

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

№ 2 (45) 2020

Видається з 1997 р.

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 Паска 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 Ярук В. О.

PhD, prof. Rzata Mariusz

DrSc, prof. Wojcik Waldemar

Dr hab, prof. Gerhard Mook

Адреса редакції

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

Редактори

Н. Р. Стешок, О. О. Роспопа
Електронна верстка
Б. С. Незамай, О. С. Царева,
М. О. Слабінога,
Подубинська Н. Д.

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

Х. В. Паньків, Ю. В. Паньків ВИКОРИСТАННЯ ЗГОРТКОВОЇ
ГЛИБОКОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ
СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗА ПЕРЕМІЩЕННЯМИ
ЇХ ПОВЕРХНІ 5

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

О. Т. Чернова АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ВСТАНОВЛЕННЯ ТИПОВИХ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ І МОНТАЖНИХ СХЕМ ОБ'ЯЗКИ ГИРЛА
СВЕРДЛОВИН ПСГ ПРОТИВИКИДНИМ ОБЛАДНАННЯМ 13

М. О. Слабінога, А. Б. Гавриш, Н. В. Іванків АПАРАТНЕ ТА
ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ
ПОВІТРЯ В ПРИМІЩЕННІ 26

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

В. В. Лопатін ДОСТОВІРНІСТЬ І НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ В МОБІЛЬНИХ
СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ 32

В. М. Юрчишин МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОГО
КОМПЛЕКСУ 40

О. В. Кучмистенко ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ
ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ НА ЗАСАДАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ 58

М. І. Горбійчук, М. І. Козутяк, В. С. Борин ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ
МЕТОДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ
ДОСЛІДЖЕННІ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТІВ 66

С. О. Максим'юк, О. М. Карпаш КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА
ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ 82

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

М. І. Горбійчук, О. Т. Лазорів, А. М. Лазорів КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО
КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ 90

В. М. Гарасимів АЛГОРИТМ НАЛАШТУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ІЗ
ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ..... 102

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В. А. Ровінський, О. В. Євчук РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ
АНАЛІТИЧНИХ МЕРЕЖ 109

С. М. Бабчук МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ВІД
ДОВЖИНИ СЕГМЕНТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ SS-LINK 119

І. Р. Михайлюк, Т. О. Ваврик, О. С. Царева, Н. Д. Подубинська ЩОДО БУДОВИ РОЗПЛАВІВ
ЕВТЕКТИЧНИХ СИСТЕМ: ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ОПИСУ
СТРУКТУРИ РІДИНИ..... 125

Л. О. Потеряйло, В. В. Процюк, К. І. Кравців ЗНАННЯ ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ
РІШЕНЬ В МОДЕЛЮВАННІ ТРЕНАЖЕРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ 132

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ 146

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

№2 (45) 2020
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. Gorbychuk, 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.
O. R. Nykyforchyn, Dr. of Phys.-math Sc.
S. I. Osadchy, Dr. of Technical Sc
M. S. Pasyeka, PhD.
A. V. Rudakov, Dr. of Technical Sc.
G. N. Sementsov, Dr. of Technical Sc.
A. A. Szymik, 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,
N. D. Podubynska

State Registration Certificate
KB № 15834 - 4306 Regions
Of 16.10.2009

The journal is listed as
a scientific professional publication
in Ukraine (№ 1-05/5 of 18.11.2009,
Branch of science, profession -
engineering)
1643, 28.12.2019

CONTENT

METHODS AND EQUIPMENT OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

H. V. Pankiv, Y. V. Pankiv USE OF A ROLLED DEEP NEURAL NETWORK TO DETERMINE THE CHANGE OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF VERTICAL STEEL CYLINDERAL TANKS BY THE MOVEMENT OF THEIR SURFACE..... 5

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

O. T. Chernova ANALYSIS OF METHODS OF INSTALLATION OF TYPICAL TECHNOLOGICAL AND ASSEMBLY SCHEMES OF OBLIGATION OF THE MOUTH OF WELLS PSG ANTI-DISPOSAL EQUIPMENT..... 13
M. O. Slabinoga, A. B. Havrysh, N V, Ivankiv HARDWARE AND SOFTWARE OF THE INDOOR AIR QUALITY MONITORING SYSTEM..... 26

METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

V. V. Lopatin RELIABILITY AND UNCERTAINTY IN MOBILE CONTROL SYSTEMS..... 32
M. I. Gorbychuk, O. T. Bila, N. T. Lazoriv, A. M. Lazoriv METHODOLOGICAL APPROACHES TO QUALITY ASSESSMENT OF SOFTWARE FOR OIL AND GAS COMPLEX OBJECTS..... 40
O. V. Kuchmystenka IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED SYSTEM OF CONTROL FOR OIL TRANSPORTATION PROCESS ON THE BASIS OF INTELLECTUAL TECHNOLOGIES..... 58
M. I. Gorbychuk, M. I. Kohutiak, V. S. Boryn IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED SYSTEM OF CONTROL FOR OIL TRANSPORTATION PROCESS ON THE BASIS OF INTELLECTUAL TECHNOLOGIES..... 66
S. O. Maksymiuk, O. M. Karpash COMPUTER SYSTEM FOR OPTIMAL CONTROL OF GAS PUMPING UNITS OF NATURAL GAS..... 82

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

<i>M. I. Gorbiychuk, O. T. Lazoriv, A. M. Lazoriv</i> COMPUTER SYSTEM FOR OPTIMAL CONTROL OF GAS PUMPING UNITS OF NATURAL GAS	90
<i>V. M. Harasymiv</i> ALGORITHM OF ADJUSTMENT OF SUB-REGULATOR COEFFICIENTS WITH FUZZY LOGIC METHODS USING	102

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE UNDESTROYED CONTROL PROBLEMS

<i>V. A. Rovinskiy, O. B. Yevchuk</i> REVERSE ENGINEERING OF NONLINEAR SYSTEMS USING ANALYTICAL NETWORKS	109
<i>S. M. Babchuk</i> MATHEMATICAL MODEL OF DEPENDENCE OF DATA TRANSMISSION SPEED ON THE LENGTH OF THE SPECIALIZED COMPUTER NETWORK SS-LINK SEGMENT D	119
<i>I. R. Mykhailiuk, T. O. Vavryk, O. S. Tsareva, N. D. Podubynska</i> ON THE STRUCTURE OF EUTHECTIC SYSTEMS MELTINGS: THEORETICAL ASPECTS OF MODEL REPRESENTATION OF THE LIQUID STRUCTURE DESCRIPTION	125
<i>L. O. Poteriailo, V.V. Protsiuk, K. I. Kravtsiv</i> KNOWLEDGE-ORIENTED DECISION-MAKING METHODS IN SIMULATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS SIMULATORS	132
REQUIREMENTS FOR THE ARTICLE	146

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 004.896; 620.162.4

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-5-12

ВИКОРИСТАННЯ ЗГОРТКОВОЇ ГЛИБОКОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗА ПЕРЕМІЩЕННЯМИ ЇХ ПОВЕРХНІ

Х.В. Паньків, Ю.В. Паньків*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, khrystyna.pankiv@nung.edu.ua*

Основне місце у визначенні механічних характеристик матеріалу РВС займають методи та засоби контролю НДС, до яких належать метод коерцитивної сили; метод магнітної анізотропії; метод на основі ефекту Баркгаузена, метод магнітної пам'яті металу (МПМ), тензометричний метод. Перевагами магнітних методів є можливість проведення контролю без виведення РВС з експлуатації, безпечність. До недоліків, властивих майже всім магнітним методам контролю, відносять необхідність підготовки контрольованої поверхні, складність визначення положення давачів по відношенню до дії максимальних навантажень, залежність результатів контролю від способів і умов вимірювання, вплив повітряного прошарку між давачем і контрольованою поверхнею на точність вимірювання. Показано, що для визначення можливості подальшої безпечної експлуатації вертикальних сталевих циліндричних резервуарів необхідно знати їх напружено-деформований стан. Виділено недоліки існуючих експериментальних та математичних методів його оцінки. Запропоновано використовувати згорткову глибоку нейромережу для визначення напруженого стану вертикального сталевого циліндричного резервуару. В якості вхідних даних пропонується використовувати дані про переміщення його стінки отримані, наприклад, в результаті геометричного калібрування в два моменти часу. Вхідні дані подаються у вигляді масиву розмірністю 8×12 , далі використовується згортка і макс-пулінг. Останній шар є повнозв'язним. В якості функції вартості пропонується використовувати перехресну ентропію. Для збільшення кількості навчальних даних пропонується використовувати значення переміщень та напружень, отриманих шляхом моделювання різних впливів на циліндричний резервуар з різними дефектами форми з використанням пакету SolidWorks. Визначено шляхи вдосконалення запропонованого методу. Для подальших досліджень та вдосконалення запропонованого методу можна пробувати використовувати в нейромережі інші гіперпараметри, зокрема змінювати кількість карт ознак, розміри локального рецептивного поля, розмір кроку зсуву рецептивного поля та інші. Також можна пробувати використовувати вихідний шар з іншою кількістю нейронів та softmax в якості функції вартості.

