_2(p)}{U(p)} = \frac{W_1 W_2}{p \left[1 + \frac{W_1 W_2 J_2 p^2 R_A}{c_M} (1 + T_M p) \right]^2}$$

якій відповідає структурна схема (рис. 10, б), де $W_1 = \frac{1}{c_e (T_A T_M p^2 + T_M p + 1)}$ – передавальна функція приводного електродвигуна; $W_2 = \frac{1}{T_R^2 p^2 + 1}$ – передавальна функція ізольованої механічної ланки; $\frac{J_2 p^2 R_A}{c_M}$; $\frac{R_A J_2 T_A}{c_M} p^3$ – зворотні зв'язки електромеханічної системи.

Як бачимо, величина природніх зворотних зв'язків електромеханічної системи, що подаються на вхід, визначаються параметрами якоря двигуна і моментом інерції механічної ланки.

Для двигуна з малим опором якорного ланцюга, тобто з жорсткою характеристикою, вплив механічної ланки буде незначним. Аналогічні висновки можна зробити і для індуктивного якорного ланцюга.

Швидкохідні двигуни мають порівняно менше значення індуктивності, ніж тихохідні, тому і вплив динамічного моменту і зв'язок механічної ланки з ланкою «двигун» будуть значно менше, ніж у тихохідного.

Для двигуна, в якому можна упустити індуктивність якорного ланцюга і увести його аперіодичною ланкою першого порядку, структурна схема спрощується (рис. 10, в).

Висновки

Узагальнюючи отримані результати, можна привести загальне правило побудови структурної схеми рядної n -масової механічної системи, що складається відповідно з системи n ланок пружності – маса.

Якщо рядна система складається з системи n з'єднаних послідовних ланок пружності то:

- прями́й канал структурної схеми складається з n послідовно з'єднаних передавальних функцій ізольованих механічних ланок з параметрами відповідних ланок пружність – маса;

- з кожного виходу ізольованої ланки на вході всіх попередніх подається загальний від'ємний зв'язок в виді динамічного моменту ланки, помноженого на величину, обернену коефіцієнту жорсткості тієї ланки, на вхід якої попадається цей зв'язок.

В розглянутих системах механічних ланок в якості вхідних координат розглядався кут закручування елемента без визначення природи його виникнення. В реальних механічних системах, що складають робочу машину, джерелом виникнення кута являється двигун з його електромагнітним моментом.

Література

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 167 с.

2. Борин В.С., Козак Ю.В. Автоматизация технологического процесса подготовки природного газа. Материали міжнародної науково-практичної конференції «DIRECTION OF SCIENTIFIC THOUGHT» 2017.

3. Борин В.С., Ониськів О.О. Створення математичної моделі технологічного процесу підготовки газу: Материали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Молодих учених, аспірантів і студентів -2017» Автоматизация та комп'ютерно-інтегровані технології. 2017. С.171-172.

References

1. Zade L. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions. M.: Mir, 1976. 167 p.

2. Borin VS, Kozak Yu.V. Automation of the technological process of natural gas preparation. Proceedings of the international scientific-practical conference "DIRECTION OF SCIENTIFIC THOUGHT" 2017.

3. Boryn VS, Onyskiv OO Creating a mathematical model of the technological process of gas preparation: Proceedings of the fourth international scientific-practical conference "Young scientists, graduate students and students -2017" Automation and computer-integrated technologies. 2017. P.171-172.

УДК [622.673.1: 681.514.54]

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-103-110

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІСКРОБЕЗПЕКИ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КІЛ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

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*

Збільшення темпів проведення гірських робіт істотно ускладнює безпечну участь людини в технологічному процесі вуглевидобутку. Проблема полягає в розподілі виконуваних операцій між людиною і машиною, що вимагає значного підвищення рівня діагностики та інформативності систем управління, де вимірювальні ланцюги - їх важлива складова. При цьому виникає актуальне завдання безпеки використання вимірювальних ланцюгів в вугільних шахтах. У зв'язку зі зміною ситуації пов'язаної з окупацією частини Донбасу наукові організації і провідні фахівці України, що займаються питаннями безпеки електричних ланцюгів для вугільних шахт залишилися на окупованій території. В даний час є велика кількість літератури з безпеки силових електричних кіл, проте повністю відсутнє в них питання безпеки використання вимірювальних кіл в вугільних шахтах. А вимірювальне коло є важливою невід'ємною складовою діагностики та інформативності систем управління гірничо-шахтного устаткування. У статті наочно показано рішення задачі безпеки використання вимірювальних кіл в вугільних шахтах. Запропоновано математичну модель та методику її реалізації для визначення максимально допустимих параметрів іскробезпеки вимірювальних ланцюгів для вугільних шахт з лінійними (елементарними) елементами. Виявлено допустимі параметри і знайдені співвідношення цих параметрів, які забезпечують іскробезпечність вимірювальних кіл. Запропоновано безкамерна методика оцінки іскробезпеки вимірювальних кіл. Розглянуто приклад застосування розробленої методики на прикладі конкретного датчика контролю типу 4201 ДСТ-10 мобільної системи контролю типу «МАК-2». Показано впровадження розробленої методики на двох вугільних шахтах України та апробація на п'яти зарубіжних конференціях.

Ключові слова: низьковольтне вимірювальне коло, іскробезпека, іскробезпечне коло, давач контролю, допустимі параметри.

Увеличение темпов проведения горных работ существенно усложняет безопасную участие человека в технологическом процессе угледобычи. Проблема заключается в распределения выполняемых операций между человеком и машиной, требует повышения уровня диагностики и информативности систем управления, где измерительные цепи - их важная составляющая. При этом возникает актуальная задача безопасности использования измерительных цепей в угольных шахтах. В связи с изменением ситуации связанной с оккупацией части Донбасунаукови организации и ведущие специалисты Украины, занимающихся вопросами безопасности электрических цепей для угольных шахт остались на оккупированной территории В настоящее время имеется большое количество литературы по безопасности силовых электрических цепей, однако полностью отсутствует в них вопросы безопасности использования измерительных цепей в угольных шахтах. А измерительные цепи важная неотъемлемая составляющая диагностики и информативности систем управления горно-шахтного оборудования. В статье наглядно показано решения задачи безопасности использования измерительных цепей в угольных шахтах. Предложена математическая модель и методика её реализации для определения максимально допустимых параметров искрозащищенности измерительных цепей для угольных шахт с линейными элементарными элементами. Вывявлены допустимые параметры и найдены соотношения этих параметров, которые обеспечивают искробезопасность измерительных цепей. Предложена бескамерная методика оценки искробезопасности измерительных цепей. Рассмотрен пример применения разработанной методики на примере конкретного датчика контроля типа 4201 ДСТ-10 мобильной системы контроля типа «МАК-2». Показано внедрение разработанной методики на двух угольных шахтах Украины и апробація на пяти зарубежных конференциях.

Ключевые слова: низковольтная измерительная цепь, искробезопасность, искробезопасная цепь, датчик контроля, допустимые параметры.

Increasing the pace of mining significantly complicates the safe participation of man in the technological process of coal mining. The problem is the distribution of operations between man and machine, which requires a significant increase in the level of diagnostics and informativeness of control systems, where measuring circuits are an important component. At the same time there is an urgent problem of safety of use of measuring chains in coal mines. In connection with the change in the situation related to the occupation of Donbass, scientific organizations and leading specialists of Ukraine dealing with the safety of electrical circuits for coal mines remained in the occupied territory. Currently, there is a large amount of literature on the safety of power electrical circuits, however, they completely lack the safety issues of using measuring circuits in coal mines. And measuring circuits are an important integral part of diagnostics and information content of mining equipment control systems. The article clearly shows the solution to the problem of the safety of using measuring circuits in coal mines. The mathematical model and one's realization methods is presented for the determination of the measuring circuit maximal allowable spark safety parameters for the coal mine with linear elementary elements. The admissible parameters are revealed and the relationships of these parameters are found, which ensure the intrinsic safety of the measuring circuits. A tubeless technique for assessing the intrinsic safety of measuring circuits is proposed. An example of the application of the developed methodology is considered on the example of a specific control sensor of the 4201 DST-10 type of the mobile control system of the MAK-2 type. The introduction of the developed methodology at two coal mines in Ukraine and approbation at five foreign conferences is shown.

Key words: low-voltage measuring circuit, intrinsically safe, intrinsically safe circuit, control sensor, admissible parameters.

Формулювання проблеми

Збільшення темпів проведення гірських робіт істотно ускладнює безпечну участь людини в технологічному процесі вугледобутку. Проблема полягає в розподілі виконуваних операцій між людиною і машиною, що вимагає значного підвищення рівня діагностики та інформативності систем управління, де вимірювальні ланцюги - їх важлива складова. При цьому виникає актуальне завдання безпеки використання вимірювальних ланцюгів в вугільних шахтах. У зв'язку зі зміною ситуації пов'язаної з окупацією частини Донбасу наукові організації і провідні фахівці України, що займаються питаннями безпеки електричних ланцюгів для вугільних шахт залишилися на окупованій території. Тому автор вирішував завдання безпеки використання вимірювальних ланцюгів в вугільних шахтах в рамках ГБ71 (№. держреєстрації 0118U003599) у 2018-2020 роках.

Виклад основного матеріалу і результати дослідження

Відома типова схема та спосіб для іскробезпечного устаткування установкою в розрив електричного кола бар'єру іскрозахисту. Однак включення в розрив низьковольтного вимірювального кола бар'єру іскрозахисту не гарантує надійну роботу низьковольтної вимірювального кола з будь-якими типами давачів контролю. Питання узгодження «давачи контролю - бар'єр - низьковольтне

вимірювальне коло» вкрай важливе. Так як більшість пасивних бар'єрів іскрозахисту містить в собі струмообмежувальний резистор, величиною близько 1 кОм. Цей резистор може вносити значні зміни в параметри низьковольтного вимірювального кола. При включенні бар'єру іскрозахисту з струмообмежувальні резистори номіналом 1 кОм послідовно в низьковольтне вимірювальне коло може привести до неправильної роботи низьковольтної вимірювального кола у вугільній шахті. Наприклад, до помилкового пуску системи автоматичного пожежогасіння в вугільній шахті, що неприпустимо за нормативними документами.

Під методикою автор розуміє сукупність рекомендацій або приписів, відповідно до яких повинне вирішуватися завдання безкамерної (без використання вибухових камер) оцінки іскробезпеки вимірювальних кіл для вугільних шахт. У методиці повинні бути конкретизовані основні інструменти і роз'яснення, яким чином застосовувати дані інструменти та рекомендації.

Таким чином, оцінка іскробезпеки вимірювальних кіл для вугільних шахт з лінійними елементами може бути виконана із застосуванням довідкових даних Сертифікату відповідності, з використанням значень ємності та індуктивності сполучних кабелів і фідерів. У тому випадку, коли значення ємності та індуктивності сполучних кабелів (фідера) невідомі, можливо, орієнтовно застосування

Таблиця 1 – Співвідношення, що підтверджують іскробезпеку вимірювальних кіл для вугільних шахт з лінійними елементами

Іскробезпечне обладнання + сполучний кабель	Умова підтвердження іскробезпеки	Пов'язане контрольне обладнання вугільної шахти
U_i	\geq	U_o
I_i	\geq	I_o
P_i	\geq	P_o
$L_i + L_c$	\leq	L_o
$C_i + C_c$	\leq	C_o

U_o, I_o - максимальні значення, відповідно, напруги і струму для пов'язаного контрольного обладнання;

U_i, I_i - максимально допустимі значення, відповідно напруги і струму для іскробезпечного устаткування;

L_o - максимально допустиме значення індуктивності у зовнішньому іскробезпечному колі;

C_o - максимально допустиме значення ємності у зовнішньому іскробезпечному колі;

L_i - значення власної індуктивності;

C_i - значення власної ємності.

наступних типових значень параметрів кабелів із загальною довжиною 1 км: $L_c = 1\text{мГн}$, $C_c = 110\text{нФ}$.

Іскробезпека вимірювальних кіл для вугільних шахт з лінійними (елементарними) елементами підтверджується, якщо виконуються співвідношення, наведені в таблиці 1.

З таблиці 1 випливає, що індуктивність і ємність іскробезпечних кіл з урахуванням ємності та індуктивності сполучних кабелів (фідера), визначених за довідковими даними, розрахунком або вимірюванням, не повинні перевищувати максимальних значень, обумовлених в технічній документації на ці кола.

З проведеного аналізу оцінки іскробезпеки вимірювальних ланцюгів з лінійними елементами видно, що на практиці є ланцюги змінного струму, де на кожній ділянці переважає тільки один вид енергії, а два інших видів енергії малі, і ними можна знехтувати. Для таких кіл допустимо вважати, що кожен вид енергії зосереджений на окремій ділянці, тобто коло із зосередженими параметрами, і до них застосовні умови квазістаціонарності. Їх необхідно відрізнити від кіл з розподіленими параметрами, у яких на будь-якій ділянці електрична енергія, магнітна енергія, а також та частина електромагнітної енергії, яка перетворюється в тепло, мають величини одного порядку, і жодним видом енергії на будь-якій

ділянці кола знехтувати не можна. До цих кіл незастосовні умови квазістаціонарності. Для цих кіл із зосередженими параметрами запропонований коефіцієнт іскробезпеки, що дорівнює 1,5, може опускатися значно нижче 1, що може вважатися рівнозначним присутності джерела підпалювання, що неприпустимо за нормативними документами для вугільних шахт. У разі контролю у вугільній шахті з ланцюгом з зосередженими індуктивностями і ємностями в зоні класу В-І (Zone 0, необхідний рівень вибухозахисту - «іа»), особливо вибухонебезпечний), потрібні спеціальні запобіжні заходи.

Маючи на увазі цю обставину, німецькі випробувальні центри (РТВ, DMT), наприклад, вважають за можливе значне заниження максимально допустимих значень індуктивності (L_o) і ємності (C_o) для пов'язаного електрообладнання.

Виходячи з вищевикладеного, перевірка іскробезпеки вимірювальних ланцюгів для вугільних шахт з лінійними елементами вважається повною, якщо виконуються умови:

$$\begin{aligned} U_o &\leq U_b, \\ I_o &\leq I_b, \\ P_o &\leq P_i, \\ L_o &\geq \Sigma (L_i + L_c), \\ C_o &\geq \Sigma (C_i + C_c). \end{aligned}$$

При з'єднанні чинного пов'язаного контрольного обладнання вугільних шахт в нову конфігурацію електричні параметри, наведені в

Сертифікаті відповідності кожної одиниці обладнання, не може бути безпосередньо використані для оцінки загальної іскробезпеки комплексу. Підключене пов'язане обладнання повинно розглядатися єдиним електричним пристроєм, для якого розраховуються нові граничні значення електричних параметрів.

Залежно від виду і порядку з'єднання або можливого аварійного режиму повинні розглядатися послідовне, паралельне або змішане з'єднання, особливо при аварійному режимі, при якому можлива зміна електричних і конструктивних параметрів елементів, що впливають на іскробезпеку кіл (послідовна або паралельна схема з'єднання).

Рівень вибухозахисту «іа» (особовибухонебезпечний) повинен прийматися для об'єданого контрольного обладнання вугільних шахт, навіть якщо кожна одиниця устаткування відповідає рівню «іа» (особовибухонебезпечний). Подібні об'єдані електричні ланцюги не припустимі для використання в зоні класу В- I (Zone 0).

Допустимі значення напруги холостого ходу і струму короткого замикання для різних видів з'єднань обчислюються за різними критеріями для вугільних шахт.

Пропонується наступна методика визначення максимально допустимих параметрів іскробезпеки вимірювальних ланцюгів для вугільних шахт з лінійними (елементарними) елементами:

1. При паралельному з'єднанні U_o визначається за найбільшим значенням окремих напруг холостого ходу, I_o - за сумою значень окремих допустимих струмів короткого замикання.

$$U_o = \max(U_{on});$$

$$I_o = \sum I_{on} = I_{o1} + I_{o2} \dots + I_{on}.$$

2. При послідовному з'єднанні U_o обчислюється за сумою окремих значень напруг холостого ходу, I_o - за найбільшим значенням окремих допустимих струмів короткого замикання.

$$U_o = \sum U_{on} = U_{o1} + U_{o2} \dots + U_{on};$$

$$I_o = \max(I_{on}).$$

3. При послідовно-паралельному з'єднанні U_o або I_o обчислюється за сумою відповідних окремих значень U_{on} або I_{on} .

$$U_o = \max(U_{on}) \text{ або } U_o = \sum U_{on} = U_{o1} + U_{o2} \dots + U_{on};$$

$$I_o = \sum I_{on} = I_{o1} + I_{o2} \dots + I_{on} \text{ або } I_o = \max(I_{on}).$$

Цю методику слід застосовувати, в основному, в разі простих або ясно скомпонованих з'єднань. Методика передбачає план дій для найгіршого випадку і тому дає вищу ступінь безпеки для вугільних шахт. Максимально допустимі значення U_o , I_o , L_o і C_o можуть бути отримані за графіками залежностей мінімальних запальних струмів і напруг для вибухонебезпечної шахтної суміші (ВШС) оптимального складу, наведеними в ГОСТ 22782.5-78

«Електрообладнання вибухозахищене з видом вибухозахисту «іскробезпечне електричне коло» [1] або в EN50020, Part 7, Electrical Apparatus for Hazardous Areas Intrinsic Safety "i" [2]. Для визначення іскробезпечного значення струму (напруги) необхідно для заданих електричних параметрів іскробезпеки вимірювальних кіл для вугільних шахт з лінійними (елементарними) елементами знайти значення мінімального запального струму (напруги) для даної вибухонебезпечної суміші ВШС [3] і потім розділити його на коефіцієнт іскробезпеки, тобто на 1,5. При розрахунку кіл змінного струму необхідно приймати амплітудні значення струму і напруги.

Розглянемо іскробезпечне підключення до вимірювального кола з лінійними елементами тензометрического давача 4201 ДСТ-10 (рис. 1)

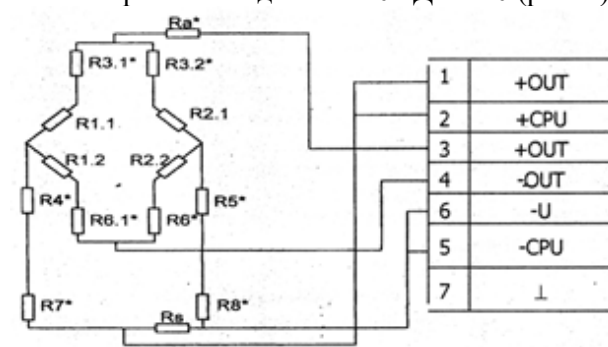


Рисунок 1 – Принципова електрична схема давача 4201 ДСТ - 10

Так як давачі 4201 ДСТ -10 встановлюється на тензометричні черевики підйомної посудини, тобто у вибухонебезпечній зоні, в якості розділових елементів між іскробезпечними і іскронебезпечними колами застосовуємо блоки іскрозахисту. В даному прикладі застосовуємо блоки іскрозахисту на стабілітронах (БІС), які серійно випускаються компанією

Pepperl + Fuchs GmbH (Німеччина). 4201 ДСТ-10 (рис. 1) виконані у вигляді моста Уїнстона і живляться через БІС типу Z765, яка забезпечує живлення з номінальним значенням напруги 10 В вимірювального моста з внутрішнім опором 350 Ом. На вході давача 4201 ДСТ-10 встановлюється БІС типу Z764. Коло зворотного зв'язку через БІС типу Z764 може не використовуватися. На практиці, втім, досить часто потрібно застосування цього кола зворотного зв'язку для досягнення більш високої точності вимірювання. Вихідний сигнал 4201 ДСТ-10 передається через БІС типу Z964.

У подібних схемах оцінка іскробезпеки повинна враховувати з'єднання декількох діючих пов'язаних пристроїв, і рівень вибухозахисту повинен бути вибухобезпечним («іВ»), навіть якщо все пов'язане обладнання характеризується особовибухонебезпечним рівнем («іА»).

На першому етапі зіставляємо електричні параметри БІС Z764, Z765, Z964 і датчика 4201 ДСТ -10 мобільної системи контролю (МСК) типу «МАК-2».

На другому етапі визначають граничні значення електричних параметрів схеми з'єднання. Наприклад, довжина фідера МСК до 30 метрів і визначається типовими параметрами підйомних посудин. Це обмеження дозволяє створити методики по визначенню максимально допустимої ємності і індуктивності вимірювальних ланцюгів вугільних шахт. Їх обчислення ґрунтується на методиці, описаної в додатку А стандарту EN 60079-14 (Electrical Apparatus for Use in Explosive Environments) [4].

1. Визначаються найбільші значення напруги і струму в системі за значеннями параметрів U_o , I_o .

Максимальна з окремих значень напруги в нашому прикладі.

$$U_o = 14,7\text{В.}$$

Сумарний струм в паралельному електричному колі

$$I_o = (75+12+12)\text{ мА} = 99,0\text{ мА.}$$

2. Перевіряється умова: найбільше значення струму (I_o), помножене на коефіцієнт іскробезпеки 1,5, не повинно перевищувати значення струму, отриманого із залежності мінімального запального струму від напруги джерела в омичному колі при максимальній напрузі $U_o = 14,7\text{В}$.

З графіків додатки А стандарту EN 60079-14 (Electrical Apparatus for Use in Explosive Environments) видно, при напрузі $U_o = 14,7\text{В}$ для ВШС [3] (метано-повітряна) максимальне допустиме значення струму короткого замикання $I_{max} = 997\text{ мА}$, що істотно перевищує $I_o \times 1,5 = 148,5\text{ мА}$.

Отже, умову іскробезпеки згідно з залежністю мінімального запального струму від напруги джерела для омичного кола можна вважати виконаною.

3. Максимально допустиме значення індуктивності L_o визначається із залежності максимально запального струму від індуктивності вимірювального кола і напруги джерела за найбільшим значенням струму (I_o), помноженому на коефіцієнт іскробезпеки 1,5.

З графіків додатки А стандарту EN 60079-14 (Electrical Apparatus for Use in Explosive Environments) видно, при значенні $I_o \times 1,5 = 148,5\text{ мА}$ отримуємо максимально допустиме значення індуктивності L_o для ВШС (метано-повітряна) 5,8 мГн.

4. Максимально допустиме значення ємності C визначається із залежності мінімальної займистої напруги від ємності кола для ВШС (метано-повітряна) за найбільшим значенням напруги $U_o = 14,7\text{В}$, помноженому на 1,5.

З графіків додатки А стандарту EN 60079-14 (Electrical Apparatus for Use in Explosive Environments) видно, при значенні $U_o \times 1,5 = 22,05\text{ В}$ максимально допустиме значення ємності 956 нФ.

5. Перевіряється умова: максимально допустимі значення C_o і L_o повинні задовольняти вимогам іскробезпеки електричного кола.

Ці вимоги визначають умови іскробезпеки електричного кола тільки одного з пов'язаних пристроїв.

При оцінці іскробезпеки враховується фідер МСК типу «МАК-2» довжиною 30м з ємністю фідера $C_c = 67\text{ пФ}$ і індуктивністю фідера $L_c = 82\text{ мкГн}$.

6. Визначається група вибухозахищеного обладнання МСК, з урахуванням того, для якого типу ВШС [3] вибиралися залежно мінімальних запалюваних струмів і напруг.

Все розглянуте в прикладі обладнання МСК типу «МАК-2» отримано для метано-

повітряної ВШС. Оскільки іскробезпека МСК з давачем 4201 ДСТ -10, підтверджена відповідно до цих параметрів, задовольняє вимогам для підгрупи вибухозахищеного обладнання рівня «Іа».

7. Додатково може бути визначена група ВШС в залежності від величини температури самозаймання. Залежно від величини температури самозаймання в залежності від значення максимальної температури поверхні МСК встановлюють температурні класи, зазначені в таблиці 5 ГОСТ 22782.081 «Електрообладнання вибухозахищене. Загальні технічні вимоги та методи випробувань». Максимальна температура поверхні МСК визначається за формулою:

$$T = P_o \times R_{th} + T_{окр},$$

де T - максимальна температура поверхні обладнання МСК, °С;

P_o - максимальна потужність, що виділяється джерелами енергії з лінійними вольт-амперними характеристиками, визначають зі співвідношенням:

$$P_o = I_o \times U_o / 4;$$

де R_{th} - тепловий опір (°С / Вт), який специфікується виробником комплектуючих виробів;

$T_{окр}$ - температура навколишнього середовища (зазвичай приймається 40°С).

Як видно, запропонована методика являє собою джерело головним чином рекомендаційного характеру, в якому наводяться перелік інструментів, а також загальні рекомендації щодо їх застосування для вугільних шахт.

Висновки. Розроблені автором методики безкамерної (без використання вибухових камер) оцінки іскробезпеки вимірювальних кіл для вугільних шахт пройшли апробацію на п'яти зарубіжних конференціях [5-9] і отримали схвалення.

Матеріали науково-дослідницької роботи по підвищенню вибухобезпеки для вугільних шахт розробленої в рамках ГБ 71 доктором технічних наук Лопатиним В.В. передані в 2020 році по акту (рис. 2) на шахту ДП ВК «Краснолиманська» у вигляді «Рекомендацій з технічного обслуговування іскробезпечними вимірювальними ланцюгами для вугільних шахт з метою підвищення викидобезпечності

натурних геологічних робіт на шахті ТОВ «Краснолиманське» з метою підвищення викидобезпечності при проведенні натурних геологічних робіт з вимірювальною апаратурою.



Рисунок 2 – Акт передачі на шахту ДП ВК «Краснолиманська» у 2020 році



Рисунок 3 – Акт передачі на ШУ ім. Героїв Космосу ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» у 2021 році

В 2021 році по акту (рис. 3) були передані «Рекомендації з технічного обслуговування іскробезпечних вимірювальних кіл для вугільних шахт» з метою підвищення вибухобезпеки натурних підземних робіт наШУ ім. Героїв Космосу ПрАТ« ДТЕК Павлоградвугілля».

Література

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 IEC 60079-11 INTERNATIONAL STANDARD. [Електронний ресурс]. International Electrotechnical Commission, Geneva. Switzerland, 2006. 233 p. Режим доступу до ресурсу: https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec60079-11%7Bed4.0%7Den_d.pdf. Назва з екрану.

3. Система стандартов безопасности труда. Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний: ГОСТ 12.1.1.011-1985. [Введен 1979.07.01]. М.: Изд.-во стандартов, 1985. 18 с.

4. EN 60079-14 Electrical Apparatus for Use in Explosive Environments [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://www.crouse-hinds.de/download/1/Principles_of_Explosion_Protection_30080001258.pdf. Назва з екрану.

5. Lopatin, V.V. Instrumental control of work safety in mine workings under changing complex geological and technical conditions [Електронний ресурс] Mining Investment India/ July 25, 2018 - July 26, 2018 New Delhi, India, Asia – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mininginvestmentindia.com/>. Назва з екрану.

6. Lopatin, V.V. From the practice of controlling mine workings [Електронний ресурс] Mines and Money Asia/ April 04, 2018 - April 06, 2018 Hong Kong, China, Asia – Режим доступу до ресурсу: <https://asia.minesandmoney.com/>. Назва з екрану

7. Lopatin, V. Methods of tubeless assessment of intrinsic safety of measuring circuits with linear and nonlinear elements for coal mines [Електронний ресурс] Mines and Money Asia 31 March - 1 April 2020. The Conrad, Hong Kong-

Режим доступу до ресурсу: <https://asia.minesandmoney.com/register/>. Назва з екрану.

8. Lopatin, V., J Zemlianaia. Experiência em monitoramento direcionado por ultrassom de reforço de eixo rígido [Електронний ресурс] VMMEC 7TH MOZAMBIQUE MINING, OIL & GAS & ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION 22 Apr 2020 - 23 Apr 2020 • Maputo, Mozambique, Africa.- Режим доступу до ресурсу: <https://africanminingmarket.com/event/7th-edition-of-the-mozambique-mining-oil-gas-and-energy-conference-and-exhibition-mmec-2020/>. Назва з екрану.

9. Lopatin, V. Optimization of the structure of the mountain mobile control system [Електронний ресурс] 7-th Annual International Mining and Resources Conference +EXPO/ 27-28 October 2020/ Melbourne, Australia –Режим доступу до ресурсу: <https://imarcmelbourne.com/>. Назва з екрану.

References

1. Elektrooborudovanye vzryvoshchychennoe s vydom vzryvoshchityi «Yskrobepasnaia elektrycheskaia tsep». Tekhnicheskyye trebovaniya y metodyi uspyitaniya: HOST 22782.5-1985. [Vveden 1980-01.-01]. М.: Yzd.-vo standartov, 1985. 70 s.

2 IEC 60079-11 INTERNATIONAL STANDARD. [Elektronnyi resurs]. International Electrotechnical Commission, Geneva. Switzerland, 2006. 233 r. Rezhym dostupu do resursu: https://webstore.iec.ch/p-preview/info_iec60079-11%7Bed4.0%7Den_d.pdf. Nazva z ekranu.

3. Systema standartov bezopasnosty truda. Smesy vzryvopasnyie. Klassyfykatsiya y metodyi uspyitaniya: HOST 12.1.1.011-1985. [Vveden 1979.07.01]. М.: Yzd.-vo standartov, 1985. – 18 s.

4. EN 60079-14 Electrical Apparatus for Use in Explosive Environments [Elektronnyiresurs]. Rezhymdostupudoresursu: https://www.crouse-hinds.de/download/1/Principles_of_Explosion_Protection_30080001258.pdf. Nazva z ekranu.

5. Lopatin, V.V. Instrumental control of work safety in mine workings under changing complex geological and technical conditions [Elektronnyi resurs] Mining Investment India/ July 25, 2018 -

July 26, 2018 New Delhi, India, Asia – Rezhy m dostupu do resursu: <https://www.mininginvestmentindia.com/>.- Nazva z ekranu.

6. Lopatin, V.V. From the practice of controlling mine workings [Elektronnyiresurs] Mines and Money Asia/ April 04, 2018 - April 06, 2018 Hong Kong, China, Asia – Rezhy m dostupu do resursu: <https://asia.minesandmoney.com/>.- Nazva z ekranu

7. Lopatin, V. Methods of tubeless assessment of intrinsic safety of measuring circuits with linear and nonlinear elements for coal mines [Elektronnyiresurs] Mines and Money Asia 31 March - 1 April 2020. The Conrad, Hong Kong.- Rezhy m dostupu do resursu: <https://asia.minesandmoney.com/register/>.- Nazva z ekranu.

8. Lopatin, V., J Zemlianaia. Experiência em monitoramento direcionado por ultrassom de reforço de eixo rígido [Elektronnyiresurs] VMMEC 7TH MOZAMBIQUE MINING, OIL & GAS & ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION 22 Apr 2020 - 23 Apr 2020 • Maputo, Mozambique, Africa.- Rezhy m dostupu do resursu: <https://africanminingmarket.com/event/7th-edition-of-the-mozambique-mining-oil-gas-and-energy-conference-and-exhibition-mmec-2020/>.- Nazva z ekranu.

9. Lopatin, V. Optimization of the structure of the mountain mobile control system [Elektronnyiresurs] 7-th Annual International Mining and Resources Conference +EXPO/ 27-28 October 2020/ Melbourne, Australia – Rezhy m dostupu do resursu: <https://imarcmelbourne.com/>.- Nazva z ekranu.

УДК 681.621

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-111-116

ОЦІНОЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ОСУШУВАННЯ ЖОМУ

Г.В. Григорчук¹, Л.І. Григорчук¹, В. А. Ровінський²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, e-mail: grygorchukl@gmail.com

²Прикарпатський національний університет імені Василя Сефаника, 46000, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, e-mail: vrovn@gmail.com

У процесі виробництва цукру значна увага приділяється автоматизації виробництва, яка здійснює контроль відповідних технологічних параметрів Осушування жому - це дорогий і енергоємний процес. Використання виключно сушильних лабораторних шаф для контролю вологості сухого жому вимагає великих витрат часу і може привести до відхилення вологості продукту. Установка датчиків вологості як елементів системи автоматизації на об'єктах за наявності різних температурних режимів на вході і виході сушилки - це простий і надійний спосіб економії коштів, тому що дозволяє вимірювати вологість сухого жому в потоці онлайн, температуру осушування та розхід газу. При цьому можна регулювати температуру, час осушування, швидкість переміщення товару через сушлку і гарантувати на виході необхідний рівень вологості продукту для гранулювання і зберігання. Розглядається випадок залежності виробництва жому від подачі газу. За вхідні дані береться розхід газу на протязі деякого фіксованого часу t , протягом якого вироблено заданий об'єм продукції. Будується графік частоти розподілу кожної випадкової величини, погрупвавши на інтервали. Знаходяться точкові оцінки даної вибірки: математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення кожної випадкової величини для визначення оптимального використання ресурсів. Для дослідження залежності випадкових величин визначаються параметри нормального закону розподілу для даних значень. Для ефективного використання процесу осушування жому розглядається залежність від кількості подачі газу до кількості виробленої продукції. За заданим нормальним законом розподілу технологічних параметрів осушки та виробництва жому при відповідних даних затратах газу можна висунути гіпотезу про інтервальну оцінку розподілу між виробництвом і споживанням газу. При стабільній подачі газу 0.108 виробництво жому буде оптимальним. Визначено напрямки подальших досліджень процесу виробництва цукру з метою розробки актуальні математичних моделей та систем його автоматизації.

Ключові слова: осушування жому, обробка даних температурних режимів, математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення, гістограма частоти розподілу.

В процессе производства сахара значительное внимание уделяется автоматизации производства, которая осуществляет контроль соответствующих технологических параметров Сушка жома - это дорогой и энергоемкий процесс. Использование исключительно сушильных лабораторных шкафов для контроля влажности сухого жома требует больших затрат времени и может привести к отклонению влажности продукта. Установка датчиков влажности как элементов системы автоматизации на объектах при наличии различных температурных режимов на входе и выходе сушилки - это простой и надежный способ экономии средств, так как позволяет измерять влажность сухого жома в потоке онлайн, температуру сушки и расход газа. При этом можно регулировать температуру, время сушки, скорость перемещения товара через сушлку и гарантировать на выходе необходимый уровень влажности продукта для гранулирования и хранения. Рассматривается случай зависимости производства жома от подачи газа. За входящие данные берется расход газа на протяжении некоторого фиксированного времени t , в течение которого произведено заданный объем продукции. Построим график частоты распределения каждой случайной величины, погруппируем на интервалы. Находятся точечные оценки данной выборки: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение каждой случайной величины для определения оптимального использования ресурсов. Для исследования зависимости случайных величин определяются параметры нормального закона распределения для данных значений. Для эффективного использования процесса сушки жома рассматривается зависимости от количества подачи газа в количестве произведенной продукции. По заданным нормальным законом распределения технологических параметров сушки и производства жома при соответствующих данных затратах газа можно выдвинуть гипотезу о интервальной оценке распределения между производством и потреблением газа. При стабильной подаче

газа 0.108 производство жомы будет оптимальным. Определены направления дальнейших исследований процесса производства сахара с целью разработки актуальных математических моделей и систем его автоматизации

Ключевые слова: сушки жомы, обработка данных температурных режимов, математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, гистограмма частоты распределения.

In the process of sugar production, much attention is paid to production automation, which controls the relevant technological parameters. Drying of pulp is an expensive and energy-intensive process. The use of only drying laboratory cabinets to control the moisture content of dry pulp is time consuming and can lead to deviations in the moisture content of the product. Installing humidity sensors as elements of the automation system at facilities with different temperature regimes at the inlet and outlet of the dryer is a simple and reliable way to save money, as it allows you to measure the humidity of dry pulp in the online stream, drying temperature and gas consumption. You can adjust the temperature, drying time, speed of movement of the product through the dryer and guarantee the required level of humidity of the product for granulation and storage. The case of dependence of pulp production on gas supply is considered. The input data is the gas flow rate over a fixed time t during which the specified output is produced. Build a graph of the frequency of distribution of each random variable, grouped into intervals. There are point estimates of this sample: mathematical expectation, standard deviation of each random variable to determine the optimal use of resources. To study the dependence of random variables, the parameters of the normal distribution law for these values are determined. To effectively use the pulp drying process, the dependence on the amount of gas supply to the number of products is considered. According to the given normal law of distribution of technological parameters of drying and production of pulp at the corresponding given expenses of gas it is possible to put forward a hypothesis about an interval estimation of distribution between production and consumption of gas. With a stable gas supply of 0.108, the production of pulp will be optimal. The directions of further research of the sugar production process in order to develop current mathematical models and systems for its automation are determined.