Ключові слова: *глибока нейромережа; згортка; пулінг; перехресна ентропія.*

Показано, что для определения возможности дальнейшей безопасной эксплуатации вертикальных стальных цилиндрических резервуаров необходимо знать их напряженно-деформированное состояние. Выделены недостатки существующих экспериментальных и математических методов его оценки. Предложено использовать сверточную глубокую нейросеть для определения напряженного состояния вертикального стального цилиндрического резервуара. В качестве входных данных предлагается использовать данные о перемещении его стенки полученные, например, в результате геометрической калибровки в два момента времени. Входные данные представляются в виде массива размерностью 8×12 , далее используется свертка и макс-пулинг. Последний слой является полносвязным. В качестве функции стоимости предлагается использовать перекрестную энтропию. Для увеличения количества учебных данных предлагается использовать значения перемещений и напряжений, полученных путем моделирования различных воздействий на цилиндрический резервуар с различными дефектами формы с использованием пакета SolidWorks. Определены пути совершенствования предложенного метода. Для дальнейших исследований и

совершенствования предложенного метода можно пробовать использовать в нейросети другие гиперпараметры, в частности изменять количество карт признаков, размеры локального рецептивного поля, размер шага смещения рецептивного поля и другие. Также можно пробовать использовать выходной слой с другим количеством нейронов *softmax* в качестве опции стоимости.

Ключевые слова: глубокая нейросеть; свертка; пулинг; перекрестная энтропия.

The main place in determining the mechanical characteristics of the RVS material is occupied by methods and means of VAT control, which include the method of coercive force; magnetic anisotropy method; Barkhausen method, magnetic metal memory (MPM) method, strain gauge method. The advantages of magnetic methods are the ability to control without decommissioning the RVS, safety. The disadvantages inherent in almost all magnetic control methods include the need to prepare the controlled surface, the difficulty of determining the position of the sensors in relation to the maximum loads, the dependence of control results on methods and conditions of measurement, the influence of the air layer between the sensor and the controlled surface. It's shown that to determine the further safe operation possibility of vertical steel cylindrical tank it is necessary to know their stress-strain state. The shortcomings of the existing experimental and mathematical methods of its estimation were highlighted. It's proposed to use a convolutional deep neural network to determine the stress state of a vertical steel cylindrical tank. As input data, it's proposed to use data on the movement of its wall obtained, for example, as a result of geometric calibration at two points in time. The input data was presented in the form of an array of dimensions 8x12, then used convolution and max-pulling. The last layer is fully connected. It's proposed to use cross-entropy as a cost function. To increase the amount of training data, it is proposed to use the values of displacements on stresses obtained by modeling different effects on a cylindrical tank with different shape defects using the SolidWorks package. Possible ways to improve the proposed method are proposed.

For further research and improvement of the proposed method, you can try to use other hyper parameters in the neural network, in particular to change the number of feature maps, the size of the local receptive field, the size of the shift step of the receptive field and others. You can also try using the source layer with a different number of neurons and softmax as a function of cost.

Key words: deep neural network; convolution; pooling; cross entropy.

Вступ

Вертикальні сталеві циліндричні резервуари (РВС) – це об'єкти підвищеної небезпеки. Вони працюють під впливом багатьох зовнішніх та внутрішніх факторів, які зумовлюють їх складний напружено-деформований стан (НДС). Значна частина вертикальних сталевих резервуарів (РВС) на території України знаходяться в експлуатації протягом тривалого часу та потребують проведення регулярного діагностування їх стану з метою виявлення можливості продовження їх безпечної роботи.

За даними [1] встановлено, що реальна кількість аварій резервуарів в 3-5 разів перевищує кількість зареєстрованих. Руйнування резервуара спричинює масштабні руйнування, часто призводить до людських жертв, а матеріальні збитки іноді перевищують вартість самої споруди у 500 разів [2]. Іноді руйнуються не лише окремі елементи резервуара, а і вся конструкція, що призводить до витоку продуктів зберігання спричинює екологічну катастрофу [3].

Дані технічного обстеження та дефектоскопії резервуара і його елементів необхідні для визначення можливості і режимів його подальшої експлуатації. Терміни, періодичність і об'єм обстеження

технічного стану металевих резервуарів залежно від тривалості експлуатації і виду продукту, що зберігається, визначені в ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008 “Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів” [4].

Незважаючи на високий рівень розвитку методів дефектоскопії РВС аварії продовжують траплятися. Відомі випадки, коли аварії траплялися навіть на ділянках, які були щойно обстежені, а конструкції зі значними дефектами продовжували працювати [5]. Дані дефектоскопії та дефектометрії недостатньо для визначення ступеня небезпечності дефекту. Потрібна додаткова інформація про НДС РВС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розрахунок конструкцій резервуарів виконують за граничним станом згідно ДБН В.1.2-14[6].

Основне місце у визначенні механічних характеристик матеріалу РВС займають методи та засоби контролю НДС, до яких належать метод коерцитивної сили; метод магнітної анізотропії; метод на основі ефекту Баркгаузена, метод магнітної пам'яті металу (МПМ), тензометричний метод. Перевагами магнітних методів є можливість проведення контролю без виведення РВС з експлуатації, безпечність. До недоліків, властивих

майже всім магнітним методам контролю, відносять необхідність підготовки контрольованої поверхні, складність визначення положення давачів по відношенню до дії максимальних навантажень, залежність результатів контролю від способів і умов вимірювання, вплив повітряного прошарку між давачем і контрольованою поверхнею на точність вимірювання [7, 8].

Також для вимірювання напружень використовують тензометрію. До переваг тензорезистивного методу відносять відсутність істотного впливу зовнішніх умов на результати вимірювання. Основними недоліками методу є необхідність безпосереднього контакту приладів з контрольованою поверхнею, вимірювання лише відносних деформацій, можливість вимірювання напружень тільки в окремих локальних площадках, що ускладнює їх застосування для таких крупногабаритних об'єктів, якими є РВС.

Окрім експериментальних, існують також математичні методи контролю НДС РВС. Згідно з ДБН В.2.6-163 2010 [9] проводиться повірочний розрахунок стінки РВС на міцність та на стійкість. Цей метод не дає можливості визначити фактичний НДС резервуара, тому що тут враховується лише тиск речовини, що зберігається та товщина стінки, а не фактичні навантаження, які діють на резервуар і дефекти його форми. Також результатами обчислень є усереднені значення кожного поясу, а не значення в кожній точці поверхні стінки.

До математичних методів дослідження НДС резервуарів можна віднести аналітичні та чисельні методи. В основі аналітичних методів розрахунку НДС резервуарів лежить теорія осесиметричних тонкостінних оболонок [10]. До чисельних методів розрахунку НДС резервуара відносяться прикладні методи розв'язання задач будівельної механіки, а також метод скінченних елементів (МСЕ) [11]. Точний розв'язок вказаних задач передбачає врахування всіх факторів, що діють на резервуар, у вигляді граничних умов. Згідно з ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [12] на резервуар діють навантаження, наведені на рис. 1.

Як видно з рисунку 1, впливові чинники складно кількісно оцінити, що обмежує можливість використання описаних вище методів.

При спробі застосування комерційних пакетів, що реалізують МСЕ (SolidWorks), для визначення НДС РВС виникає проблема задання геометричних розмірів резервуара обумовлена малістю товщини стінки порівняно з іншими розмірами.

Для вирішення цієї проблеми резервуар розглядають як тонкостінну оболонку з дефектами форми, а вплив дефектів матеріалу стінки враховують через коефіцієнт концентрації напружень – для негострих дефектів, та коефіцієнт

інтенсивності напружень – для тріщин, які розраховуються в залежності від типу, розміру та розміщення дефекту.

Існують методи розв'язання обернених задач для визначення НДС в об'ємі тіла за даними про переміщення на частині поверхні [13, 14].

Ці методи є експериментально-розрахунковими, в них, окрім даних про переміщення поверхні використовуються часткові дані про напруження.

Також в роботі [15, 16], було запропоновано обчислювати НДС за переміщеннями точок поверхні РВС, що опосередковано враховує сили та навантаження, які діють на резервуар. Проте наявність зварних з'єднань та додаткового обладнання вимагає їх окремого врахування і ускладнює застосування даного методу.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Як показано вищев зв'язку з великою трудоемністю і значними розмірами РВС експериментальні методи визначення НДС можна застосовувати лише для уточнення напружень на окремих ділянках резервуарів.

Розглянуті математичні методи дають змогу одержувати адекватну картину НДС РВС лише при умові врахування всіх впливів та навантажень, які діють на резервуар, що в більшості випадків є можливим лише з великим наближенням, тому вірогідність контролю цими методами є низькою.

Існує необхідність в розробленні методу визначення НДС РВС з високою вірогідністю та малою трудоемністю, що дасть змогу визначити можливий термін їх безпечної експлуатації.

Формування цілей статті

При оцінці НДС резервуара особливу увагу слід звернути на стінку, яка являє собою циліндричну оболонку з дефектами форми, в зв'язку з тим, що всі навантаження, які діють на резервуар прямо чи опосередковано діють саме на його стінку.

Зі збільшенням обчислювальних потужностей сучасних комп'ютерів та винайденням нових алгоритмів все більшої популярності в задачах технічної діагностики набирають нейромережі. В статті пропонується використовувати нейромережу для визначення НДС РВС за даними про переміщення точок їх поверхні. Результатом роботи нейромережі буде максимальне значення напружень в стінці РВС.

Висвітлення основного матеріалу

Навантаження та впливи, які діють на стінку РВС призводять до зміни просторового положення її поверхні, отже вимірявши положення стінки в два моменти часу і обчисливши її переміщення можна оцінити зміну її НДС. Оскільки доведено, що

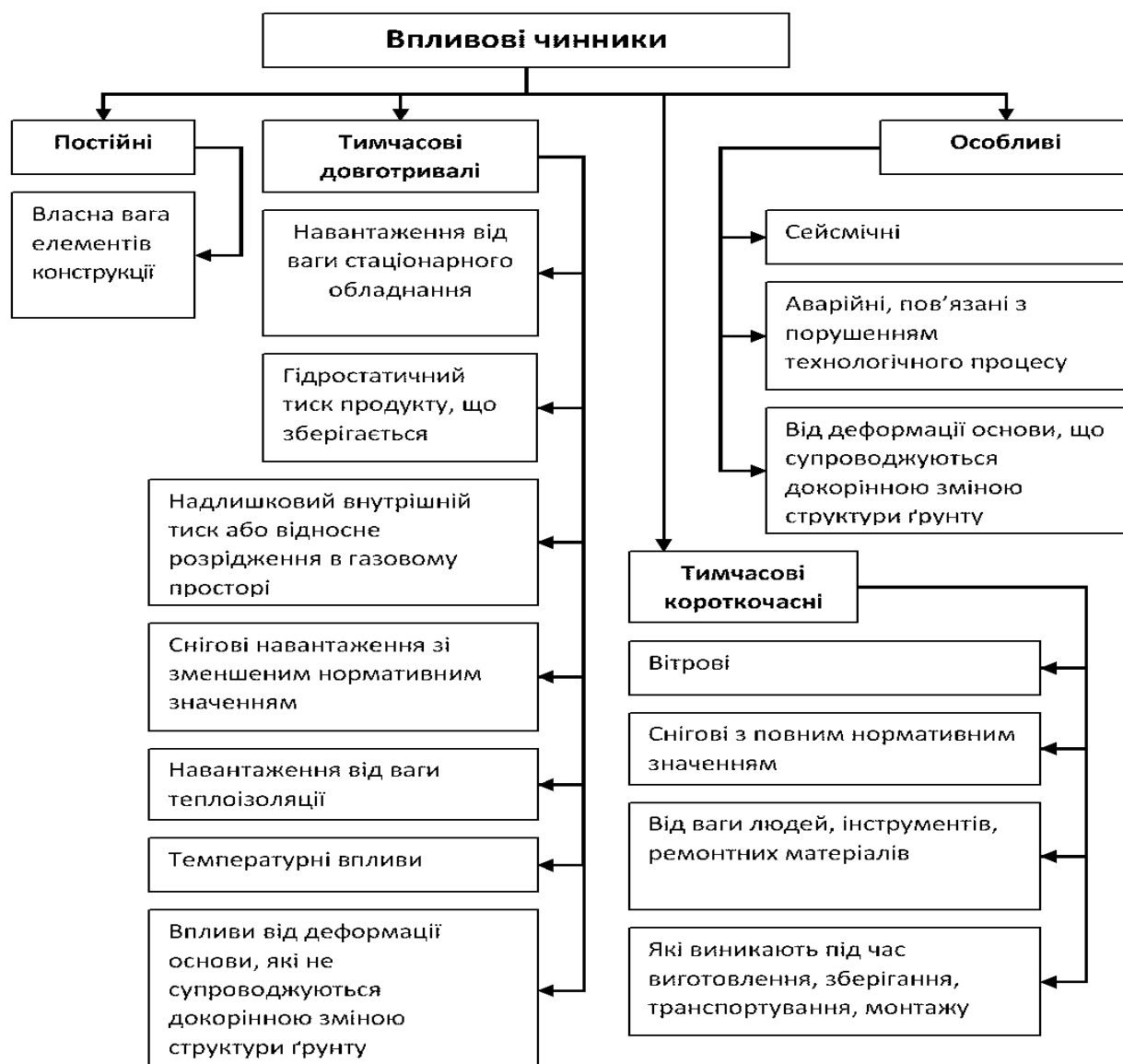


Рисунок 1 – Впливові чинники, що призводять до зміни технічного стану РВС

неймережі можуть обчислити будь-яку функцію [17], то, при використанні переміщень стінки в якості вхідних параметрів в неймережі, на її виході можна оцінити зміну НДС в стінці РВС.

Пропонується використовувати згорткову глибоку неймережу, представлену у [17] (рис.2).

Наведена структура часто використовується для ідентифікації зображень. Вона враховує просторову структуру вхідних даних, що важливо для оцінки НДС, який є розподілений в просторі стінки РВС.

Оскільки дані про переміщення точок поверхні стінки РВС також представлені у вигляді двовимірному масиву, як і зображення, то цю структуру доцільно застосовувати для їх обробки.

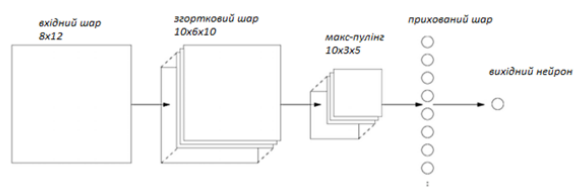


Рисунок 2 – Топологія згорткової глибокої мережі з вхідним шаром розмірністю 8x12 та одним вихідним нейроном

Методика проведення експериментальних досліджень передбачає вимірювання відхилення твірних стінки резервуара від вертикалі згідно ДСТУ 4147-2003 [18]. Ці відхилення вимірюються для калібрування РВС геометричним методом. Різниця між відхиленнями в два моменти часу в кожній точці поверхні стінки РВС записується у двовимірний масив розмірністю 8x12 і використовується в якості вхідних значень для згорткової нейромережі.