Keywords: pulp drying, processing of temperature data, mathematical expectation, standard deviation, histogram of distribution frequency.

Жом із буряка - побічний продукт виробництва цукру з буряка. Являє собою обезцукрену бурякову стружку сірого кольору. Свіжий буряковий жом має вологість 92 ... 95%. Суху речовину жому складається з пектинових речовин (близько 50%), целюлози (близько 45%), білків (близько 2%), сахарози (0,6%) і мінеральних речовин (до 1%). Таким чином, жом є цінним кормом для сільськогосподарських тварин (за поживністю він займає середнє положення між вівсом і сіном). Однак, виробництво цукру з буряка здійснюється лише кілька місяців на рік, вихід жому при цьому становить 80-82% від маси переробленої цукрового буряка[4].

Таким чином, за порівняно короткий період часу утворюються десятки і навіть тисячі тонн бурякового жому, використання яких на корм худобі в свіжому вигляді неможливо. Отже, це величезна кількість потенційного корму потрібно або переробити (консервувати), або утилізувати. Консервувати жом можна двома основними способами: сушінням і силосування (молочнокислим бродінням). Зберігання та застосування кислого жому має цілий ряд недоліків і обмежень, тому

найбільш раціональним є переробка жому шляхом сушки і подальшого гранулювання. Оскільки осушування жому від початкової вологості 92 ... 95% шляхом випаровування води є економічно безглуздою, то єдина раціональна технологія його сушіння наступна: початкове відділення вологи спеціальними жомоотжимними пресами, потім - сушка випаровуванням. Зберігання та застосування кислого жому має цілий ряд недоліків і обмежень, і тому найбільш раціональним є переробка жому шляхом сушки і подальшого гранулювання. При переробці цукрових буряків виходить близько 80% відходів, в основному, у вигляді бурякового жому. Подальше зберігання сирого жому пов'язано з багатьма недоліками і проблемами. Це малий попит, невеликий час зберігання, втрата поживних речовин (до 60%), екологічні проблеми при переповненні сховищ кислим жомом. І найкраще рішення цих проблем - вдосконалення сушки бурякового жому, так як це надійніший спосіб зберігання жому [1].

В процесі виробництва гранульованого жому (сушіння), важливим аспектом є вимір вологості. Для того щоб сухий жом

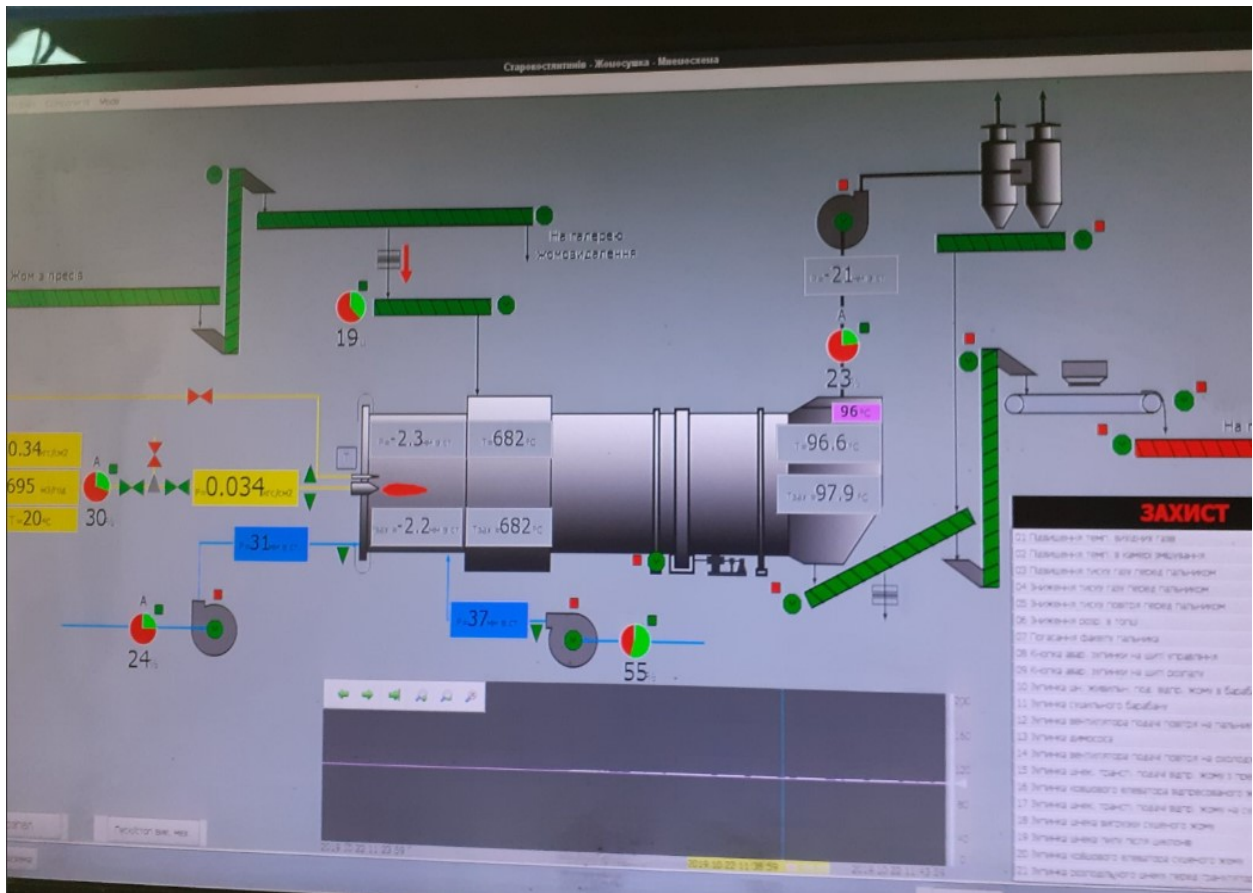


Рисунок 1 – Процес сушки жому

гранулювався, він повинен бути з належним рівнем вологості на виході з сушарки. Занадто висока вологість може в подальшому привести до псування продукту під час його зберігання, а в пересушеному жомі, гранули стають дуже крихкими і непридатними для використання. Осушування жому - це дорогий і енергоємний процес. Використовувати виключно сушильні лабораторні шафи для контролю вологості сухого жому вимагає великих витрат часу і може привести до відхилення вологості продукту. Установка датчика вологості на виході сушарки - це простий і надійний спосіб економії коштів, тому що дозволяє вимірювати вологість сухого жому в потоці онлайн в процесі обробки температурних режимів. При цьому можна регулювати температуру, час осушування, швидкість переміщення товару через сушарку і гарантувати на виході необхідний рівень вологості продукту для його гранулювання і зберігання [6]. При цьому:

- підвищується ефективність використання сушарок
- знижуються відходи
- гарантується якість продукту на виході.

Основна частина. Процес сушки жому та виробництва гранул схематично відображено на рисунку 1. На цьому рисунку показано не тільки процес виробництва, але вхідні та вихідні дані температурних режимів, подачу сировини, вологість вихідної продукції.

На екрані робочого комп'ютера (рисунку 2), відображено схему подачі газу і температурні режими виробничого процесу сушки жому згідно якої визначаються початкові і кінцеві температурні режими, вологість сировини та розхід газу, за якими постійно ведеться нагляд.

Розглядається випадок залежності виробництва жому від подачі газу. За вхідні дані береться розхід газу на протязі деякого

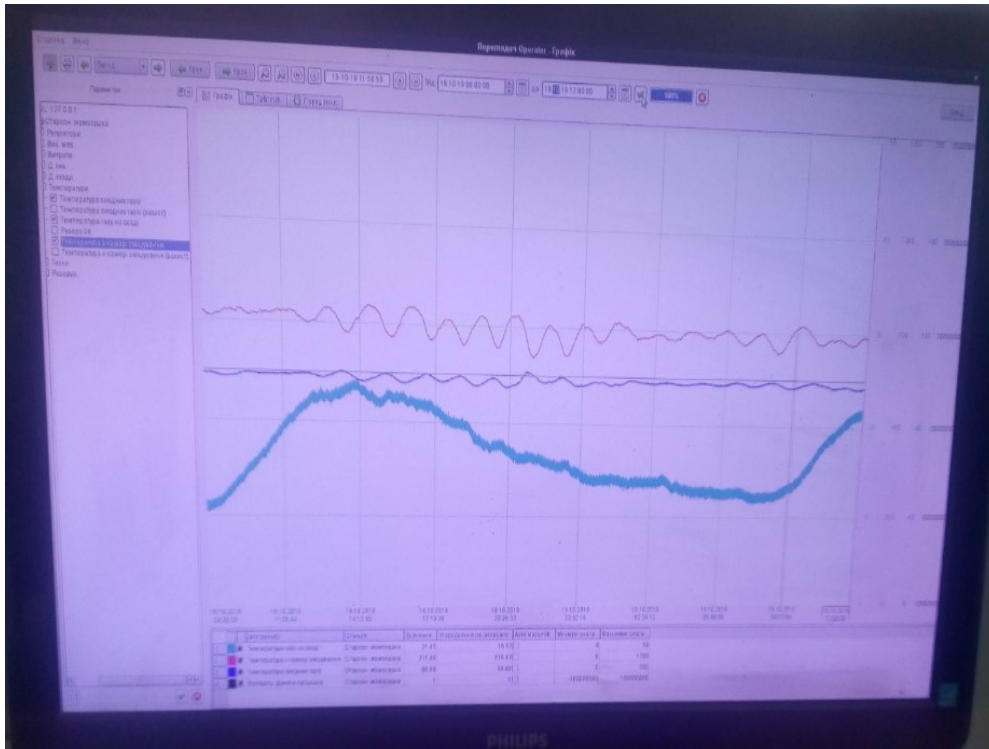


Рисунок 2 – Відображення процесу осушування жому на моніторі

фіксованого часу t , протягом якого вироблено заданий об'єм продукції. Будується графік частоти розподілу кожної випадкової величини, погрупвавши на інтервали. Знаходяться точкові оцінки даної вибірки: математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення кожної випадкової величини для визначення оптимального використання ресурсів. Для дослідження залежності випадкових величин визначаються параметри нормального закону розподілу для даних значень вибірки [5].

Тестування розпочинається з перегляду вибірки даних подачі газу, температурних режимів, просортувавши її по інтервалах. Для відображення вибірки необхідно для початку обрати одну з двох наявних в програмі, після чого обраховуються основні числові характеристики даної вибірки які з'являться в відповідних полях. Аналогічно визначаються точкові оцінки для вибірки по виробництву і осушуванню жому.

В наступній вкладці відображається результат побудови гістограми частоти розподілу для попередньо обраної вибірки по використанню газу.

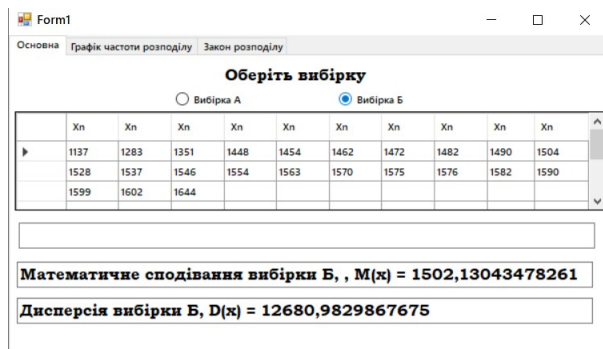


Рисунок 3 – Обчислені точкові оцінки подачі газу

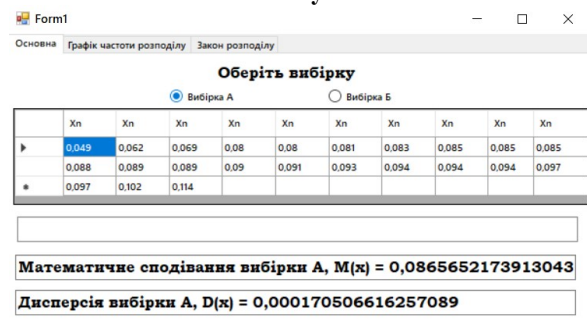


Рисунок 4 – Обчислені точкові оцінки по виробництву жому

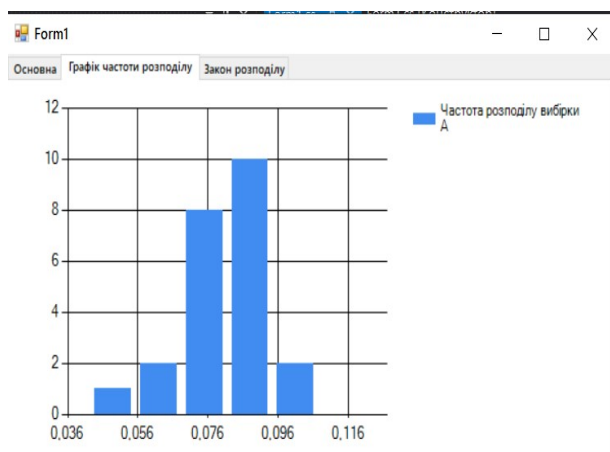


Рисунок 5 – Гістограма частоти розподілу вибірки подачі газу

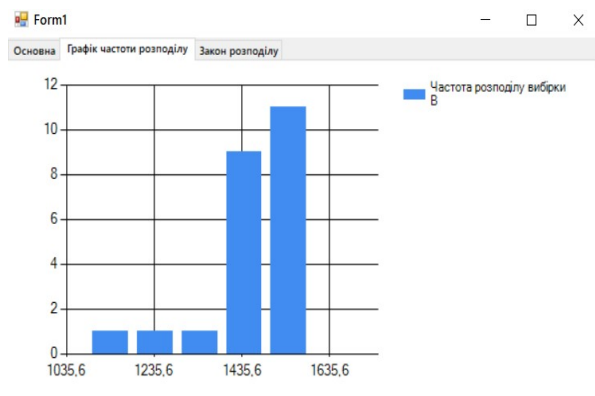


Рисунок 6 – Гістограма частоти розподілу гранулювання жому

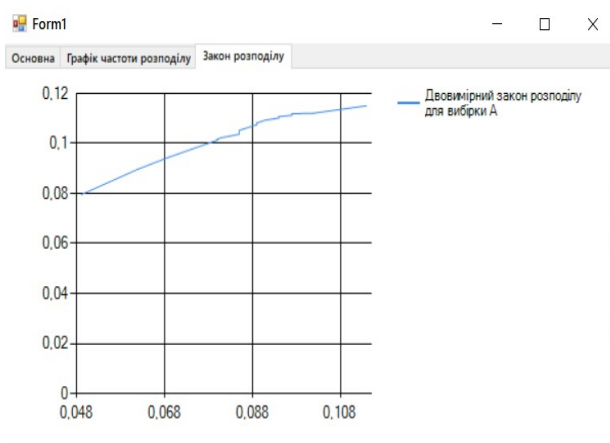


Рисунок 7 – Закон розподілу для випадкової величини, яка характеризує об'єм подачі газу

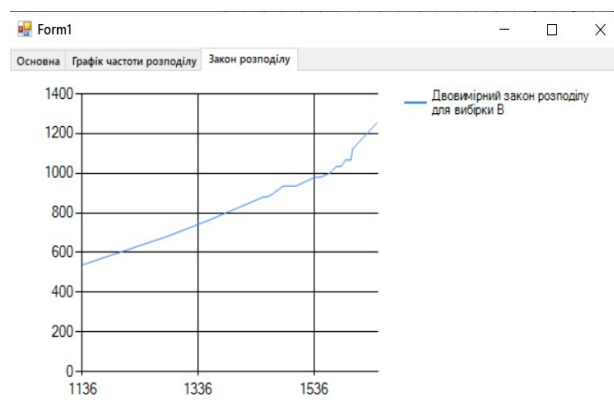


Рисунок 8 – Закон розподілу випадкової величини для вибірки характеристик процесу гранулювання жому

Дані, отримані для побудови гістограми дають можливість побудувати графік одновимірного нормального закону розподілу випадкової величини виробництва продукції в залежності від кількості поданого газу. Згідно даної гістограми оптимальне осушування і гранулювання жому відбувається при математичному сподіванні $M(X) = 1502.13$ з середнім квадратичним відхиленням $\sigma = 112.6$, а розхід газу в такому випадку з математичним сподіванням $M(X) = 0.0865$ і середньо-квадратичним відхиленням $\sigma = 0.013$.

За заданим нормальним законом розподілу сушки та виробництва жому визначаються інтервальні оцінки розподілу використання газу, температурні режими процесу сушіння гранул жому. Отже при неперервних і сталих подачі газу в і тиску - 0.108 -виробництво жому буде оптимальним.

Висновки. У роботі зробили оцінку параметрів розподілу виробничих характеристик процесу виробництва цукру як випадкових величин. За заданим нормальним законом розподілу технологічних параметрів сушки та виробництва жому, при відповідних даних затратах газу, можна висунути гіпотезу про інтервальну оцінку розподілу між виробництвом і споживанням газу. При сталій подачі газу 0.108 виробництво жому буде оптимальним. В подальших дослідженнях необхідно застосовувати порівняльні характеристики інтервалів розподілу

використання затраченого палива і оптимального виробництва гранульованого жому. Робота має підготовчий характер для створення системи автоматизації процесу виробництва цукру.

Література

1. А. А. Шевцов. Кінетика сушіння бурякового жому перегрітою парою в імпульсному віброкиплячому шарі / А. А. Шевцов, А. В. Дранніков, С. А. Баришніков, Ю. В. Фурсов ./- М.: Цукор, 2007, №4, с.28-29].

2. Григорчук Г. В. Моделювання деформування об'єктів, що працюють в умовах температурних впливів / Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Олійник А. П., Рис В. В. / Прикарпатський вісник наукового товариства ім. Шевченка. Число. 2019. №1(53). С. 38–44

3. Petryk M. Numerical and Analytical Modeling of Solid-Liquid Expression from Soft Plant Materials. / Petryk M., Vorobiev E. / AIChE Journal. Wiley. Volume 59, Issue 12, 4762–4771 (2013) (Quartile 1, if 2.95, 15)

4. Штангеев К. О. Сушка цукру та жому в буряко-цукровій галузі / Штангеев К. О. Київ 2015 © ЮНІДО 2015.