Кожен нейрон першого прихованого шару пов'язаний з невеликою ділянкою вхідних нейронів розмірністю 3x3, яка називається локальним рецептивним полем. Кожен зв'язок навчається своїй вазі.

Локальне рецептивне поле переміщається по всьому вхідному масиву з кроком 1. Для кожного локального рецептивного поля існує свій прихований нейрон в першому прихованому шарі. Таким чином, якщо вхідний масив має розмірність 8x12, а розміри локального рецептивного поля становлять 3x3, то в прихованому шарі буде 6x10 нейрони. Для всіх прихованих нейронів використовуються однакові ваги, це кардинально зменшує кількість параметрів, які навчаються. Тобто для кожного прихованого нейрона j, k вихід буде рівним [17]:

$$\sigma(\sum_{i=0}^2 \sum_{m=0}^2 \omega_{i,m} a_{j+i,k+m}). \quad (1)$$

де σ – сигмоїдна функція активації;

$\omega_{i,m}$ – масив загальних ваг 3x3;

$a_{x,y}$ – вхідні активації в позиції x, y .

Оскільки ваги всіх нейронів в прихованому шарі однакові, то вони виявляють ту саму ознаку в різних частинах поверхні. Зіставлення вхідного шару і прихованого шару називається картою ознак. Пропонується використовувати 10 карт ознак.

Після згорткового шару використовується пулінговий шар, зокрема застосовується макс-пулінг. Він приймає вихід кожної карти ознак згорткового шару і готує стислу карту ознак (вибирає максимальне значення з ділянки 2x2). Оскільки вихід нейронів згорткового шару дає 6x10 значень, після пулінгу залишиться 3x5 нейронів. Макс-пулінг застосовується до кожної карти ознак.

Останній шар зав'язків в мережі є повнозв'язним. Він пов'язує кожен нейрон шару макс-пулінгу з вихідним нейроном з сигмоїдною функцією активації, який показує максимальну зміну напружень в стінці РВС. В якості функції вартості використовується перехресна ентропія [17]:

$$C = -\ln \sum_x [y \ln a + (1 - y) \ln(1 - a)], \quad (2)$$

де n – загальна кількість одиниць навчальних даних;
 x – навчальні дані, по яких проводиться сумування;
 y – відповідний бажаний вихід.

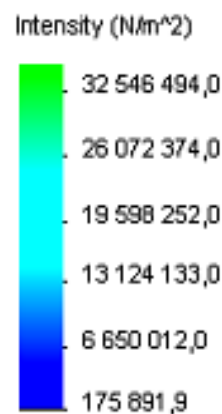
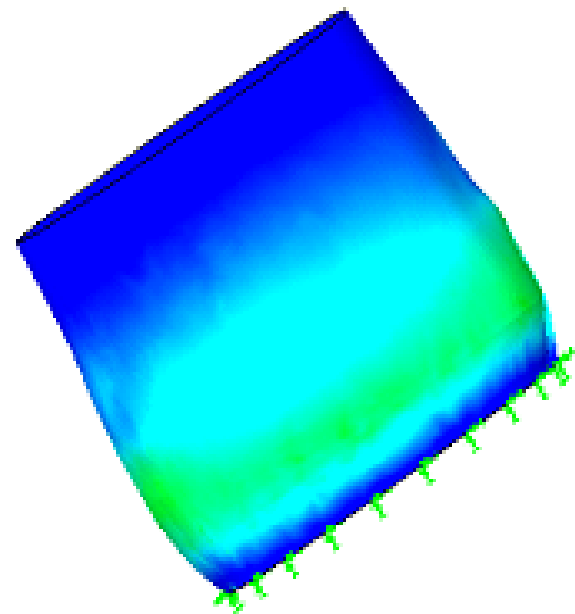


Рисунок 3 – Розподіл інтенсивності напружень в стінці резервуара, одержаних за допомогою програмного комплексу SolidWorks

В цієї функції є перевага над квадратичною функцією вартості, оскільки, вона дозволяє уникнути проблеми уповільнення навчання.

Запропонована мережа навчається за допомогою стохастичного градієнтного спуску і зворотного поширення. Для запропонованої мережі необхідний великий набір даних про переміщення точок поверхні стінки РВС. Ці дані, як було сказано вище, можна отримати в результаті геометричного калібрування РВС. Також для збільшення кількості вхідних даних з метою покращення навчання мережі пропонується використовувати дані, отримані в результаті моделювання різних впливів, що діють на РВС з різними дефектами форми стінки в середовищі SolidWorks [19]. Таким чином можна отримати значення зміни напружень в залежності від переміщень, які під дією різних навантажень, що

показано на рисунку 3. Як показано в [20], таке моделювання добре відтворює реальний напружений стан резервуара.

Таким чином можна значно збільшити об'єм навчальних даних для запропонованої згорткової мережі, що дозволить покращити точність визначення НДС стінки РВС.

Висновки

Таким чином за положенням стінки РВС в два моменти часу з використанням сучасної згорткової глибокої нейромережі можна оцінити зміну НДС з метою визначення можливості продовження безпечної експлуатації резервуару. При чому запропонований метод не є трудомістким та не потребує безпосереднього контакту з поверхнею РВС. Також немає необхідності визначати всі впливи та навантаження, впливу яких зазнає резервуар.

Якщо розмірність вхідного масиву менша від запропонованої доцільно використовувати методи інтерполяції та апроксимації, зокрема сплайни.

Для подальших досліджень та вдосконалення запропонованого методу можна пробувати використовувати в нейромережі інші гіперпараметри, зокрема змінювати кількість карт ознак, розміри локального рецептивного поля, розмір кроку зсуву рецептивного полята інші. Також можна пробувати використовувати вихідний шар з іншою кількістю нейронів та софтахв якості функції вартості.

Замість шару макс-пулінгу можна спробувати застосовувати L2-пулінг, де замість того, щоб взяти максимальну активацію регіону нейронів, береться квадратний корінь з суми квадратів активацій регіону. Ефективність використання певного методу пулінгу може залежати від інших вибраних гіперпараметрів.

Список використаних джерел

1. Кандаков Г. П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения [Текст] / Г. П. Кандаков // Промышленное и гражданское строительство. – 1998. – № 5. – С.24-26.

2. Ибрагимов И.Г. Мониторинг состояния оболочковых конструкций методом магнитного сканирования [Электронный ресурс] / И. Г. Ибрагимов, Р.Г. Вильданов // Нефтегазовое дело. – 2004. – Режим доступа до журн. : <http://www.ogbus.ru>.

3. Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей [Электронный ресурс] / С. М. Купрейшвили // С. : Химсталькон. –

Режим доступа : <http://www.himstalcon.ru/node/2582>.

4. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів [Текст] : ДСТУ–Н Б А.3.1–10:2008. – [Чинний від 2009–07–01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 63 с. – (Національний стандарт України).

5. Загороднев В. И. Осторожно, сварка [Текст] / В. И. Загороднев // Индустрия. – 2005. – № 3 (41). – С. 2–3.

6. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Текст] : ДБН В.1.2-14-2009. [Чинний від 2009-01-12]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – (Державні будівельні норми України)

7. Контроль напряженно–деформированного состояния оборудования и конструкций при оценке остаточного ресурса на объектах промышленности и транспорта [Электронный ресурс] / ООО «Энергодиагностика». – Реутов. – Режим доступа : http://www.energodiagnostika.ru/ru/application_mm/app_mmm_sss_inspection.aspx.

8. Никитина Н. Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин [Текст] / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестник научно–технического развития. – 2010. – № 4 (32). – С. 18–28.

9. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. [Текст] : ДБН В.2.6-163 2010. – [Чинний від 2011-01-12]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – (Державні будівельні норми України)

10. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике [Текст] : учеб. пособие / В. З. Власов. – М.: Гостехиздат, 1979. – 784 с.