5. Свердан П. П. Вища математика (Математичний аналіз і теорія ймовірностей) / Свердан П. П. / К. Знання, 2008. 450 с.

6. Алексеев М. А. Метод формирования параметров для ситуационного управления технологическими процессами / М. А. Алексеев // Сб. наук. пр. НГУ. – 2007. – № 27. – С. 152–156.

References

1. A. A. Shevtsov. Kinetika sushInnya buryakovogo zhomu peregrItoyu paroyu v Impulsnomu vIbrokiplyachomu sharI. ./ A.A.Shevtsov, A.V.DrannIkov, S.A.BarishnIkov, Yu.V.Fursov ./- M.: Tsukor, 2007, #4, s.28-29].

2. Grigorchuk G. V. Modelyuvannya deformuvannya obektiv, scho pratsyuyut v umovah temperaturnih vplivIv. /Grigorchuk G.V., Grigorchuk L. I., OIlynik A. P., Ris V. V. / Prikarpatskiy vIstnik naukovogo tovaristva Im. Shevchenka. Chislo. 2019. #1(53). S. 38–44

3. Petryk M. Numerical and Analytical Modeling of Solid-Liquid Expression from Soft Plant Materials. / Petryk M., Vorobiev E. / AIChE Journal. Wiley. Volume 59, Issue 12, 4762–4771 (2013) (Quartile 1, if 2.95, 15)

4. Shtangev K.O. Sushka tsukru ta zhomu v buryako-tsukrovIy galuzI /Shtangev K.O./ KiYiv 2015 © YuNIDO 2015.

5. Sverdani P.P. Vischa matematika (Matematichniy anallz I teorIya ymovIrnostey)./ Sverdani P.P./ K. Znannya, 2008. 450 s.

6. Alekseev M.A. Metod formirovaniya parametrov dlya situatsionnogo upravleniya tehnologicheskimi protsessami / M.A. Alekseev // Sb.nauk.pr. NGU. 2007. # 27. S. 152–156.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 504.064

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-117-124

ДИНАМІЧНО ДЕКОМПОЗИЦІЙНИЙ ПІДХІД ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСТ

М. В. Крихівський, В. І. Михайлів, Л. В. Саманів

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: rta@iutng.edu.ua

Розвиток технологій та виробництва сьогодні тісно пов'язаний з запобіганням негативного впливу на навколишнє середовище міждержавними договорами та законодавством країн. Проте єдиної методології оцінювання антропогенної діяльності в контексті змін в екологічних системах поки не існує. Різні підходи до цієї проблеми призводять до різних методик та, відповідно, до різних результатів.

Основна увага наукових розробок в цій галузі приділяється процесам забруднення довкілля, викидам і відходам промислових виробництв та життєдіяльності. Саме зміни, а найбільш небезпечні з них незворотні, є тим аспектом, що в повній мірі відображають адекватність в оцінюванні рівня екологічної безпеки. Тому важливою й актуальною задачею науки сьогодні слід вважати прогнозування змін в екологічних системах внаслідок впливу природних і антропогенних факторів. Розв'язок цієї задачі неможливий без розроблення нових математичних методів діагностики.

Дослідження спрямовано на розроблення інструментів підтримки стратегічного екологічного оцінювання екологічних систем міст в контексті концепції оцінки впливів на навколишнє середовище. Запропоновано теоретичний інструмент, що дає можливість як прогнозування, так і дослідження існуючої ситуації.

У роботі розглянуто новий науково-практичний підхід до діагностики екологічного стану природно техногенних компонентів міст (урбоєкосистем). Оцінювання рівня екологічної безпеки пропонується виконувати математичним моделюванням системи зі змінною структурою. В основі дослідження – траєкторія нечітких структур екосистеми, що поєднує інтегральні показники та біоіндикацію.

Запропонована математична модель дозволить формалізувати зміни в навколишньому середовищі. Такий підхід удосконалює методологію комплексного оцінювання всіх компонент довкілля та дозволить використовувати обчислювальну техніку, що зробить діагностику більш об'єктивною. Запропонована теорія обґрунтовує метод динамічної декомпозиції на основі нечітких станів екосистеми.

Формалізація може бути використана для автоматизації діагностики екологічної безпеки екологічних систем та розроблення алгоритмічного забезпечення комплексного аналізу на рівні природно техногенних комплексів міст.

Ключові слова: діагностика урбоєкосистеми; комплексна оцінка рівня екологічної безпеки; динамічна декомпозиція; нечіткий стан екосистеми.

Развитие технологий и производства сегодня тесно связано с предотвращением негативного воздействия на окружающую среду межгосударственными договорами и законодательством стран. Однако единой методологии оценки антропогенной деятельности в контексте изменений в экологических системах пока не существует. Различные подходы к этой проблеме приводят к различным методикам и, соответственно, к разным результатам.

Основное внимание научных разработок в этой области уделяется процессам загрязнения окружающей среды, выбросов и отходов промышленного производства и жизнедеятельности. Именно изменения, а наиболее опасные из них необратимы, является тем аспектом, который в полной мере отражают адекватность в оценке уровня экологической безопасности. Поэтому важной и актуальной задачей науки сегодня следует считать прогнозирование изменений в экологических системах вследствие воздействия природных и антропогенных факторов. Решение этой задачи невозможно без разработки новых математических методов диагностики.

Исследование направлено на разработку инструментов поддержки стратегического экологического оценивания экологических систем городов в контексте концепции оценки воздействия на окружающую среду. Предложено теоретический инструмент, дающий возможность как прогнозировать, так и исследовать существующую ситуацию.

В работе рассмотрен новый научно-практический подход к диагностике экологического состояния естественных техногенных компонентов городов (урбоэкосистем). Оценка уровня экологической безопасности предлагается выполнять математическим моделированием системы с переменной структурой. В основе исследования – траектория нечетких структур экосистемы, объединяющей интегральные показатели и биоиндикацию.

Предложенная математическая модель позволит формализовать изменения в окружающей среде. Такой подход совершенствует методологию комплексной оценки всех компонентов окружающей среды и позволит использовать для этих целей вычислительную технику, сделает диагностику более объективной. Теория динамической декомпозиции обосновывает метод оценивания уровня экологической безопасности на основе нечетких состояний экосистемы.

Формализация может быть использована для автоматизации диагностики экологической безопасности городов и разработки алгоритмического обеспечения комплексного анализа на уровне естественно техногенных комплексов городов.

Ключевые слова: диагностика урбоэкосистемы; комплексная оценка уровня экологической безопасности; динамическая декомпозиция; нечеткое состояние экосистемы.

The development of technologies and production today is closely connected with the prevention of negative impact on the environment by interstate agreements and the legislation of countries. However, a unified methodology for assessing anthropogenic activity in the context of changes in ecological systems does not yet exist. Different approaches to this problem lead to different methods and, accordingly, to different results.

The main focus of scientific developments in this area is paid to the processes of environmental pollution, emissions and waste of industrial production and life. It is the changes, and the most dangerous of them are irreversible, that is the aspect that fully reflect the adequacy in assessing the level of environmental safety. Therefore, an important and urgent task of science today should be considered predicting changes in ecological systems due to the impact of natural and anthropogenic factors. The solution to this problem is impossible without the development of new mathematical diagnostic methods.

The study is aimed at developing tools to support strategic environmental assessment of ecological systems of cities in the context of the concept of environmental impact assessment. A theoretical tool is proposed that makes it possible to both predict and investigate the existing situation.

The paper considers a new scientific and practical approach to diagnostics of the ecological state of natural technogenic components of cities (urban ecosystems). It is proposed to assess the level of environmental safety by mathematical modeling of a system with a variable structure. The study is based on the trajectory of fuzzy structures of the ecosystem, combining integral indicators and bioindication.

The proposed mathematical model will make it possible to formalize changes in the environment. This approach improves the methodology for a comprehensive assessment of all components of the environment and will allow the use of computer technology for these purposes, and will make the diagnosis more objective. The theory of dynamic decomposition substantiates a method for assessing the level of environmental safety based on fuzzy states of the ecosystem.

Formalization can be used to automate the diagnostics of the ecological safety of cities and to develop algorithmic support for complex analysis at the level of natural technogenic complexes of cities.

Key words: diagnostics of urban ecosystem; comprehensive assessment of the level of environmental safety; dynamic decomposition; fuzzy state of the ecosystem.

Вступ

Однією із актуальних проблем діагностики стану довкілля є оцінювання змін, що відбулися як внаслідок антропогенної дії, так і через інші причини з метою подальшого запобігання негативних впливів. За способом комплексного врахування стану різних природних компонент (літосфера та мінерально сировинні ресурси,

геофізсфера та космічні ресурси, геоморфосфера та територіальні ресурси, поверхнева та підземна гідросфера, динаміка й якість водних ресурсів, атмосфера та кліматичні ресурси, педосфера та земельні ресурси, фітосфера та рекреаційні ресурси, зоосфера, демосфера) методи часто поділяють на інтегральні та диференційні. Диференціальні не передбачать

оцінювання загального стану довкілля, а дозволяють детально дослідити певну сферу, тому їх можна вважати допоміжними. Особливо важливим є дослідження змін стану як прояв негативного або позитивного антропогенного впливу.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Методи оцінювання рівня екологічної небезпеки класифікують неоднозначно через різні підходи та відсутності єдиної теорії, яка б охоплювала всі аспекти проблематики. Однією з найбільш загальних можна вважати ієрархічну класифікацію методів оцінки стану на основі двох типів: інтегральних, що агрегують всі природні компоненти, та диференційні, що сфокусовані на локальні завдання [1]. Авторами зроблено висновок про обмежену сферу застосування в стратегічному вимірі керування екологічною безпекою інтегральних методів, які поділені на два класи: розрахункові (що характеризується кількісними показниками) та біоіндикацію (непрямі методи оцінки). Вони вважають, що перспективними в плані комплексної оцінки динаміки зміни екологічної небезпеки є біоіндикація. Диференціальні методи рекомендують для розроблення стратегії мінімізації затрат на оцінювання.

Важливе значення для екологічної стійкості навколишнього середовища має структурна та параметрична ідентифікація рівноваги систем і необоротних процесів, визначених самоорганізацією об'єкта [2]. У цій роботі для комплексного оцінювання якості стану і процесів усіх складових досліджуваних природно-техногенних систем введені імовірнісні характеристики процесів стабілізації та дестабілізації в аналізованих об'єктах, які впливають на обчислення ризику здоров'ю людей.

Ще одним підходом є MIPS-аналіз [3], характерною рисою якого є статичність. Його розрахункові значення визначають вплив на компоненти навколишнього природного середовища матеріально-енергетичних потоків відповідно до кількості виробленої чи утилізованої продукції. Зазначається, що остаточної інформації, що відбувається в об'єкті дослідження не буде встановлено. Спільно з MIPS-аналізом доцільно застосовувати аналізом стосовно екологічного ризику негативного

впливу як міри відхилення від природних чи нормативних показників якості систем природного середовища, включаючи і стан людини, тобто аналізом ризиків.

Оцінювання ризиків для довкілля внаслідок антропогенного впливу є досить вивченим та ефективним [4, 5]. Автори виділяють декілька типів методик оцінки екологічного ризику: якісні оцінки (традиційні, на основі думок експертів); кількісні (на основі статистики проявів та наслідків екологічних ризиків); інтегральні (визначення розміру ризику на основі кількох основних факторів); експрес-оцінки; метод «дельта» (розрахунок поточного значення ризику, що динамічно змінюється на основі попередньої оцінки та поточних значень факторів, що впливають на розмір ризику); комплексні (на базі спеціальних наукових досліджень). Запропоновано кількісні значення інтегральних оцінок загроз, що характеризують екологічну безпеку України для кожного із регіонів України. Проведено ідентифікацію розрахункових величин відповідно до запропонованого числового інтервалу величини екологічного ризику.

У роботі [6] виконаний пошук адекватної оцінки процесів, що відбуваються в природному середовищі під впливом посилення антропогенного навантаження, що є важливою передумовою для своєчасного виявлення загроз національній безпеці в екологічній сфері і своєчасного реагування на них. Здійснення такої оцінки потребує використання кількісних показників, що в достатній мірі характеризують стан національної безпеки в екологічній сфері. У роботі враховано, що значення цих показників змінюються в часі під впливом багатьох чинників. Відсутність припустимих меж коливань значень цих показників ускладнює процес оцінки ситуації та виявлення загроз національній безпеці в екологічній сфері. На основі аналізу існуючої нормативно-правової бази, результатів наукових досліджень, досвіду міжнародних організацій та розвинутих країн щодо оцінки стану екологічної ситуації сформовано перелік конкретних показників, що кількісно оцінюють стан безпеки в екологічній сфері, та зроблена спроба визначити їх порогові значення.

Інтегральний показник запропоновано в роботі [7]. Авторами проаналізовано стан

показників навколишнього природного середовища, таких як атмосферне повітря (18 показників), водні ресурси (30 показників), земельні ресурси (10 показників), лісові ресурси (12 показників), надра (7 показників) та екзогенні геологічні процеси (22 показники), відходи (18 показників). Їх комплексна оцінка дала змогу визначити рівень безпечності природокористування та можливості виникнення загроз екологічного характеру, за умови, що збережеться існуюча тенденція антропогенного навантаження. Запропоновано компонування векторів показників первинної інформації для розрахунку інтегральної оцінки небезпеки окремого блоку та нормування показників, тобто перехід від абсолютних за своїм характером показників до відносних показників; Для визначення вагових коефіцієнтів використано метод головних компонент, котрий трансформує m -вимірний ознаковий простір у r -вимірний простір компонент.

Авторами роботи [8] запропонована екологічна стратегія міста з інформаційною базою, яка повинна містити дані про місцеві природні ресурси, користувачів цих ресурсів та стан довкілля. Для цього використовуються геоінформаційні технології, що дозволяють збирати, накопичувати та зберігати інформацію про наявні природні ресурси, їх користувачів, стан навколишнього середовища, а також прогнозувати зміни екологічній ситуації на підставі імітаційного моделювання змін у та оцінювати екологічні ризики.

Оцінювання екологічного стану території в [9] розглянуто у визначенні: процес порівняння сукупності екологічних станів об'єктів з певними нормами з урахуванням потенційно можливих впливів зовнішніх факторів, зокрема факторів ризику надзвичайних ситуацій. У такому сенсі при оцінюванні результатів негативних впливів на об'єкт та навколишнє природне середовище необхідно враховувати якнайбільшу кількість індивідуальних особливостей об'єкта за ризиком виникнення на ньому надзвичайних ситуацій техногенного чи природного характеру. Методологічною основою роботи було обрано метод імітаційного моделювання, який дозволив перейти до аналізу екологічного резерву. Сформульовано та представлено у формалізованому вигляді

інтегральний критерій оцінювання екологічного стану території за показником рівня її екологічного резерву. Новизна отриманого результату полягає у використанні логістичної моделі для кількісного опису залежностей величин, які характеризують деградаційні процеси в екосистемах, у якості відгуків навколишнього природного середовища на дію факторів негативного впливу.

Теорія методу динамічної декомпозиції запропонована у роботі [10], що може бути використана для моделювання складних динамічних систем зі змінним складом і структурою. Складна динамічна система S , в структуру якої можуть входити взаємодіючі динамічні системи S_1, S_2, \dots, S_n в певний момент часу визначається функціями $\gamma_i(t)$. Значення $\gamma_i(t) = 1$, якщо S_i в момент часу t входить в S , і $\gamma_i(t) = 0$ в іншому випадку ($i = 1, 2, \dots, n$). Вектор $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_n(t))$ є структурою системи S в момент часу t .

З метою діагностування змін як зміну біологічних маркерів введена метрика в просторі траєкторій динамічних систем. Вважаючи \mathcal{Y} множиною всіх можливих структур ($\gamma \in \mathcal{Y}$) метрику ρ в \mathcal{Y} визначено як $\rho(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) = \sum_{i=1}^n |\gamma_i^{(1)} - \gamma_i^{(2)}|$, де $\gamma^{(i)} = (\gamma_1^{(i)}, \dots, \gamma_n^{(i)}) \in \mathcal{Y}$ і $j = 1, 2$.

Система зі структурними змінами повністю визначається множиною $\{\mathcal{Y}(S), \Omega_{\mathcal{Y}(S)}, \tau_{\mathcal{Y}(S)}, \Phi_{\mathcal{Y}(S)}, \Psi_{\mathcal{Y}(S)}, \Theta_{\mathcal{Y}(S)}\}$. Елементи цієї множини: $\mathcal{Y}(S)$ – структурний простір системи, тобто простір структур, які система S може мати в процесі існування ($\mathcal{Y}(S) \subset \mathcal{Y}$); $\Omega_{\mathcal{Y}(S)} = \{\Omega(\gamma): \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина фазових просторів $\Omega(\gamma)$ динамічних систем $S(\gamma)$; $\tau_{\mathcal{Y}(S)} = \{\tau(\gamma): \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина розбиттів фазових просторів $\Omega(\gamma)$, тобто $\tau(\gamma) = \{\Omega_p(\gamma): \Omega(\gamma) = \cup_p \Omega_p(\gamma); \Omega_p \cap \Omega_q = \emptyset; p \neq q; p, q \in P(\gamma)\}$ і $P(\gamma)$ – множина індексів; $\Phi_{\mathcal{Y}(S)} = \{S(\gamma): \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина динамічних систем $S(\gamma)$, що задані в фазових просторах $\Omega(\gamma)$; $\Psi_{\mathcal{Y}(S)} = \{\psi_{pq}(\gamma, \gamma')\}$ – множина відображень переходу з $\Omega_p(\gamma)$ в $\Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$ і $\Omega_p(\gamma)$ – межа $\Omega_p(\gamma)$; $\Theta_{\mathcal{Y}(S)} = \{\theta_{pq}^+, p \in P(\gamma), q \in P(\gamma')\}$ – множина функцій часових затримок переходу від структури γ до структури γ' .