11. Стренг Г. Теория метода конечных элементов [Текст] : учеб. пособие / Г. Стренг, Дж. Фикс. ; перев. с англ. В. И. Агошкова, В. А. Василенко, В. В. Шайдурова. – М.: Мир, 1977. – 349 с.

12. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови (ГОСТ 31385–2008, NEQ)

[Текст] : ДСТУ Б В.2.6–183:2011. – [Чинний від 2012–10–01]. – К. : Мінрегіон України, 2012. – 77 с. – (Національний стандарт України).

13. Фомин А. В. Расчетно-экспериментальные методы механики деформируемого тела в условиях ограниченной исходной информации [Текст] : дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / А. В. Фомин. – М. : 1989.

14. Прейс А. К. Определение напряжений в объеме детали по данным измерений на поверхности [Текст] / А. К. Прейс. – М.: Наука, 1979. – 128с.

15. Замиховський Л. М. Математичне моделювання напружено-деформованого стану резервуарів з дефектами форми стінки [Текст] / Л. М. Замиховський, Х. В. Паньків // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007. – Т.1 (93), № 3. – С. 212–214.

16. Замиховський Л. М. Оцінка напружено-деформованого стану вертикальних сталевих циліндричних резервуарів за переміщеннями точок їх поверхні [Текст] / Л. М. Замиховський, Х. В. Паньків // Вісник КДПУ. – 2007. – Част. 1, Вип. 4. – С. 141–143.

17. Michael A. Nielsen, "Neural Networks and Deep Learning", Determination Press, 2015 [Електронний ресурс] – Режим доступу :<http://neuralnetworksanddeeplearning.com>.

18. Метрологія. Резервуари сталеві вертикальні циліндричні. Методика повірки (ГОСТ 8.570–2000. MOD) [Текст] : ДСТУ 4147–2003. – [Чинний від 2003–01–01]. – К.: Держспоживстандарт, 2003. – 74 с. – (Національний стандарт України).

19. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004 : учеб. пособие [Текст] / Тику Ш. – СПб.: Питер, 2005. – 768 с. – ISBN 5–94723–841.

20. Мартинюк Х. В. Метод оцінки напружено-деформованого стану вертикальних сталевих циліндричних резервуарів [Текст] / Х. В. Мартинюк, Л. М. Замиховський // Эффективность реализации научного, ресурсного, промышленного потенциала в современных условиях : 7-ма щорічна міжнар. пром. конф. і бліц-виставка 12-16 лютого 2007 р.: матеріали конференції. – с. Славське, 2007. – С. 321-322.

References

1. Kandakov G. P. Problemy otechestvennogo rezervuarostroeniya i vozmozhnye puti ikh resheniya [Tekst] / G. P. Kandakov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 1998. – № 5. – S.24-26.

2. Ibragimov I.G. Monitoring sostoyaniya obolochkovykh konstrukcij metodom magnitnogo skanirovaniya [Elektronnij resurs] / I. G. Ibragimov, R. G. Vildanov // Neftegazovoe delo. – 2004. – Rezhim dostupu do zhurn. : <http://www.ogbus.ru>.

3. Razrusheniya v processe ehkspluatacii vertikalnykh cilindricheskikh rezervuarov so stacionarnoj kryshej [Elektronnij resurs] / S. M. Kupreishvili // S. : Khimstakon. – Rezhim dostupu : <http://www.himstalcon.ru/node/2582>.

4. Nastanova z provedennia tekhnichnoho diahnostuvannia vertykalnykh stalevykh rezervuariv [Tekst] : DSTU–N B A.3.1–10:2008. – [Chynnyi vid 2009–07–01]. – К.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. – 63 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

5. Zagorodnev V. I. Ostorozhno, svarka [Tekst] / V. I. Zagorodnev // Industriya. – 2005. – № 3 (41). – S. 2–3.

6. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruksii ta osnov. [Tekst] : DBN V.1.2-14-2009. [Chynnyi vid 2009-01-12]. – К. : Minrehionbud Ukrainy, 2009. – (Derzhavni budivelni normy Ukrainy)

7. Kontrol napryazhenno–deformirovannogo sostoyaniya oborudovaniya i konstrukcij pri ocenke ostatochnogo resursa na obektakh promyshlennosti i transporta [Elektronnij resurs] / ООО «Ehnergodiagnostika». – Reutov. – Rezhim dostupu : http://www.energodiagnostika.ru/ru/application_mm/app_mmm_sss_inspection.aspx.

8. Nikitina N. E. Preimushchestva metoda akustouprogosti dlya nerazrushayushchego kontrolya mekhanicheskikh napryazhenij v detalyakh mashin [Tekst] / N. E. Nikitina, S. V. Kazachek // Vestnik nauchno–tekhnicheskogo razvitiya. – 2010. – № 4 (32). – S. 18–28.

9. Konstruktsii budivel i sporud. Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia, vyhotovlennia i montazhu. [Tekst] : DBN V.2.6-163 2010. – [Chynnyi vid 2011-01-12]. – К. : Minrehionbud

Ukrainy, 2011. – (Derzhavni budivelni normy Ukrainy)

10. Vlasov V. Z. Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozhenie v tekhnike [Tekst] : ucheb. posobie / V. Z. Vlasov. – M.: Gostekhizdat, 1979. – 784 s.

11. Streng G. Teoriya metoda konechnykh ehlementov [Tekst] : ucheb. posobie / G. Streng, Dzh. Fiks. ; perev. s angl. V. I. Agoshkova, V. A. Vasilenko, V. V. Shajdurova. – M.: Mir, 1977. – 349 s.

12. Rezervuary vertykalni tsylindrychni stalevi dlia nafty ta naftoproduktiv. Zahalni tekhnichni umovy (HOST 31385–2008, NEQ) [Tekst] : DSTU B V.2.6–183:2011. – [Chynnyi vid 2012–10–01]. – K. : Minrehion Ukrainy, 2012. – 77 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

13. Fomin A. V. Raschetno-ehksperimentalnye metody mekhaniki deformiruemogo tela v usloviyakh ogranichennoj iskhodnoj informacii [Tekst] : dis. na soiskanie uchenoj stepeni dokt. tekhn. nauk / A. V. Fomin. – M. : 1989.

14. Prejs A. K. Opredelenie napryazhenij v ob"eme detali po dannym izmerenij na poverkhnosti [Tekst] / A. K. Prejs. – M.: Nauka, 1979. – 128s.

15. Zamikhovskiy L. M. Matematychno modeliuвання napruzhenno-deformovanoho stanu rezervuariv z defektamy formy stinky [Tekst] / L. M. Zamikhovskiy, Kh. V. Pankiv // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. –

Khmelnytskyi, 2007. – T.1 (93), № 3. – S. 212–214.

16. Zamikhovskiy L. M. Otsinka napruzhenno-deformovanoho stanu vertykalnykh stalnykh tsylindrychnykh rezervuariv za peremishchenniamy tochok yikh poverkhni [Tekst] / L. M. Zamikhovskiy, Kh. V. Pankiv // Visnyk KDPU. – 2007. – Chast. 1, Vyp. 4. – S. 141–143.

17. Michael A. Nielsen, "Neural Networks and Deep Learning", Determination Press, 2015 [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu : <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>.

18. Metrolohiia. Rezervuary stalevi vertykalni tsylindrychni. Metodyka povirky (HOST 8.570–2000. MOD) [Tekst] : DSTU 4147–2003. – [Chynnyi vid 2003–01–01]. – K.: Derzhspozhyvstandart, 2003. – 74 s. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).

19. Tiku SH. Ehffektivnaya rabota: SolidWorks 2004 : ucheb. posobie [Tekst] / Tiku SH. – SPb.: Piter, 2005. – 768 s. – ISBN 5–94723–841.

20. Martyniuk Kh. V. Metod otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu vertykalnykh stalnykh tsylindrychnykh rezervuariv [Tekst] / Kh. V. Martyniuk, L. M. Zamikhovskiy // Ehffektyvnost realizatsyy nauchnoho, resursnoho, promyshlennoho potentsyala v sovremennykh usloviyakh : 7-ma shchorichna mizhnar. prom. konf. i blits-vystavka 12-16 liutoho 2007 r.: materialy konferentsii. – s. Slavske, 2007. – S. 321–322.

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 621

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-13-25

АНАЛІЗ МЕТОДИКИ ВСТАНОВЛЕННЯ ТИПОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І МОНТАЖНИХ СХЕМ ОБВ'ЯЗКИ ГИРЛА СВЕРДЛОВИН ПСГ ПРОТИВИКИДНИМ ОБЛАДНАННЯМ

О. Т. Чернова

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
тел./факс: (380) 0342 72-71-38; e-mail:m-oksana-t@ukr.net*

Тенденції розвитку підземного зберігання газу формують перед наукою ряд завдань. Одна з них – це зменшення втрат та підвищення рівня зберігання газу. Для підвищення рівня фонтанної безпеки на всіх підземних газових сховищах України підприємства та організації зобов'язали під час виконання робіт з капітального ремонту свердловин на гирлі монтувати противикидне обладнання. Існують три затверджені схеми, що застосовуються на території України. Основні елементи обладнання устанавлюють на гирлі свердловини на весь період ремонтних робіт, а додаткові елементи розташовують на робочому майданчику у відкритому положенні і устанавлюють залежно від умов виконуваних робіт і стану свердловини. Типові схеми обв'язки ОП гирла свердловин ПСГ під час КРС забезпечують виконання таких операцій: - герметизацію гирла свердловини за наявності або відсутності в ній бурильного інструменту; - розрядження свердловини випусканням газу через викидний трубопровід; - заміну газованої промивальної рідини на свіжжу прямим промиванням з необхідним протитиском; - закачування промивальної рідини в затрубний простір цементувальними агрегатами і буровими насосами; - контроль за тиском у свердловині із загерметизованим гирлом; - відведення газу не менше, ніж на 100 м від гирла свердловини, а за високої цілності розташування свердловин на ПСГ і їх дебітах до 100 тис.м³/добу - не менше, ніж на 40 м; - устанавлення додаткового обладнання чи пристроїв для ліквідування газопроявів і відкритих фонтанів.

При аналізі в роботі було встановлено, що типові схеми обв'язки гирла свердловин ПСГ під час ремонту встановлюються з урахуванням геолого-технічних характеристик сховища залежно від співвідношень пластового і гідростатичного тисків. Основні елементи обладнання устанавлюють на гирлі свердловини на весь період ремонтних робіт, а додаткові елементи розташовують на робочому майданчику у відкритому положенні і устанавлюють залежно від умов виконуваних робіт і стану свердловини. На кожній свердловині типову схему потрібно конкретизувати з урахуванням рельєфу місцевості, розташування ліній електромереж, доріг, обладнання для ремонту свердловини, допоміжного устаткування та інших споруд і комунікацій.

Ключові слова: *підземні сховища; втрати газу; схеми обв'язки; гирла свердловин; фонтанна безпека.*

Тенденции развития подземного хранения газа формируют перед наукой ряд задач. Одна из них – это уменьшение потерь и повышение уровня хранения газа. Для повышения уровня фонтанной безопасности на всех подземных газовых хранилищах Украины предприятия и организации обязали при выполнении работ по капитальному ремонту скважин на устье монтировать противовыбросовое оборудование. Существуют три утвержденных схемы, применяемые на территории Украины. Основные элементы оборудования устанавливают на устье скважины на весь период ремонтных работ, а дополнительные элементы располагают на рабочей площадке в открытом положении и устанавливают в зависимости от условий выполняемых работ и состояния скважины. Типовые схемы обвязки ОП устья скважин ПХГ при КРС обеспечивают выполнение следующих операций: - герметизация устья скважины при наличии или отсутствии в ней бурильного инструмента; - разрядка скважины путем спуска газа сквозь выкидной трубопровод; - замену газированной промывочной жидкости на свежую прямой промывкой с необходимым противодавлением; - закачка промывочной жидкости в затрубное пространство цементировочных

агрегатом и буровыми насосами; - контроль за давлением в скважине с загерметизированы устьем; - отвод газа не менее чем на 100 м от устья скважины, а при высокой плотности расположения скважин на ПХГ и их дебитом до 100 тыс.м³ / сутки - не менее чем на 40 м; - установка дополнительного оборудования или устройств для ликвидации газопроявлений и открытых фонтанов.

При анализе в работе было установлено, что типовые схемы обвязки устья скважин ПХГ при ремонте устанавливаются с учетом геолого-технических характеристик хранилища в зависимости от соотношения пластового и гидростатического давления. Основные элементы оборудования устанавливаются на устье скважины на весь период ремонтных работ, а дополнительные элементы располагают на рабочей площадке в открытом положении и устанавливают в зависимости от условий выполняемых работ и состояния скважины. На каждой скважине типовую схему нужно конкретизировать с учетом рельефа местности, расположения линий электропередач, дорог, основного оборудования для ремонта скважины, вспомогательного оборудования и других сооружений и коммуникаций.

Ключевые слова: подземные хранилища; потери газа; схемы обвязки; устья скважин; фонтанная безопасность.

Trends in the development of underground gas storage form a series of tasks ahead of science. One of them is to reduce losses and increase storage. In order to increase the level of safety in all underground gas storage facilities of Ukraine, enterprises and organizations of Ukraine under the obligation to install anti-dumping equipment during the implementation of work on overhaul of wells at the mouth. There are three blocked circuits that are used in the territory of Ukraine. The main elements of the equipment are installed at the mouth of the well for the entire period of repairs, and additional elements are located on the work platform in the open position and set, depending on the conditions of the work to be performed and the state of the well. Typical drainage schemes of wells of the UGS during the cattle system provide the following operations: - sealing the mouth of the well in the presence or absence of a drill tool in it; - discharge of the well by gas release through the discharging pipeline; - replacement of carbonated washing liquid with fresh direct flush with the necessary countermeasures; - pumping of the washing liquid into the annulus with cement aggregates and drill pumps; - pressure control in the well with a sealed mouth; - gas withdrawal not less than 100 m from the mouth of the well, and at high density of the location of wells on the PSG and their debits up to 100 thousand m³ / day - not less than 40 m; - installation of additional equipment or devices for the elimination of gas manifestations and open fountains.

In the analysis in the work, it was found that typical patterns of obstruction of the wells of PSG during repairs are established taking into account the geological and technical characteristics of the storage, depending on the relationship of reservoir and hydrostatic pressure. The main elements of the equipment are installed at the mouth of the well for the entire period of repairs, additional elements are located on the work platform in the open position and set, depending on the conditions of the work to be performed and the state of the well. For each well, the typical scheme needs to be specified, taking into account the terrain, location of lines of power grids, roads, equipment for repairing wells, auxiliary equipment and other structures and communications.

Key words: underground storages; gas losses; boundary circuits; wells; fountain safety.

Вступ. Підземні сховища газу призначені, в основному, для компенсації сезонної нерівномірності споживання газу, створення необхідних запасів газу для підвищення надійності газопостачання, забезпечення ритмічної роботи всієї системи газопостачання, починаючи з газових промислів і закінчуючи газовими мережами населених пунктів, а також зменшення затрат на лінійну частину і компресорні станції (КС). [1]

Ефективне управління підземними сховищами газу потребує систематичного виконання досліджень динамічних характеристик експлуатації ПСГ, розроблення

і впровадження методів оптимізації роботи газосховищ у складі єдиної газотранспортної системи, що забезпечує як продуктивний, так і акумулюючий потенціал газосховищ. Цьому також сприяють обґрунтовані заходи з модернізації газотранспортної системи її оптимальна взаємодія з підземними сховищами газу (з метою максимального використання їх сумісного енергозберігаючого потенціалу).