Функціонування системи S описується послідовністю структур $\{\gamma^{(k)}\}$. Траєкторія динамічної системи $S \in X(t, t_0, X_0(\gamma)) = X_0(\gamma) \in \Omega_p(\gamma) \subset \Omega(\gamma)$. Якщо траєкторія не потрапляє на межу $\Omega_p(\gamma)$, то структура при $t \geq t_0$ залишається незмінною:

$\gamma(t) = \gamma$. Якщо t_p^- – перший момент часу такий, що $X(\gamma) = X(t_p^-, t_0, X_0(\gamma)) \in \Omega_p(\gamma)$, то відображення переходу $\psi_{pq}(\gamma, \gamma')$, переводить $X(\gamma)$ в точку $X_0(\gamma') \in \Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$, $\gamma' \in Y$, $q \in P(\gamma')$ де γ', q залежать від $\gamma, p, X(\gamma), t_p^-$. Відображення може бути задано динамічною системою. Далі в момент часу $t_q^+ = \theta_q^+(\gamma, p, X(\gamma), t_p^-) \geq t_p^-$ починає діяти динамічна система $S(\gamma')$. При цьому з умови $t_q^+ \geq t_p^-$ випливає, що при $t_q^+ > t_p^-$ у проміжку (t_p^-, t_q^+) відбувається перемикання структури системи, тобто в загальному випадку перемикання відбувається не миттєво. При $t \in (t_p^-, t_q^+)$, тобто в режимі перемикання, можливо одне з двох: або система не функціонує, тобто має фіктивну структуру ($\gamma(t) = (0, 0, \dots, 0)$), або S функціонує, але зберігає структуру γ , тобто відбувається затримка при переході до структури γ' . Режим перемикання може здаватися динамічною системою.

Вплив довкілля на здоров'я людей можна вважати першочерговою задачею, у якій проблема візуального забруднення поки що мало вивчена. Візуальне середовище може помітно впливати на стан здоров'я людей, що пов'язано з біологією зору, а саме з автоматією сакад. Оцінювання такого впливу найчастіше пропонують виконувати та роблять за допомогою аналізу фотокопій публічних місць та опитуваннями експертів. У роботі [11] в рамках динамічно декомпозиційного підходу запропоновано метод оцінювання забруднення візуального середовища міст, що дозволить зменшити неточності оцінювання рівня екологічної безпеки візуального середовища міст. Цим методом пропонується використовувати складне динамічне зображення S , в структуру якого можуть входити взаємодіючі динамічні зображення S_1, S_2, \dots, S_n , які в певний момент часу визначається функціями $\gamma_i(t)$. Значення $\gamma_i(t) = 1$, якщо S_i в момент часу t входить в S , і $\gamma_i(t) = 0$ в іншому випадку ($i = 1, 2, \dots, n$). Вектор $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_n(t))$ є структурою зображення S в момент часу t .

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Розрізняють, як мінімум, п'ять основних взаємодоповнюючих методів оцінювання рівня екологічної безпеки міст: матричним метод, метод сполученого аналізу карт, система потокових діаграм, метод імітаційного

моделювання та метод експертних груп. Причинно-наслідкові зв'язки між можливими впливами на об'єкти встановлюються матричним методом. Широко поширений метод сполученого аналізу карт, що дозволяє визначати і демонструвати масштаби поширення впливу. Добре зарекомендувала себе система потокових діаграм, яка описує природні системи як складні структури масообміну. Використовується метод імітаційного моделювання. Метод експертних груп, незважаючи на його недоліки (суб'єктивність оцінок тощо), служить для визначення граничних параметрів впливу і використовується для побудови шкал оцінок впливу і різного роду матриць.

У матричного методі оцінки впливу об'єктів на природне середовище використовують різні типи матриць. Наприклад, матриця Л. Леопольда призначена для оцінювання впливу проектів, яка дає наочне уявлення про структуру взаємодій. Проте вона виявляє лише первинні зміни в природі і не дозволяє прослідкувати весь ланцюг складних взаємодій. У більш складних матрицях (матриці Баттеле) проводиться ранжування інтенсивного впливу (надається вага або бал інтенсивності) і змін в екосистемах (визначається значущість зміни під впливом об'єкта, визначається вплив). Агреговані показники розраховуються при перемноженні ваги впливу та значущості змін в екосистемах, потім ці значення підсумовуються по горизонталі і вертикалі матриці щоб визначити найбільш інтенсивні зони впливу та найбільш чутливі або найбільш мінливі об'єкти, які відчувають вплив.

Застосовують чотири типи матриць (від простих – вплив на компоненти природи до більш складних), які дозволяють виявити і віддалені наслідки впливів, а також простежити поширення змін у природі (ланцюгові реакції) та зворотний вплив зміненої природи на діяльність суспільства (X + H), а також наслідки цього впливу, тобто поширення наслідків у суспільстві (H + X) і ланцюгові реакції в діяльності людини.

Спільний аналіз карт вперше був використаний Я. Мак Харгом, який застосував поєднання схем на кальці для оцінки впливу на середовище. Суть методу полягала в тому, що досліджувана територія поділялася на ділянки

(виходячи з топографічних характеристик, типів землекористування тощо) та по кожній ділянці збиралася інформація за компонентами навколишнього середовища і потенціальними впливами на них. Для кожного з показників і для кожного варіанту проекту викреслювалися схеми на кальці, поєднанням яких виявлялися як інтенсивність порушень середовища, так і чинники природного та соціально-економічного характеру, що ускладнюють здійснення проекту.

Для визначення первинних змін і ланцюга їх наслідків застосовується також метод потокових діаграм і мережних графіків, або ступінчаста матриця, розроблена Дж. Соренсеном. Метод передбачає складання переліку різних варіантів землекористування та характерних для них типів впливів. Далі визначаються пов'язані з цими впливами початкові зміни стану окремих компонентів природного середовища (в даному прикладі – зміна стоку води в естуарій) і наступні, спричинені вже порушеннями в природному середовищі (наприклад, скорочення популяцій риб).

На відміну від матриці взаємодії компонентів цей метод наочно показує не тільки напрямок, але і сутність зв'язків різного порядку між компонентами природного середовища. Він дає можливість простежити за динамікою впливів, тобто показати можливі зміни як під час спорудження, так і після завершення будівництва об'єкта. Але при збільшенні числа аналізованих показників метод стає громіздким і складним для аналізу. Тому його застосування можливе для проектів з обмеженим числом впливів. Недолік методу полягає також в обліку змін лише елементів природного середовища.

Для оцінки впливу на навколишнє середовище використовуються також математичні моделі, в тому числі імітаційні, що відображають кількісні залежності між впливами і дозволяють розглядати соціальні і природні системи як безперервно розвиваються і змінюються. Метод імітаційного моделювання знаходиться в початковій стадії розвитку, що пов'язано з недостатньою вивченістю порушених екосистем. В існуючих моделях акцент робиться, як правило, на один компонент екосистеми. У більш складних моделях, розроблених для цілих екосистем, недостатньо

повно враховуються соціально-економічні показники, оскільки введення додаткових даних робить моделі некерованими. Тим не менше на майбутнє цей підхід розглядається як вельми перспективний. »

Враховуючи недоліки існуючих методів і відсутність єдиної методології оцінювання рівня екологічної безпеки територій і, зокрема, міст, актуальним є удосконалення методів діагностики за допомогою математичного моделювання. Для зменшення неточності оцінювання рівня екологічної безпеки візуального середовища міст пропонується метод динамічної декомпозиції.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є розроблення нових математичних підходів з визначення оптимальної моделі діагностики рівня екологічної безпеки міст для прийняття управлінських рішень. У ході теоретичного аналізу інформації щодо досягнення мети поставлені і розв'язані такі задачі:

- розроблення теоретичних основ єдиного підходу до формування комплексної екологічної оцінки факторів різних компонент навколишнього середовища;
- формування системи оцінювання з урахуванням специфіки функціонування і екологічної поведінки системних об'єктів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Діагностування екологічних систем часто пов'язано з оцінюванням змін, особливо незворотних. Проблема такого діагностування актуальна оскільки раціональне функціонування підприємств, міст набуває все більшого значення у зв'язку з посиленням антропогенних впливів на навколишнє середовище. Важливим є можливість використання методу динамічної декомпозиції з метою розв'язування задачі моделювання динаміки розвитку з урахуванням природоохоронних витрат. Системи зі змінною в процесі функціонування структурою характерні для багатьох задач екології та раціонального природокористування.

Для зменшення неточності оцінювання рівня екологічної безпеки візуального середовища міст пропонується метод динамічної декомпозиції. Динамічне екосистема міста S , в структуру якого можуть входити взаємодіючі динамічні зображення S_1, S_2, \dots, S_n в

певний момент часу визначається функціями $\gamma_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Значення $\gamma_i(t)$ набуває з відрізка $[0;1]$. Якщо S_i в момент часу t повністю співпадає з структурою урбоєкосистеми, тоді $\gamma_i(t) = 1$. Якщо S_i в момент часу t повністю не співпадає з структурою урбоєкосистеми, тоді $\gamma_i(t) = 0$. В іншому випадку $0 < \gamma_i(t) < 1$ є мірою подібності. Вектор $\gamma(t) = (\gamma_1(t), \gamma_2(t), \dots, \gamma_n(t))$ визначає структуру екосистеми S в момент часу t . Зміни в екосистемах відображаються траєкторією базисних структур S_i . Всі можливі структури утворюють множину \mathcal{Y} . Для чисельного порівняння визначається метрика ρ для $\gamma \in \mathcal{Y}$ як $\rho(\gamma^{(1)}, \gamma^{(2)}) = \sum_{i=1}^n |\gamma_i^{(1)} - \gamma_i^{(2)}|$, де $\gamma^{(i)} = (\gamma_1^{(i)}, \dots, \gamma_n^{(i)}) \in \mathcal{Y}$ і $j=1, 2$.

Рівень екологічної безпеки визначається змінами, що повністю визначається множиною $\{\mathcal{Y}(S), \Omega_{\mathcal{Y}(S)}, \tau_{\mathcal{Y}(S)}, \Phi_{\mathcal{Y}(S)}, \Psi_{\mathcal{Y}(S)}, \Theta_{\mathcal{Y}(S)}\}$. Елементи цієї множини: $\mathcal{Y}(S)$ – структурний простір станів урбоєкосистеми, тобто простір структур, які екосистема S може мати в процесі існування ($\mathcal{Y}(S) \subset \mathcal{Y}$); $\Omega_{\mathcal{Y}(S)} = \{\Omega(\gamma) : \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина фазових просторів $\Omega(\gamma)$ динамічних станів $S(\gamma)$; $\tau_{\mathcal{Y}(S)} = \{\tau(\gamma) : \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина розбиттів фазових просторів $\Omega(\gamma)$, тобто $\tau(\gamma) = \{\Omega_p(\gamma) : \Omega(\gamma) = \cup_p \Omega_p(\gamma); \Omega_p \cap \Omega_q = \emptyset; p \neq q; p, q \in P(\gamma)\}$ і $P(\gamma)$ – множина індексів; $\Phi_{\mathcal{Y}(S)} = \{S(\gamma) : \gamma \in \mathcal{Y}(S)\}$ – множина динамічних станів $S(\gamma)$, що задані в фазових просторах $\Omega(\gamma)$; $\Psi_{\mathcal{Y}(S)} = \{\psi_{pq}(\gamma, \gamma')\}$ – множина відображень переходу з $\Omega_p(\gamma)$ в $\Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$ і $\Omega_p(\gamma)$ – межа $\Omega_p(\gamma)$; $\Theta_{\mathcal{Y}(S)} = \{\theta_{pq}^+, p \in P(\gamma), q \in P(\gamma')\}$ – множина функцій часових затримок переходу від структури γ до структури γ' . Функціонування урбоєкосистеми S описується послідовністю структур $\{\gamma^{(k)}\}$. Траєкторією динамічного перетворення станів $S \in X(t, t_0, X_0(\gamma)) = X_0(\gamma) \in \Omega_p(\gamma) \subset \Omega(\gamma)$. Якщо траєкторія не потрапляє на межу $\Omega_p(\gamma)$, то структура при $t \geq t_0$ залишається незмінною: $\gamma(t) = \gamma$. Якщо t_p^- – перший момент часу такий, що $X(\gamma) = X(t_p^-, t_0, X_0(\gamma)) \in \Omega_p(\gamma)$, то відображення переходу $\psi_{pq}(\gamma, \gamma')$, переводить $X(\gamma)$ в точку $X_0(\gamma') \in \Omega_q(\gamma') \setminus \Omega_p(\gamma')$, $\gamma' \in \mathcal{Y}$, $q \in P(\gamma')$ де γ', q залежать від $\gamma, p, X(\gamma), t_p^-$. Відображення може бути задано динамічним станом екосистеми. Далі в момент часу $t_q^+ = \theta_{pq}^+(\gamma, p, X(\gamma), t_p^-) \geq t_p^-$ починає діяти динамічне зображення $S(\gamma')$. При цьому з умови $t_q^+ \geq t_p^-$ випливає, що при $t_q^+ > t_p^-$ у проміжку (t_p^-, t_q^+) відбувається перемикання

структури стану, тобто в загальному випадку перемикання відбувається не миттєво.

Висновки

У результаті теоретичних досліджень розроблено математичне забезпечення комплексної діагностики рівня екологічної безпеки міст, що є інформаційною основою для прийняття ефективного управлінського рішення. Визначені теоретичні основи формування математичного моделювання динаміки змін у екосистемах.

Література

1. Мальований М. С., Шмандій В. М., Харламова О. В., Челядин Л. І., Сакалова Г. В. Аналіз та систематизація існуючих методів оцінювання ступеня екологічної небезпеки. *Екологічна безпека*. 2013. Вип. 1(15). С. 37–44.
2. Шаронова Н. В., Козуля М. М. Моделювання природно-техногенних систем та комплексна екологічна оцінка якості довкілля. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. Х.: НТУ «ХПІ» 2014. № 16 (1059). С. 76 – 81.
3. Козуля Т. В., Смельянова Д. І., Козуля М. М. Комплексна екологічна оцінка природно-техногенних комплексів на основі MIPS- і ризик-аналізу. *Восточноевроп. журн. передових технологій*. Х., 2014. № 3 (69). С. 8–14.
4. Лисиченко Г. В., Забулонв Ю.Л., Хміль Г. А. Природний, техногенний та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. *Наук. думка*, 2008. – 543 с.
5. Гадецька З. М., Кузьмич Н. В. Оцінка екологічного ризику на території України. *Ефективна економіка*. 2015. № 12. С. 46-54.
6. Щодо оцінки викликів національної безпеці в екологічній сфері. Аналітична записка Національний інститут стратегічних досліджень. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/schodo-ocinki-viklikiv-nacionalniy-bezpeci-v-ekologichniy-sferi>
7. Обиход Г. О., Омеляненко Т. Л. Методичні підходи щодо оцінки рівня екологічної небезпеки регіонів України [Електронний ресурс]. *Ефективна економіка*. 2012. №10. Режим доступу <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1429>
8. Богачов С. В. Шляхи зміцнення екологічної безпеки міста [Електронний ресурс]

Ефективна економіка. 2019. № 6. Режим доступу: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2019/15.pdf

9. Вамболь С. А., Колосков В. Ю., Деркач Ю. Ф. Оцінювання екологічного стану територій, прилеглих до місць зберігання відходів, на основі критерію екологічного резерву. *Техногенно-екологічна безпека*. 2017. Вип. 2. С. 67–72. - Режим доступу: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/JournalTechnogenicAndEcologicalSafety/Vol-2/Vambol.-Vol-2-2017-67-72.pdf>

10. Кириллов А. Н. Методы математического моделирования динамики систем со структурными изменениями в задачах экологии и рационального природопользования : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. фіз.-мат. наук : 05.13.18 – теоретичні основи математичного моделювання, чисельні методи та комплекси програм / А. Н. Кириллов; ПДУ. – Петрозаводск, 2009. – 35 с.

11. Крихівський М. В. Метод оцінювання забруднення візуального середовища міст. Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 21-22 травня 2020 року : у 2 ч. Ч. 2. Рівне : НУВГП, 2020, С. 404-407.

Referenses

1. Malovanyi M. S., Shmandii V. M., Kharlamova O. V., Cheliadyn L. I., Sakalova H. V. Analiz ta systematyzatsiia isnuichykh metodiv otsiniuvannya stupenia ekolohichnoi nebezpeky. *Ekolohichna bezpeka*. 2013. Vyp. 1(15). S. 37–44.

2. Sharonova N. V., Kozulia M. M. Modeliuvannya pryrodno-tekhnohennykh system ta kompleksna ekolohichna otsinka yakosti dovkillia. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriya: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv. Kh.: NTU «KhPI» 2014. № 16 (1059). S. 76 – 81.

3. Kozulia T. V., Yemelianova D. I., Kozulia M. M. Kompleksna ekolohichna otsinka pryrodno-tekhnohennykh kompleksiv na osnovi MIPS- i ryzyk-analizu. *Vostochnoevrop. zhurn. peredovykh tekhnolohiyi*. Kh., 2014. № 3 (69). S. 8–14.

4. Lysychenko H. V., Zabolonv Yu.L., Khmil H. A. Pryrodnyi, tekhnohennyi ta ekolohichnyi ryzyky: analiz, otsinka, upravlinnia. *Nauk. dumka*, 2008. – 543 s.

5. Hadetska Z. M., Kuzmych N. V. Otsinka ekolohichnoho ryzyku na terytorii Ukrainy. *Efektivna ekonomika*. 2015. № 12. S. 46-54.

6. Shchodo otsinky vyklykiv natsionalnii bezpetsi v ekolohichnii sferi. *Analitichna zapyska Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen*. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/schodo-ocinki-viklykiv-nacionalniy-bezpeci-v-ekologichniy-sferi>

7. Obykhod H. O., Omelianenko T. L. Metodychni pidkhody shchodo otsinky rivnia ekolohichnoi nebezpeky rehioniv Ukrainy [Elektronnyi resurs] .*Efektivna ekonomika*. 2012. №10. Rezhym dostupu <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1429>

8. Bohachov S. V. Shliakhy zmitsnennia ekolohichnoi bezpeky mista [Elektronnyi resurs] *Efektivna ekonomika*. 2019. № 6. Rezhym dostupu: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2019/15.pdf

9. Vambol S. A., Koloskov V. Yu., Derkach Yu. F. Otsiniuvannya ekolohichnoho stanu terytorii, prylehlykh do mist zberihannia vidkhodiv, na osnovi kryteriiu ekolohichnoho rezervu. *Tekhnogenno-ekolohichna bezpeka*. 2017. Vyp. 2. S. 67–72. - Rezhym dostupu: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/JournalTechnogenicAndEcologicalSafety/Vol-2/Vambol.-Vol-2-2017-67-72.pdf>

10. Kyryllov A. N. Metody matematycheskoho modelyrovannya dynamiky system so strukturyvnyu yzmenenyamy v zadachakh ekolohyy y ratsyonalnoho pryrodopolzovannya : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia dokt. fiz.-mat. nauk : 05.13.18 – teoretychni osnovy matematychnoho modeliuvannya, chyselni metody ta kompleksy proham / A. N. Kyryllov; PDU. – Petrozavodsk, 2009. – 35 p.

11. Krykhivskiy M. V. Metod otsiniuvannya zabrudnennia vizualnoho sere dovyscha mist. *Problemy ta perspektyvy rozvytku suchasnoi nauky* : zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii molodykh naukovtsiv, aspirantiv i zdobuvachiv vyshchoi osvity, m. Rivne, 21-22 travnia 2020 roku : u 2 ch. Ch. 2. Rivne : NUVHP, 2020, p. 404-407.

УДК 669.2

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-125-131

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ СТРУКТУРИ РІДИНИ (РОЗПЛАВУ) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФУНКЦІЙ РОЗПОДІЛУ

Т. О. Ваврик, О. С. Царева, О. Г. Малько, Л. М. Гобир, Н. Д. Подубинська

Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: pta@nung.edu.ua

У даній статті розглядається просторово-часове дослідження структури розплавів із застосуванням кореляційних функцій розподілу на основі фізико-хімічного аналізу. Авторами розглянуті властивості металічних розплавів та їх залежність від фізичного стану розплаву. Розглянуто динамічну структуру розплаву, поданої чисельне описання. Виділено бінарну функцію розподілу як таку, що найбільше відповідає структурі рідини. За допомогою функції атомного розподілу, якщо відомі потенціали взаємодії, можна знайти рівняння стану рідини системи, визначити її енергію, стиснення і ряд інших кінетичних і термодинамічних величин. Функція атомного розподілу дозволяє кількісно визначати параметри ближнього порядку в рідині. Авторами зазначено два підходи для теоретичного розрахунку функції атомного розподілу для кількісного визначення параметрів ближнього порядку в рідині, що базовані на інтегро-диференціальних рівняннях, які зв'язують кореляційні функції з потенціалами взаємодії.

Для реальних систем найбільш поширеними методами знаходження функції радіального розподілу є метод дифракції рентгенівських променів, нейронів або електронів. В даній статті представлені результати по дифракції рентгенівських променів розплавами Pb-Cd, розраховані функції радіального розподілу атомної густини представлені основні параметри функції радіального розподілу і результати модельної інтерпретації.

У статті доведено, що реалізація математичної моделі можлива через теоретичний розрахунок функцій розподілу. Автори взяли за основу розв'язок інтегро-диференціальних рівнянь, які включають, як рівняння повної та кореляційної функцій, так і рівняння, що пов'язує функції розподілу з парним потенціалом взаємодії. За допомогою функції радіального розподілу атомної густини на основі фізико-хімічного аналізу реалізовано запропоновану математичну модель. В результаті реалізації отримано залежності процентного вмісту атомів від координаційних чисел, розрахованих двома способами, у графічних результатах.

Ключові слова: математична модель, кореляція, структура рідини, інтегро-диференціальні рівняння, бінарна функція, функція атомного розподілу, модельна інтерпретація.

В данной статье рассматривается пространственно-временное исследование структуры расплавов с применением корреляционных функций распределения на основе физико-химического анализа. Авторами рассмотрены свойства металлических расплавов и их зависимость от физического состояния расплава. Рассмотрено динамическую структуру расплава, представленной численное описание. Выделена бинарная функция распределения как наиболее соответствующая структуре жидкости. С помощью функции атомного распределения, если известны потенциалы взаимодействия, можно найти уравнение состояния жидкости системы, определить ее энергию, сжатие и ряд других кинетических и термодинамических величин. Функция атомного распределения позволяет количественно определять параметры ближнего порядка в жидкости. Авторами отмечены два подхода для теоретического расчета функции атомного распределения для количественного определения параметров ближнего порядка в жидкости, основанные на интегро-дифференциальных уравнениях, связывающих корреляционные функции потенциалами взаимодействия.

Для реальных систем наиболее распространенными методами нахождения функции радиального распределения является метод дифракции рентгеновских лучей, нейтронов или электронов. В данной статье представлены результаты по дифракции рентгеновских лучей расплавами Pb-Cd, рассчитанные функции радиального распределения атомной плотности представлены основные параметры функции радиального распределения и результаты модельной интерпретации.

В статье доказано, что реализация математической модели возможна путем теоретического расчета функций распределения. Авторы взяли за основу решение интегро-дифференциальных уравнений, включающих, как уравнение полной и корреляционной функций, так и уравнения, связывающего функции распределения с парным потенциалом взаимодействия. С помощью функции радиального распределения атомной плотности на основе физико-химического анализа реализована предложенная математическая

модель. В результаті реалізації отримані залежності процентного вмісту атомів від координаційних чисел, розрахованих двома способами, в графічних результатах.

Ключові слова: математична модель, кореляція, структура рідкого, інтегро-диференціальні рівняння, бінарна функція, функція атомного розподілу, модельна інтерпретація.

This article considers a spatio-temporal study of the structure of melts using the correlation functions of the distribution of physical and chemical analysis. The authors consider the properties of metallic melts and their dependence on the physical state of the melt. The dynamic structure of the melt is considered, the numerical description is given. The binary distribution function is distinguished as the one that best corresponds to the structure of the fluid. With the help of the atomic distribution function, if the interaction potentials are known, it is possible to find the equation of state of a system fluid, to determine its energy, compression, and a number of other kinetic and thermodynamic quantities. The atomic distribution function allows you to quantify the parameters of the short order in a liquid. The authors indicate two approaches for the theoretical calculation of the atomic distribution function to quantify short-range parameters in a fluid based on integro-differential equations that relate correlation functions to interaction potentials.

For real systems, the most common methods of finding the radial distribution function are the method of diffraction of X-rays, neutrons or electrons. This paper presents the results of X-ray diffraction by Pb-Cd melts, calculated functions of radial distribution of atomic density, presents the main parameters of the radial distribution function and the results of model interpretation.

The article proves that the implementation of the mathematical model is possible through the theoretical calculation of distribution functions. The authors took as a basis the solutions of integro-differential equations, which include both the equation of the complete and correlation functions, and the equation that connects the distribution functions with the even interaction potential. The proposed mathematical model is implemented using the function of radial distribution of atomic density on the basis of physicochemical analysis. As a result of realization, the dependences of the percentage of atoms on the coordination numbers calculated in two ways in the graphical results are obtained.

Keywords: mathematical model, correlation, fluid structure, integro-differential equations, binary function, atomic distribution function, model interpretation.

Температурний інтервал існування металічних розплавів, як будь-якої рідини, обмежений точками кристалізації і випаровування. Займаючи проміжне місце між газом і твердим тілом, металічні розплави мають гаму властивостей, характерних як для одного, так і для іншого стану. Питома вага цих властивостей залежить від фізичного стану металічного розплаву.

В області високих температур і великих питомих об'ємів металічний розплав, як і інші рідини, наближається до газів за рядом фізико-хімічних властивостей, а за певних умов (кристалічних умовах) для даної речовини відмінність між рідким і газоподібним станом зникає. Тому при вирішенні багатьох питань в області критичних температур для рідкого стану речовин застосовують квазігазові моделі, які інколи поширюють й на більш низькі температури [1]. Особливо часто їх застосовують для металічних розплавів, в яких зв'язок між частками здійснюється колективізованими валентними електронами.

Він, як і ван-дер-ваальсовий зв'язок, напрямлений і ненасичений [2].

В області низьких температур, особливо при температурах кристалізації, металічний розплав набуває рис подібності з твердим тілом за фізичними властивостями, механізму теплового руху частинок і їх взаємному положенню.

Координаційне число в металічних розплавах залежить від температури. Цю залежність можна пояснити тепловим рухом частинок розплаву. За Я.І. Френкелем у рідині частинки здійснюють коливання такого ж типу, як і в кристалах; але в стані рівноваги, відносно якого відбуваються ці коливання, не залишаються нерухомими, як у кристалах, а з часом змінюються [3]. При тривалому перебуванні частинок у часовому положенні рівноваги визначається формулою:

$$\tau = \tau_0 \exp(U / KT),$$

де τ_0 – період коливання частинок навколо часового положення рівноваги;

U – енергія активації, яка обумовлена зв'язком розглянутих частинок із своїми сусідами і чисельно дорівнює роботі, які необхідно затратити для переходу із одного стану рівноваги в сусіднє;

K – стала Больцмана.

Зі зростанням температури, час осілого життя частинок у часовому проміжку рівноваги зменшується і при деяких температурах трансляційні і коливальні рухи стають співрозмірними.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Детальне обґрунтування близькості рідкого і твердого стану у межах температури кристалізації вперше було проведено Я. І. Френкелем в 1924 році. Він проаналізував експериментальні дані, які були на той час і загальні теоретичні дослідження таких процесів, як випаровування, дифузія і проходження електричного струму в твердих тілах при високих температурах, Я.І. Френкель зробив наступний висновок [3]:

«Плавлення рідини не глибоко змінює структуру, при плавленні зникає дальній порядок, але зберігається ближній порядок».

Подальші багато чисельні дослідження металічних розплавів [3-6] показали, що:

1) різні рідкі метали можуть мати різне упакування атомів;

2) в рідких металах поблизу температури кристалізації в невеликих областях зберігається певна впорядкованість в розміщенні атомів. При збільшенні температури ця впорядкованість розмивається;

3) в металах, які в твердому стані характеризуються щільною структурою, координаційне число при плавленні майже не змінюється, а при подальшому збільшенні температури воно зменшується;

4) в металах, які в твердому стані мають рихлу структуру, координаційне число при плавленні збільшується. Ущільнення структури ближнього порядку відбувається в деякому температурному інтервалі вище температури плавлення і досягається максимуму при $T > T_{пл}$. Координаційне число з подальшим збільшенням температури зменшується

Загалом, уявлення про структуру металічних розплавів умовно розділяють [5] на

дві групи. Розподіл залежить від того, що приймається дослідниками за структурну одиницю рідини: окремий атом (моделі статистичної теорії рідини за І. З. Фішером [3]) чи деякі угруповання атомів, коли розглядаються цілі мікроугруповання атомів без ігнорування ролі одного атому. До другої групи належать варіанти теорії мікронеоднорідної будови рідини Стюарта [7]. Окрім того, існують дослідження, в основі яких лежить прагнення здійснити аналіз та узагальнення наявних концепцій про будову структури розплавів.

Як зазначено в [5], сучасні уявлення про будову рідких металів базують на результатах рентгеноструктурного, електронно- та нейтрографічного аналізів, досліджень їх фізико-хімічних властивостей, а також на методах машинного моделювання.

Окремо виділяються дослідження застосування функції розподілу. Зокрема, зазначається, що застосування, зокрема, функцій розподілу забезпечує статистичну керованість процесу дослідження в часі [9]. З іншого боку, зазначається [10] необхідність подальшого розвитку і вдосконалення методів математичного моделювання, розробки нових ефективних методів і засобів комп'ютерної реалізації математичних моделей

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Пряме дослідження структури розплавів може бути зроблене за допомогою дифракції рентгенівського проміння, електронів або нейтронів.

Фур'є-перетворення експериментальних кривих розсіювання представляється можливістю визначення функції розподілу атомів густини, які описують взаємне розміщення частинок в рідині. Разом із тим математичне моделювання дозволяє зробити теоретичне, статистично кероване дослідження в умовах неможливості проведення експерименту.

Формулювання цілей статті

Обґрунтувати можливість теоретичного розрахунку структури рідини (розплаву), визначити шляхи реалізації математичної моделі з застосуванням функцій розподілу.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

При переході речовини із кристалічного стану в рідкий, як було сказано вище, руйнується дальній порядок у розміщенні частинок, з'являються трансляційні складові теплового руху. В рідині встановлюється своєрідна динамічна структура, яка характеризується ближнім порядком в розміщенні її складових частинок. Кількісно структура рідини описується функцією радіального розподілу атомною густиною $\rho(r)$ або радіальною функцією розподілу $w(r)$. Функція $\rho(r)$ містить основну інформацію про рівновагу структури рідини. Її розрахунок і аналіз – одна із головних задач дифракційних експериментів. Радіальну функцію $\rho(r)$ можна розрахувати й теоретично, використовуючи кореляційні функції розподілу.

В статистичній теорії просторово-часового розподілу частинок рідини задається набором кореляційних функцій розподілу F_s , які виражаються ймовірністю конфігурації з однієї, двох, трьох і більше частинок рідини в деякому об'ємі.

За Боголюбовим імовірність знаходження атомів групи S в елементах об'єм dv_1, dv_2, \dots, dv_s на відстані r_1, r_2, \dots, r_s від фіксованого атома при довільному розподілі останніх $N-S$ атомів дорівнює:

$$dP(r_1, r_2, \dots, r_s) = F_s(r_1, r_2, \dots, r_s) \cdot \frac{dV_1 dV_2 \dots dV_s}{V^s}, \quad (1)$$

де $F_s(r_1, r_2, \dots, r_s)$ – кореляційні функції розподілу, які задовольняють умову нормування:

$$\frac{1}{V^s} \int \dots \int F_s(r_1, r_2, r_3, \dots, r_s) dV_1 dV_2 \dots dV_s = 1 \quad (2)$$

і пов'язані з конфігураційною функцією Гіббса [1,2] $D_N(r_1, r_2, \dots, r_N)$, яка описує положення всіх атомів системи відношенням:

$$F_s(r_1, r_2, \dots, r_s) = V^s \int \dots \int D_N(r_1, r_2, \dots, r_N) dV_{s+1} \dots dV_N \quad (3)$$

Між кореляційними функціями різних порядків існує співвідношення:

$$F_s(r_1, r_2, \dots, r_s) = \frac{1}{V} \int F_{s+1}(r_1, r_2, \dots, r_{s+1}) dV_{s+1}, \quad (4)$$

згідно з яким для обчислення функції F_1 необхідно знати бінарну функцію F_2 , а для визначення $F_2 - F_3$ і т.д.

Із усіх кореляційних функцій найбільше значення для рідини має бінарна функція розподілу $F_2(\vec{r}_1 \vec{r}_2)$, яка представляє собою, згідно (1.2), імовірність того, що в даний момент часу одна частинка рідини знаходиться в об'ємі dV_1 біля \vec{r}_1 , а інша – в об'ємі dV_2 біля \vec{r}_2 . Для однорідних та ізотропних систем, до яких частково належать гази і більшість рідин, функція $F_2(\vec{r}_1 \vec{r}_2)$ не залежить від напрямку вектора \vec{r}_1 і \vec{r}_2 . Якщо врахувати, що в даних системах розподілу атомів навколо фіксованого є сферично-симетричним, то $F_2(\vec{r}_1 \vec{r}_2)$ буде залежати тільки від взаємної відстані між парою асиметричних атомів:

$$F_2(\vec{r}_1 \vec{r}_2) = F_2(|r_1 - r_2|) = F_2(r). \quad (5)$$

Бінарна кореляційна функція розподілу $F_2(r)$ співпадає з функцією радіального розподілу атомів $w(r)$, введеною Дебаєм для опису розташування атомів по відношенню до фіксованого.

В дифракційних дослідженнях замість радіальної функції зазвичай використовують функції розподілу атомів густини $\rho(r)$, запропоновану Церніком –Прінсом. Ці функції зв'язані між собою відношенням:

$$\rho(r) = \frac{N}{V} w(r), \quad (6)$$

де $\frac{N}{V} = \bar{\rho}$ – середня атомна густина речовини.

Добуток $4\pi \cdot r^2 \rho(r) \cdot d(r) = q(r)d(r)$ визначає середнє число атомів в шарі товщиною $d(r)$, який знаходиться на відстані r від фіксованого атома.

$q(r)$ – функція атомного розподілу.

Функція атомного розподілу дозволяє кількісно визначати параметри ближнього порядку в рідині. За положенням максимумів функції $q(r)$ визначають радіуси координаційних сфер, а за площами під максимумами – середнє координаційне число. За допомогою функції атомного розподілу, якщо відомі потенціали взаємодії, можна знайти рівняння стану рідини

системи, визначити її енергію, стиснення і ряд інших кінетичних і термодинамічних величин. Сама функція атомного розподілу (ФАР) може бути обчислена теоретично або визначена експериментально.

Для теоретичного розрахунку ФАР використовують різноманітні інтегро-диференційні рівняння, які зв'язують кореляційні функції з потенціалами взаємодії $\varphi(r)$. Можна виділити два основних напрямки розвитку цієї теорії[11]. Перший з них зв'язаний з підходом Борна-Гуріна-Івона, Кірквуда і Боголюбова. В даному підході використовується зв'язаний ланцюг рівнянь (1.4), із яких отримують рівняння Боголюбова- Борна-Гуріна-Івона (ББГІ):

$$KT\bar{V}_1 q(12) + q(12)\bar{V}_1 \varphi(12) + \rho \int \bar{V}_1 \varphi(13)q(123)d3 = 0 \quad (7)$$

де $q(123)$ – трипарна функція розподілу.

При розв'язку рівняння (1.7) частіше всього використовують суперпозицій не наближення Кірквуда, згідно якого трьохчасткова функція розподілу дорівнює добутку парних:

$$q(123) = q(12) \cdot q(23) \cdot q(31) \quad (8)$$

Фізично це означає, що в кожній трійці частинок кореляція двох не залежить від наявності третьої частинки.

Суперпозицій не наближення (1.8) дозволяє записати рівняння (1.7) в замкнутому вигляді:

$$KT\bar{V}_1 \ln q(12) + \bar{V}_1 \varphi(12) + \rho \int \bar{V}_1 \varphi(13)q(23)q(31)d3 = 0 \quad (9)$$

Другий підхід заснований на фізичному визначенні прямої і непрямої кореляції. Такі кореляції були введені Орнштейном-Церніхе, які запропонували інтегральне рівняння:

$$h(12) = c(12) + \rho \int c(13)h(23)d3, \quad (10)$$

де $h(12)$ - повна кореляційна функція;

$c(12)$ - пряма кореляційна функція.