Ефективне технологічне управління роботою підземних сховищ газу в газотранспортній системі може додатково забезпечуватися збільшенням активної ємності ПСГ за рахунок використання

незадіяних горизонтів, збільшенням добової продуктивності, оптимізацією процесів закачування і відбирання природного газу, автоматизацією процесів контролю за роботою експлуатаційних свердловин і керування газовими потоками в системі "пласт-колектор-магістральний газопровід", розробкою і впровадженням енергозберігаючих технологій, технічних рішень, вивченням ефективності заміщення буферного газу інертним, розробкою моделюючих, оптимізуючих і керівних програмно-технологічних систем.

Під час виконання капітального ремонту свердловин підземного сховища підприємства та організації України повинні на гирлі свердловини монтувати противикидне обладнання. Це підвищує рівень фонтанної безпеки. На гирлі свердловини встановлюють основні елементи обладнання на весь період ремонтних робіт, а на робочому майданчику у відкритому положенні розташовують додаткові елементи. Їх потрібно встановлювати залежно від умов виконуваних робіт і стану свердловини. **Мета роботи** - проаналізувати типові технологічні і монтажні схеми обв'язки гирла свердловин противикидним обладнанням для визначення переваг та недоліків схем та аналіз їх роботи.

Аналіз досліджень та публікацій. Питання втрат газу при експлуатації підземних газових сховищ обговорюється протягом всього часу їх експлуатації. Недопущення витікання газу за межі проектного контуру є однією з умов успішної експлуатації сховищ. Також вимагається проводити чіткий та постійний контроль за вмістом у газі води, конденсату та інших компонентів. [1].

Стан свердловин підземних сховищ найбільшою мірою пов'язаний з параметрами втрат. Тому, від моменту створення підземних сховищ та протягом періоду експлуатації розглядається та вивчається стан свердловин та їх надійність [2, 3].

З допомогою енергетичного підходу до оцінки втрат газу при зберіганні, який представлений у праці [4] на основі аналізу циклічної експлуатації Дашавського підземного сховища можна упорядкувати і конкретизувати загальні уявлення і рівень

незворотних втрат природного газу як енергоносія.

Це загалом забезпечить приріст ефективності експлуатації підземного сховища газу.

Також при розгляді питання зменшення втрат важливою задачею є виконання ремонтних робіт свердловин, їх надійності та герметичності. На даний час існує різноманіття методів та методик [5]. Експлуатація свердловин та розвиток технічного прогресу удосконалюють та змінюють дані методики, оскільки з'являються нові проблеми та задачі.

Тому розроблення новітніх вимог, стандартів та методик є важливою задачею.

Для розвитку та удосконалення роботи підземних сховищ України присвячені дослідження Єгупова Ю. А., Федутенка А. М., Шимка Р. Я., Вечеріка Р. Л. [6, 7, 8] та інших вчених. Їх праці ґрунтуються на основі досліджень для визначення оцінки ефективності роботи підземних сховищ при різноманітних параметрах експлуатації та аналізу характеристик, що мають вплив на енергоефективність та енергозбереження при експлуатації газотранспортної системи.

Оскільки на даний час велике значення приділяється технічному переоснащенню та інтеграції ГТС (газотранспортної системи) України у єдину європейську ГТС необхідно приділити увагу аналізу проблем втрат газу з підземних сховищ. Це мінімізує витрати при зберіганні газу в газосховищах і підвищить ефективність їх застосування.

Цілі статті. Противикидне обладнання призначене для герметизації гирла нафтових і газових свердловин.

Також його необхідно встановлювати для попередження відкритих фонтанів у ході капітального ремонту та герметизації гирла для ремонту. Всередині НКТ чи в міжтрубному просторі між НКТ і експлуатаційною колоною знаходиться газ або рідина.

Встановлення противикидного обладнання запобігає викидам в атмосферу даного продукту. Встановлюють обладнання на фланець трубної головки.

При спорудженні, освоєнні та ремонті нафтових і газових свердловин противикидне обладнання є важливою складовою частиною фонтанної безпеки. Основна вимога до противикидного обладнання – забезпечення високої герметизаційної здатності. Водночас, герметизація визначається рядом чинників: рівнем досконалості конструкції складових частин противикидного обладнання, дотриманням регламентованих норм і правил його монтажу та випробування, кваліфікованим технічним обслуговуванням, своєчасною перевіркою технічного стану [9].

Однією з найважливіших вимог при проведенні ремонтних робіт на свердловинах є підвищення рівня фонтанної безпеки. Щоб забезпечити виконання даної вимоги Український науково-дослідний інститут природних газів розробив технологічний регламент монтажу і експлуатації противикидного обладнання при проведенні капітального ремонту свердловин. Даний регламент призначений для використання підприємствами, організаціями і установами, діяльність яких пов'язана з експлуатацією свердловин на підземних сховищах газу ПАТ "УКРТРАНСГАЗ". [10]. Метою розроблення цього стандарту є підвищення рівня фонтанної безпеки на

Таблиця 1 – Основні геолого-технічні характеристики ПСГ

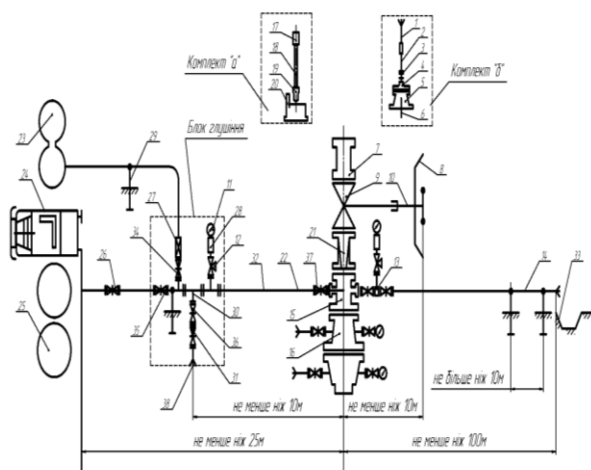
Назва показника	Назва ПСГ											
	Угерське (XIV-XV гор.)	Більче-Волиця-Угерське	Дашавське	Оларське	Богородчанське	Олишівське	Червоно-партизанське	Солохівське	Пролетарське	Кетичівське	Красно-попівське	Вергуньське
Рік введення в експлуатацію	1982	1990	1987	1984	1979	1978	1989	1987	1991	1988	1973	1987
Загальний фонд свердловин	102	375	136	96	166	61	92	112	88	65	56	113
Глибина залягання покрівлі пласта-колектора, м	675	893	604	590	1050	550	395	813	1422	1920	410	1160
Діаметр експлуатаційної колони, мм	168	211, 168	168	168	168	146, 168	168, 146	168	168	168	146, 168	146-168, 140-168
Початковий тиск в резервуарі, МПа	7,25	10,18	6,42	6,13	10,16	5,62	5,27	8,35	14,61	18,96	5,14	11,7
Глибина (апикальна), на яку розраховують пластовий тиск, м	750	1100	640	595	1055	555	423	864	1430	1930	420	1170
Тиск пластовий (максимальний), МПа	8,5	13,9	5,78	7,9	10,7	6,9	5,7	10,6	15,0	15,9	5,2	15,4

підземних сховищах газу України шляхом вирішення таких завдань:

- розроблення типових технологічних і монтажних схем обв'язки противикидним обладнанням гирла свердловин підземних сховищах газу під час капітального ремонту;
- визначення науково-обґрунтованих вимог фонтанної безпеки в процесі монтажу і експлуатування противикидного обладнання.