Оскільки

$$h(12) = q(12) - 1. \quad (11)$$

Тоді формулу (1.10) можна вважати інтегральним рівнянням для парної функції розподілу $q(r)$, де також невідома функція $c(r)$. Обидві невідомі функції Перкус –Йевик зв'язав співвідношенням:

$$c(r) = q(r) \cdot [1 - \exp(\varphi(r)/KT)]. \quad (12)$$

Із рівняння (1.10) з урахуванням (1.12) можна отримати інтегральне рівняння яке зв'язує функцію розподілу з парним потенціалом взаємодії

$$q(12)e^{\varphi(12)/KT} = 1 + \rho \int [q(23) - 1]q(13) \cdot [1 - e^{\varphi(13)/KT}].$$

Рівняння (1.13) включає дві невідомі функції і для його розв'язку необхідні додаткові припущення. Тому для реальних систем найбільш поширеними методами знаходження функції радіального розподілу є метод дифракції рентгенівських променів, нейронів або електронів[12].

В даній статті представлені результати по дифракції рентгенівських променів розплавами Рb-Сd. В даній системі евтектики утворюються при 72 ат.% Рb, а перегин має місце приблизно в області еквіатомного складу. Досліджувались рідкі сплави із вмістом 10: 30: 50:72: і 90 % ат. Рb. Температури дослідження перевершували на 10 К температури ліквідус і представлені в таблиці 1.

Положення основного максимуму кривих інтенсивності (КІ) розплаву з 10 ат. % Рb відповідає $2,50 \text{ \AA}^{-1}$ і з подальшим збільшенням вмісту свинцю максимуми КІ зсуваються вліво без будь-яких аномалій. Це свідчить про відсутність суттєвих структурних змін в залежності від концентрації компоненту. Характерною рисою кривих інтенсивності є наявність на деяких із них побічного максимуму у вигляді напливу. Положення такого напливу в найбільшій степені проявляється на КІ для розплавів із вмістом 10;50 і 72 ат. % Рb. Це свідчить про переважання квазіевтектичної структури в цих рідких сплавах. Розплав із вмістом 30 ат.% Рb характеризується більш мікронеординарною структурою як із середньостатистичними мікрообластями областями, так і з групами атомів одного сорту.

На основі експериментальних КІ розраховані функції радіального розподілу (ФРР) атомної густини. Основні параметри ФРР і результати модельної інтерпретації представлені в таблиці 1.

Залежності процентного вмісту Рb від координаційного числа, розрахованого в рамках моделі середньостатистичного розподілу атомів (Z2), зображено на рис. 1 та процентного вмісту Рb від координаційного числа розрахованого в наближенні квазіевтектичного розподілу атомів (Z3) – на рис. 2.

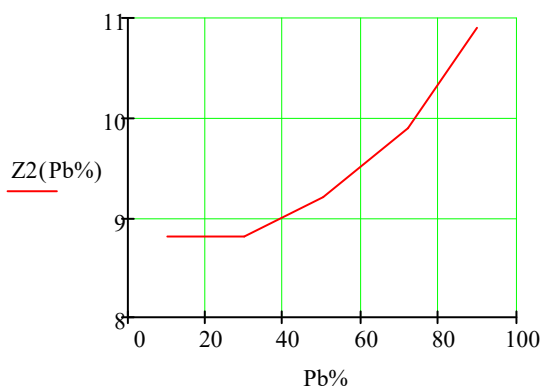


Рисунок 1 – Залежність % вмісту Pb від Z2

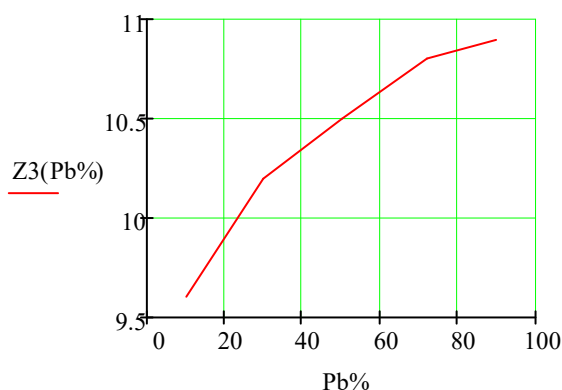


Рисунок 2 – Залежність % вмісту Pb від Z3

Таблиця 1 – Основні параметри функції розподілу і результати модельної інтерпретації

Ат., % Pb	T, K	r1	Z1	Z2	Z3
10	568	3,10	9,6	8,8	9,6
30	543	3,15	10,2	8,8	10,2
50	533	3,2	10,5	9,2	10,5
72	523	3,30	10,8	9,9	10,8
90	573	3,40	10,9	10,6	10,9

r1 – середня міжатомна відстань, визначена за ФРР;

Z1 – площа під першим координаційним максимумом функції розподілення;

Z2 – координаційне число, розраховане в рамках моделі середньостатистичного розподілу атомів;

Z3 – координаційне число, розраховане в наближенні квазівтектичного розподілу атомів

Висновок

Таким чином, реалізація математичної моделі можлива через теоретичний розрахунок функцій розподілу. В його основі лежить розв'язок інтегральних рівнянь, які включають, як рівняння повної та кореляційної функцій, так і рівняння, що пов'язує функції розподілу з парним потенціалом взаємодії. За допомогою функції радіального розподілу атомної густини на основі фізико-хімічного аналізу реалізовано запропоновану математичну модель. В результаті отримано залежності процентного вмісту атомів від координаційних чисел, розрахованих двома способами.

Список використаних джерел

1. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., 1961.
2. Бараш Ю. С. Сили Ван-дер-Ваальса. - М.: Наука, 1988. - 344 с.
3. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Ленинград: Наука, 1975.
4. Ігнатович В. М. Аналіз парадокса Гіббса. Наукові записки АН вищої школи України. 2006. Т1. С. 32-37
5. Штаблавий І. І. Кореляції вільного об'єму та структури ближнього порядку в металевих розплавах з різним ступенем мікронеоднорідності атомного розподілу. дис. на здоб. канд. фіз. наук. Львів, 2020. С. 37
6. Фишер И. З. Статистическая теория жидкостей. М., 1961. 192 с.
7. Stewart G. X-ray differentiation in liquids. Review of Modern Physics. 1930. P. 116-122. Режим доступу <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.2.116>
8. 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
9. Віткін Л. М., Ігнаткін В. У. Використання функцій розподілу ймовірностей для контролю статистично керованих процесів. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил імені І. Кожедуба. 2008. Вип. 2(17). С. 88

10. Ключка М. Особливості застосування інтегро-диференціальних рівнянь для моделювання динаміки електричних кіл. Вісник ЧДТУ. 2013. № 4. С. 59

11. Казіміров В. П., Сокольський В. Е., Роїк О. С., Самсоніков О. В. Структура неупорядкованих систем. Теорія, експериментальні методи, моделювання: Монографія. 2009. 319 с.

12. Клым Н. М., Мудрий І. С., Петрук А. А. Близний порядок в расплавах системы Pb-Cd. Физика.1982.№8. С. 109-111

11. KazImIrov V. P., Sokolskiy V. E., RoYik O. S., SamsonIkov O. V. Struktura nevporyadkovanih sistem. TeorIya, eksperimentalnI metodi, modelyuvannya: MonografIya. 2009. 319 p.

12. Klyim N. M., Mudryiy I. S., Petruk A. A. Blizhniy poryadok v rasplavah sistemyi Pb-Cd. Fizika.1982.#8. p. 109-111

References

1.Girshfelder Dzh., Kertiss Ch., Berd R. Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey. – M., 1961p.

2. Barash Yu. S. Sili Van-der-Vaalsa. - M.: Nauka, 1988. - 344 p.

3. Frenkel Ya. I. Kineticheskaya teoriya zhidkostey/ Ya. I. Frenkel. Leningrad: Nauka, 1975.

4. Ignatovich V. M. Anallz paradoksa GIbbsa. NaukovI zapiski AN vischoYi shkoli UkraYini. 2006. T1. p. 32-37

5. Shtablaviy I. I. KorelyatsIYi vIlnogo ob'Emu ta strukturi blizhnogo poryadku v metalevih rozplavah z rIznim stupenem mIkroneodnorodnostI atomnogo rozpodIlu. dis. na zdob. kand. fIz. nauk. LvIv, 2020. P. 37

6. Fisher I. Z. Statisticheskaya teoriya zhidkostey. M., 1961. 192 p.

7. Stewart G. X-ray differentiation in liquids. Review of Modern Physics. 1930. P. 116-122
режим доступу
<https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.2.116>

8. Prigunova A. S., Petrov S. S. Budova metalevih rozplavIv I YiYi vzaEmozv'yazok Iz tverdim stanom. Metaloznavstvo ta obrobka metalIv. 2016. #2. P. 17-29

9. VItkIn L. M., IgnatkIn V. U. Viktoristannya funktsIy rozpodIlu ymovIrnostey dlya kontrolyu statistichno kerovanih protsesIv. ZbIrnik naukovih prats HarkIvskogo unIversitetu PovItryanih sil ImenI I. Kozheduba. 2008. Vip. 2(17). P. 88

10. Klyuchka M. OsoblivostI zastosuvannya Integro-diferentsIalnih rIvnyan dlya modelyuvannya dinamIki elektrichnih kIl. VIIsnik ChDTU. 2013. # 4. P. 59

УДК 004.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-132-137

ВЕБ-ОРІЄНТОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЄКТАМИ ЗА МЕТОДОЛОГІЄЮ AGILE

Т. В. Кривцун, М. О. Слабінога, Я. І. Заячук

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

Робота присвячена розробці веб-орієнтованої системи підтримки моніторингу виконання та управління невеликими проєктами, що виконуються за методологією agile (зокрема, в галузі інформаційних технологій). Моніторинг виконання проєктів є важливим фактором їх успіху, що в подальшому позитивно впливає на прибутки компанії та економіки країни в цілому. Були проаналізовані існуючі рішення в галузі керування проєктами: розглянуто основні моделі ведення проєктів, а також основні програмні засоби їх реалізації, їх переваги та недоліки. Було сформовано задачу щодо розробки веб-орієнтованої системи моніторингу та керування проєктами за методологією Agile. Було вибрано програмні засоби реалізації системи та спроектовано структуру бази даних. Програмне забезпечення серверної частини було реалізовано з використанням архітектури "модель - вигляд - контролер", для чого було розроблено UML-діаграми відповідних компонентів системи. Розроблене серверне програмне забезпечення використовує програмний інтерфейс з відповіддю на запити у форматі JSON, що дозволяє в подальшому розробити крім веб-інтерфейсу ще і мобільні застосунки. Веб-інтерфейс, реалізований засобами фреймворка Angular реалізовує основні функції для користувачів та адміністраторів системи, такі як керування сутностями, авторизація та реєстрація, а також містить в собі аналітичний інструмент для моніторингу виконання проєкту, а саме діаграму згорання. Розроблене програмне забезпечення буде корисним для невеликих проєктів, що використовують Agile-методології як частково, так і повністю, та у яких немає потреби у складних комплексних інструментах, що потребують тривалого процесу налаштування. Реалізація даної системи як веб-орієнтованого додатку дає змогу використовувати її як зі стаціонарних комп'ютерів, так і з мобільних пристроїв.

Ключові слова: керування проєктами, agile-методологія, веб-орієнтована система, діаграма згорання, клієнт-серверна архітектура.

Работа посвящена разработке веб-ориентированной системы поддержки мониторинга выполнения и управления небольшими проектами, которые ведутся по методологии agile (в частности, в области информационных технологий). Мониторинг выполнения проектов является важным фактором их успеха, что в дальнейшем положительно влияет на доходы компании и экономики страны в целом. Были проанализированы существующие решения в области управления проектами: рассмотрены основные модели ведения проектов, а также основные программные средства их реализации, их преимущества и недостатки. Было сформирована задача по разработке веб-ориентированной системы мониторинга и управления проектами по методологии Agile. Были выбраны программные средства реализации системы и спроектирована структура базы данных. Программное обеспечение серверной части было реализовано с использованием архитектуры "модель - вид - контроллер", для чего были разработаны UML-диаграммы соответствующих компонентов системы. Разработанное серверное программное обеспечение использует программный интерфейс с ответом на запросы в формате JSON, что позволяет в дальнейшем разработать кроме веб-интерфейса еще и мобильные приложения. Веб-интерфейс, реализованный средствами фреймворка Angular реализует основные функции для пользователей и администраторов системы, такие как управление сутностями, авторизация и регистрация, а также содержит в себе аналитический инструмент для мониторинга выполнения проекта, а именно диаграмму сгорания. Разработанное программное обеспечение будет полезным для небольших проектов, использующих Agile-методологии как частично, так и полностью, и в которых нет необходимости в сложных комплексных инструментах, требующих длительного процесса настройки. Реализация данной системы как веб-ориентированного приложения позволяет использовать ее как со стационарных компьютеров, так и с мобильных устройств.

Ключевые слова: управление проектами, agile-методология, веб-ориентированная система, диаграмма сгорания, клиент-серверная архитектура.

The work is devoted to the development of a web-based support system for monitoring the implementation and management of small projects implemented according to the agile methodology (in particular, in the field of information technologies). Monitoring the implementation of projects is an important factor in their success, which in turn has a positive impact on the company's profits and the economy as a whole. Existing solutions in the field of project management were analyzed: the main models of project management were considered, as well as the main software tools for their implementation, their advantages and disadvantages. The task of developing a web-based system for monitoring and project management according to the Agile methodology was formed. The software tools for the system implementation were selected and the database structure was designed. The software of the server part was implemented using the architecture "model - view - controller", for which UML-diagrams of the relevant components of the system were developed. The developed server software uses a software interface with response to requests in JSON format, which allows you to further develop in addition to the web interface and mobile applications. The web interface implemented by the Angular framework implements basic functions for users and system administrators, such as entity management, authorization and registration, and includes an analytical tool for monitoring project performance, namely the burn-out chart. The developed software will be useful for small projects that use Agile methodologies, both partially and completely, and which do not require complex tools that require a long setup process. Implementing this system as a web-based application allows you to use it from both desktop computers and mobile devices.

Keywords: project management, agile-methodology, web-oriented system, burn-out chart, client-server architecture.

Моніторинг та керування проектами (зокрема, в галузі інформаційних технологій), є важливим фактором успішного розвитку бізнесу та економіки країни в цілому. Так, згідно звіту Standish Group[1], середня частка успішних проектів протягом різних років коливалася в межах 30-35%, проектів, у яких виникали труднощі - 45-50%, повністю провалених проектів - 15-20%. Високий відсоток проектів, які не є успішними, тягне за собою збільшення витрат на утримання проектів, зниження потенційних прибутків та відтік інвестицій. Саме тому задача моніторингу та керування процесу виконання проекту є дуже важливою.

На сьогоднішній день, існує велика кількість методологій та моделей виконання проектів: інкрементна модель, V-модель, b-модель, каскадна модель, тощо [2]. Кожна з моделей має свої переваги та недоліки, однак будь-яке виконання проекту згідно таких моделей має під собою одне і те ж підґрунтя - розділення великих задач на дрібні завдання, конверсія їх в технічні вимоги та подальша реалізація і апробація. Найпопулярнішими, при цьому, для проектів в галузі інформаційних технологій, залишаються інкрементні моделі, зокрема методологія Scrum, що відноситься до agile-методологій. Так, за даними Forbes[3], згідно проведеного опитування, близько 50% респондентів з різних компаній зазначили, що використовують Scrum у більш ніж половині проектів. Згідно того ж опитування, частка успішних проектів, що велися за допомогою

Scrum, складає 62%, що пояснюється тим, що Scrum дозволяє відносно легко моніторити основні показники ефективності команди при реалізації проекту [4-5].

Для програмної підтримки методологій Agile реалізована велика кількість програмних продуктів, зокрема Jira та Redmine. Ці програмні продукти забезпечують комплексний підхід до ведення великих проектів та моніторингу роботи команди. При цьому, слід зазначити, що обидва ці продукти є доволі складними у налаштуванні, мають багато надбудов та часто є надто складними для ведення малих проектів, що виконуються за 2-3 спринти. Крім того, малі проекти часто застосовують технологію Scrum фрагментарно, користуючись тільки окремими її артефактами (спринтами, командними ролями, беклогом), а також мають незначні відхилення по термінах виконання. Тому розробка простого та інтуїтивно зрозумілого програмного забезпечення, що підтримує моніторинг та керування проектом за методологією Scrum, є важливим завданням, яке і лягло в основу технічних вимог до програмного продукту, що розроблявся.

Розробку програмного забезпечення було розділено на дві частини. Для написання серверної частини було вибрано фреймворк Laravel, написаний на мові серверного програмування PHP. Для написання клієнтської частини було вибрано популярний фронтенд фреймворк Angular, реалізований на динамічній мові Javascript. Обидві частини реалізації було

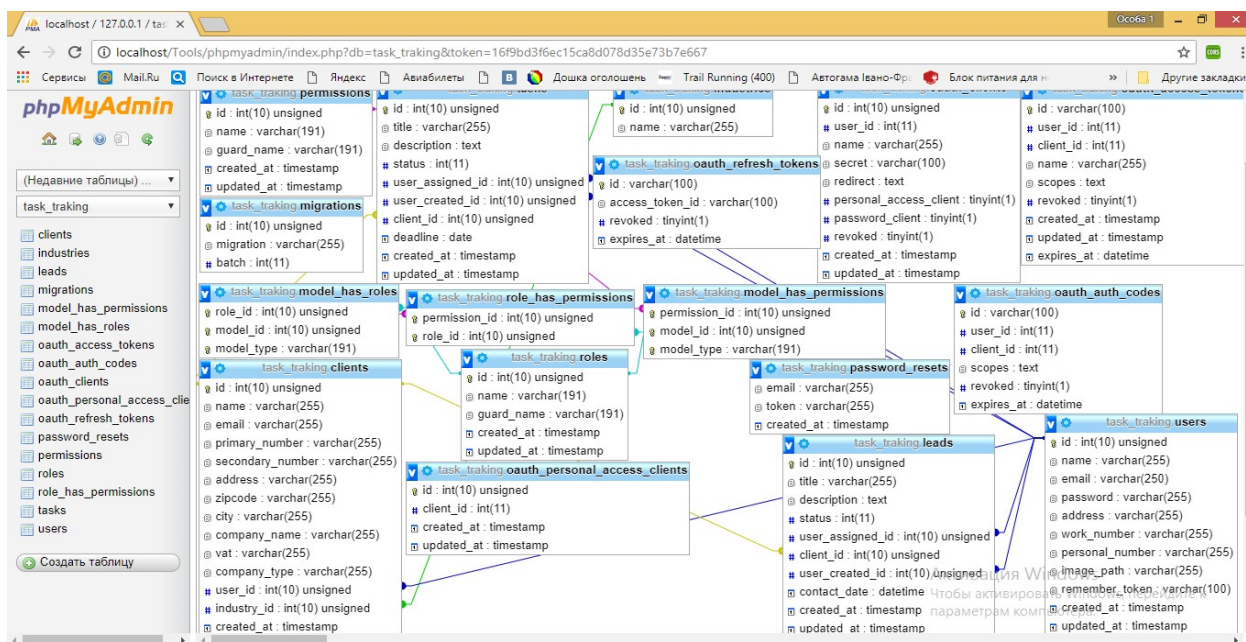


Рисунок 1 — Загальна схема бази даних системи

виконано з використанням принципів побудови архітектури MVC (модель - вигляд - контроллер), що дозволяло структуровано та зрозуміло подати структуру системи та взаємодію її основних компонентів. Структура бази даних подана на рис. 1. Для роботи з базою даних було реалізовано наступні моделі:

- Client – модель клієнтів;
- Lead – модель замовлень;
- Task – модель завдань;
- User – модель користувачів;
- Role – модель ролей;
- Permission – модель прав;
- Vote - модель голосування;
- Sprint - модель спринтів.

Для керування моделями було розроблено ряд класів-контролерів, а саме:

- ClientsController - використовується для роботи з даними клієнтів. Він працює з моделлю Client та використовується для реалізації вибірки, створення, модернізації та видалення клієнтів з бази даних;

- LeadsController - використовується для роботи з замовленнями. Він призначений для роботи з замовленнями. Працює з моделями: Lead (використовується для роботи з замовленнями), Client (для роботи з клієнтами), User (для роботи з користувачами), Sprint (для роботи зі спринтами);

- RolesController використовується для роботи з рольовою системою. Він працює з моделями: Role (працює з ролями користувачів в системі) та Permission (призначена для роботи з правами користувачів конкретних ролей щодо дій у системі);

- SprintsController використовується для роботи з блоками задач (спринтами). Він працює з моделями: Lead, Vote, User, Sprint;

- TasksController використовується для роботи з завданнями. Працює з моделями: Task, User, Sprint, Client, Vote;

- UsersController використовується для роботи з користувачами. Працює з моделями User і Role.

Приклад UML-діаграми класів для одного з контролерів подано на рис. 2.

Для створення проекту на Laravel framework, було міграції для необхідних таблиць в бази даних, відповідно до розробленої структури майбутньої системи. Механізм міграцій дозволяє за допомогою засобів фреймворка написати структуру таблиці, яку потім можна, за допомогою консолі, занести в базу даних.

Після цього були реалізовані CRUD (create, read, update, delete) функції для всіх основних таблиць з даними, а саме для таблиць: tasks, clients, sprints, leads, users.

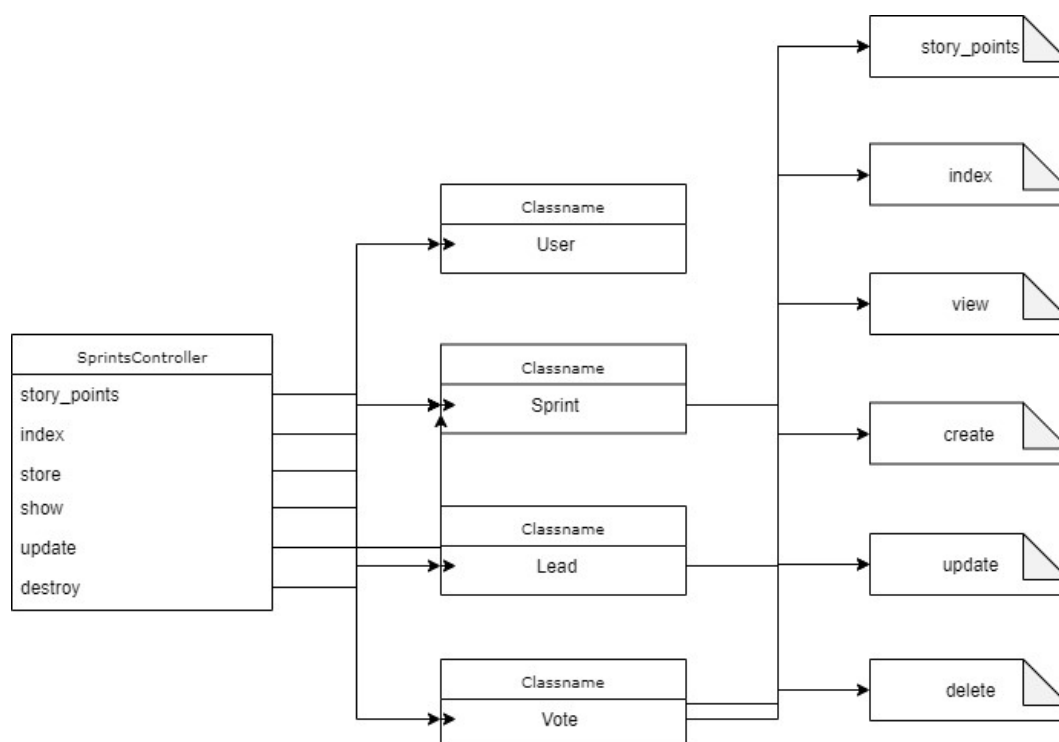


Рисунок 2 — Реалізація контролера системи на прикладі контролера спринтів

Крім того, була реалізована система авторизації та реєстрації користувача. Авторизація відбувалася стандартними механізмами Laravel, а можливість додавати нового користувача було відкрито тільки для адміністратора системи. Весь функціонал авторизації та реєстрації було реалізовано методами та засобами Laravel-модуля Laravel-passport authentication. Реалізацію було здійснено в методах класу UsersController.

Серверне програмне забезпечення реалізує взаємодію із клієнтськими інтерфейсами з допомогою API (програмного інтерфейсу додатку) та виводить відповіді в форматі JSON. Це дозволяє використовувати дане серверне програмне забезпечення для опрацювання даних та забезпечення роботи користувачів через широкий спектр інтерфейсів - як веб-орієнтованих, так і нативних додатків для операційних систем мобільних та настільних пристроїв. Це дозволяє спростити доступ користувачів до інформації, що знаходиться в базі даних [6].

Користувацький інтерфейс, що початково розглядався для вирішення даної задачі, реалізований засобами Angular. UML-діаграма подій подана на рис. 3. Приклад реалізації

сторінок клієнтського інтерфейсу поданий на рис. 4.

Клієнтський інтерфейс забезпечує такі функції як:

- додавання, редагування та видалення клієнтів;
- додавання, редагування та видалення користувачів;
- авторизація користувачів;
- додавання, редагування та видалення ролей;
- оцінювання складності завдань учасниками команди;
- додавання, редагування та видалення завдань;
- додавання, редагування та видалення спринтів.

Додатково, як основний інструмент оперативного аналізу успішності виконання спринтів, була реалізована діаграма згоряння з відображенням кількості завдань, що залишилися для виконання у спринтів, лінії “ідеального” виконання спринта та прогнозованого часу виконання, базуючись на даних поточного дня.

Приклад діаграми згоряння подано на рис. 5.

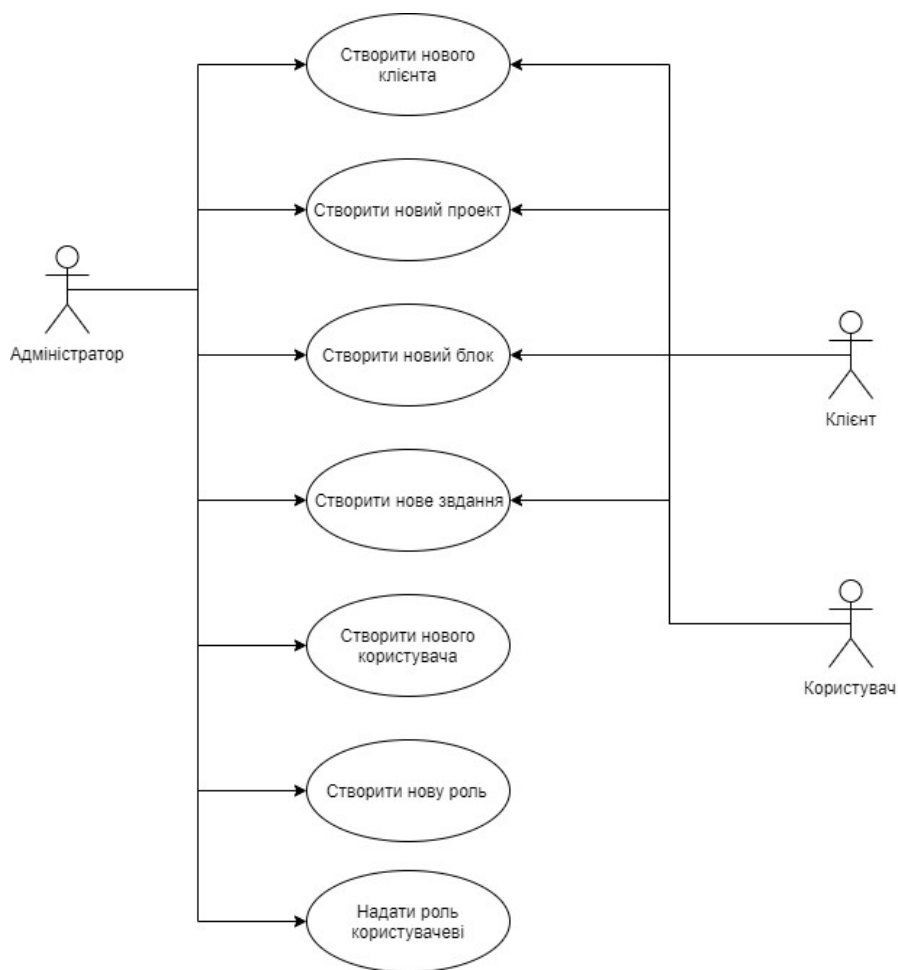


Рисунок 3 — UML-діаграма подій в розробленій системі

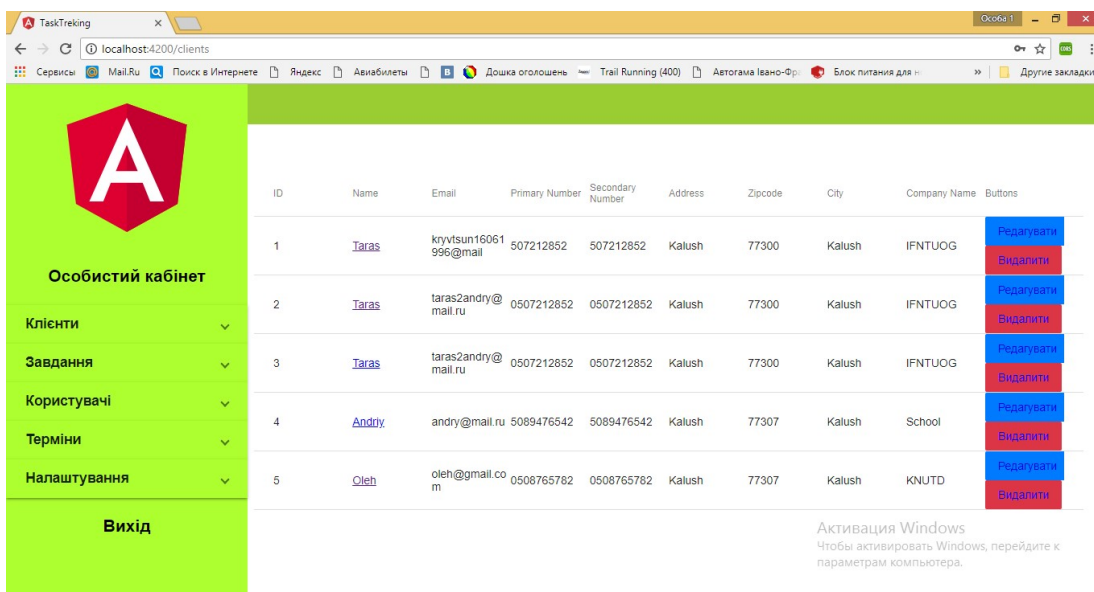


Рисунок 4 — Приклад роботи інтерфейсу користувача

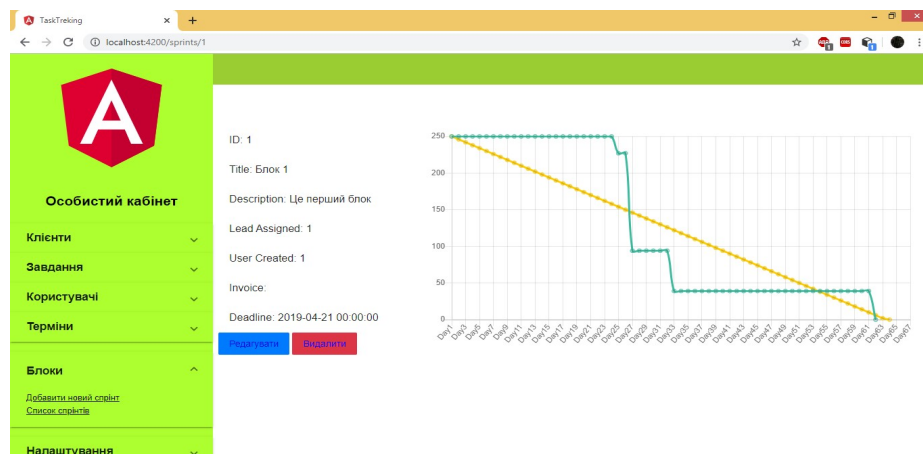


Рисунок 5 — Реалізація діаграми згоряння у веб-інтерфейсі користувача

Розроблений інструмент аналізу дозволяє керівнику проекту слідкувати за ходом виконання завдань спринта, та при потребі, коригувати графік, згідно прогнозованої дати завершення всіх завдань спринта.

Розроблена система виконана з доволі мінімалістичним набором інструментів, порівняно програмним забезпеченням Jira або Redmine, однак забезпечує всі необхідні інструменти для підтримки ведення проектів за інкрементними моделями. Архітектура MVC може бути легко масштабована та доповнена новими модулями та розширеннями, а програмний інтерфейс серверного забезпечення дозволяє окрім веб-інтерфейсу, в перспективі підключити інші клієнтські інтерфейси, як-то чат-боти чи мобільні додатки. Розроблене програмне забезпечення буде корисним для виконання невеликих проектів, що тривають декілька спринтів, та в яких частка роботи адміністративного персоналу є невеликою порівняно із технічними працівниками та інженерами з розробки програмного забезпечення.

Література

1. Rao BV, Seetharamaiah P. Organizational strategies and social interaction influence in software development effort estimation. J Comput Eng 2014;16(2) p. 29-40.
2. James Cadle. Project management for Information systems. - Pearson, 2008. - 465 p.
3. Agile: The World's Most Popular Innovation Engine [Electronic Resource]. Access mode: <https://www.forbes.com/sites/stevedenning/>

2015/07/23/the-worlds-most-popular-innovation-engine/?sh=3b8864ea7c76

4. Показники ефективності KPI для працівників галузі IT технологій. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://habr.com/ru/post/22536/>

5. Які KPI можна вимірювати, якщо бюджет проекту і розклад не дуже важливі? [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://habr.com/ru/post/135652/>

6. Chris Lee. Working with Web APIs. - Launch School, 2006.- 563 p.

References

1. Rao BV, Seetharamaiah P. Organizational strategies and social interaction influence in software development effort estimation. J Comput Eng 2014;16(2):29-40.
2. James Cadle. Project management for Information systems. - Pearson, 2008. - 465 p.
3. Agile: The World's Most Popular Innovation Engine [Electronic Resource]. Access mode: <https://www.forbes.com/sites/stevedenning/>
4. Pokazniki effektivnosti KRI dlya pratsivnikov galuzi IT tehnologiy. [Elektronniy resurs] Rezhim dostupu: <https://habr.com/ru/post/22536/>
5. 2. Yaki KRI mozhna vimiryuvati, yakscho byudzheth proektu i rozklad ne duzhe vazhlyvi? [Elektronniy resurs] Rezhim dostupu: <https://habr.com/ru/post/135652/>
6. Chris Lee. Working with Web APIs. - Launch School. 2006.- 563 p.

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, сформувавши 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.
6. **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**, в яких започатковано вирішення даної проблеми і на які посилається автор.
7. **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**, якій присвячується стаття.
8. **Формулювання цілей статті** (постановка задачі і методів досліджень, що розглядаються).
9. **Висвітлення основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням 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 максимально 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 загально визнаним нормам нафтогазової галузі.
10. **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.

11. Список використаних джерел слід оформити відповідно до правил для авторів, заснованих на ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Також **необхідно подати транслітерацію літератури REFERENCES.**

Ресурс для транслітерації з української мови – <http://ukrlit.org/transliteratsiia/>

Ресурс для транслітерації з російської мови – <https://translate.meta.ua/translit/>

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 10, міжрядковий інтервал – 1,0. Повинна містити не менш як 1800 знаків.

Основний текст набирається таким чином:

2.1. Стил ь “звичайний”, гарнітура – Times New Roman (Cyr), кегль 11, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

2.2. Відбивки по тексту не використовуються за винятком підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відокремлюються відбивками “перед” – 9, “після” – 6).

3. Для набирання формул використовується редактор формул **Math Type (версії не нижче 6.x або Equation v. 3.0)** Стили: **Text** – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** – Times New Roman (Cyr), italic, L.C.Greek – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** – Times New Roman (Cyr), **Number** – Times New Roman (Cyr). Розміри: **Full** – 11, **Subscript/Superscript** – 8, **Sub-Subscript/Superscript** – 8, **Symbol** – 14, **Sub-Symbol** – 10.

Забороняється використовувати вбудований у MS Office версії 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 (Сур), 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 165мм!!!

5. Ілюстрації до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані у растровому (векторному) форматах (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF, PSD, 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.



**Видавництво Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
тел. (03422) 547266, факс (03422) 547139,
<http://nung.edu.ua>, e-mail: admin@nung.edu.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ІФ № 18 від 12.03.2002 р.**

**Підписано до друку 15.07.2021 р. Формат 60×90^{1/8} Папір офсетний
Ум. друк. арк. 16,5 Тираж 300 прим. Замовл. № 56**