Основний матеріал. Під час КРС (капітального ремонту свердловин) типові схеми обв'язки ОП гирла свердловин ПСГ (підземних сховищ газу) забезпечують виконання таких операцій:

- контроль за тиском у свердловині із загерметизованим гирлом;
- відведення газу не менше ніж на 100 м від гирла свердловини, а за високої щільності розташування свердловин на ПСГ і їх дебітах до 100 тис.м³/добу – не менше ніж на 40 м;
- розрядження свердловини випускненням газу через викидний трубопровід;
- заміну газованої промивальної рідини на свіжу прямим промиванням з необхідним протитиском;
- герметизацію гирла свердловини за наявності або відсутності в ній бурового інструменту;
- закачування промивальної рідини в затрубний простір цементувальними агрегатами і буровими насосами;



- 1 – ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА;
2, 18 – патрубок підйомний; 3, 37 – засувка
ФА;
4 – перевідник до трубної головки; 5 –
котушка перевідна; 6 – патрубок
з'єднувальний; 7 – котушка надпревентерна;
8 – щит захисний; 9 – засувка перфораційна;
10 – дистанційне керування перфораційною
засувкою; 11 – манометр; 12 – пристрій
запірно-розрядний; 13 – фланець
манометричний; 14 – трубопровід викидний;
15 – головка трубна; 16 – головка колонна; 17
– муфта бурильної труби; 19 – конус для
підвіски НКТ; 20 – ротор підйомного
агрегату; 21 – котушка перехідна з
посадочним конусом; 22 – котушка фланцева;
23 – місткості відстою та дегазації розчину;
24 – агрегат цементувальний; 25 – запасні
місткості рідини; 26 – засувка низького
тиску; 27 – дросель регульований; 28 –
роздільник
середовищ; 29 – якір; 30 – трійник; 31 –
клапан зворотний; 32 – лінія глушіння;
33 – амбар факельний; 34, 35, 36 – засувки
блоку глушіння; 38 – місце під'єднання лінії
продування

Рисунок 1 – Типова схема обв'язки устя свердловин ПСГ противикидним обладнанням під час капітального ремонту при $P_{пл} \leq P_{гст}$ (схема 1 із застосуванням перфораційної засувки, пластовий тиск менше або рівний гідростатичному)

- установлення додаткового обладнання чи пристроїв для ліквідування газопроявів і відкритих фонтанів.

Перед виконанням робіт з капітального ремонту свердловин ПСГ потрібно на гирлі змонтувати ОП на підставі типових схем (які опрацьовуються згідно з ГОСТ 13846 та погоджуються зі спеціалізованою організацією).

Типові схеми обв'язки гирла свердловин ПСГ під час КРС розроблені з урахуванням геолого-технічних характеристик ПСГ залежно від співвідношень пластового і гідростатичного тисків (табл. 1).

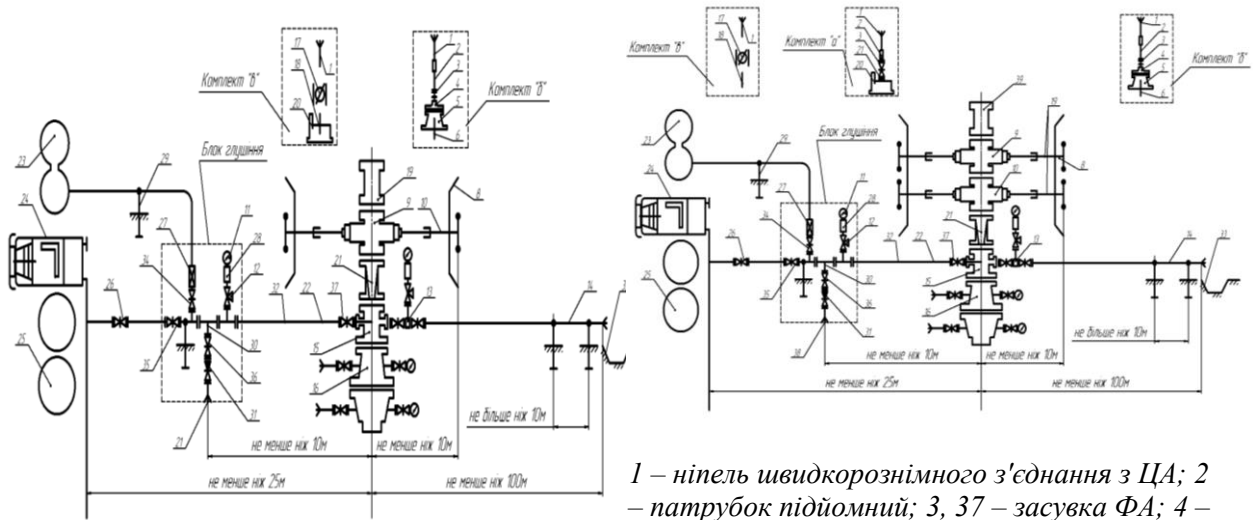
Основними елементами ОП на схемі 1 з застосуванням перфораційної засувки є: колонна головка 16, трубна головка 15, перехідна котушка з посадочним конусом 21, перфораційна засувка 9, надпревентерна котушка 7, лінія глушіння 32, трубопровід викидний 14, факельний амбар 33, блок глушіння з місткостями запасу і дегазації рідини 23, 25 (рис. 1), а на схемі 2 із застосуванням превентера з ручним керуванням основними елементами є: колонна головка 16, трубна головка 15, перехідна котушка 7 превентер з ручним керуванням з плашками для НКТ 9, надпревентерна котушка 19, лінія глушіння 32, трубопровід викидний 14, факельний амбар 33, блок глушіння з місткостями запасу і дегазації рідини 23, 25 (рис. 2). [10]

Додаткові елементи противикидного обладнання залежно від компонування поділяють на 3 комплекти:

– комплект "а" – конус для підвіски НКТ 19 із замковою різьбою 3-76, піднімальний патрубок 18, муфта бурильної труби 17;

– комплект "б" – з'єднувальний патрубок 6, перехідна котушка 5, перевідник до трубної головки 4, засувка фонтанної арматури 3, піднімальний патрубок 2, ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА 1;

– комплект "в" – з'єднувальний патрубок 18, кульовий кран 17 і ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА 1.



- 1 – ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА; 2 – патрубок підйомний; 3, 37 – засувка ФА; 4 – перевідник до трубної головки; 5, 7 – котушка перевідна; 6, 18 – патрубок з'єднувальний; 8 – щит захисний; 9 – превентер з ручним керуванням; 10 – дистанційне керування превентером; 11 – манометр; 12 – пристрій запірно-розрядний; 13 – фланець манометричний; 14 – трубопровід викидний; 15 – головка трубна; 16 – головка колонна; 17 – кран кульовий; 19 – котушка надпревентерна; 20 – ротор підйомного агрегату; 21 – місце під'єднання лінії продування; 22 – котушка фланцева; 23 – місткості відстоювання та дегазації розчину; 24 – агрегат цементувальний; 25 – запасні місткості рідини; 26 – засувка низького тиску; 27 – дросель регульований; 28 – роздільник середовищ; 29 – якір; 30 – трійник; 31 – клапан зворотній; 32 – лінія глушіння; 33 – амбар факельний; 34, 35, 36 – засувки блоку глушіння

Рисунок 2 - Типова схема обв'язки устя свердловин ПСГ противикидним обладнанням під час капітального ремонту при $P_{пл} \leq P_{гст}$ (схема 1 із застосуванням превентера з ручним керуванням, пластовий тиск менший або рівний гідростатичному)

- 1 – ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА; 2 – патрубок підйомний; 3, 37 – засувка ФА; 4 – перевідник до трубної головки; 5, 7 – котушка перехідна; 6, 18, 21 – патрубок з'єднувальний; 8 – щит захисний; 9 – превентер з ручним керуванням з плашками для НКТ; 10 – превентер з ручним керуванням з глухими плашками; 11 – манометр; 12 – пристрій запірно-розрядний; 13 – фланець манометричний; 14 – трубопровід викидний; 15 – головка трубна; 16 – головка колонна; 17 – кран кульовий; 19 – дистанційне керування превентерами; 20 – ротор підйомного агрегату; 22 – котушка фланцева; 23 – місткості відстоювання та дегазації розчину; 24 – агрегат цементувальний; 25 – запасні місткості рідини глушіння; 26 – засувка низького тиску; 27 – дросель регульований; 28 – роздільник середовищ; 29 – якір; 30 – трійник; 31 – клапан зворотній; 32 – лінія глушіння; 33 – амбар факельний; 34, 35, 36 – засувки блоку глушіння; 38 – місце під'єднання продувальної лінії; 39 – котушка надпревентерна

Рисунок 3 - Типова схема обв'язки устя свердловин ПСГ противикидним обладнанням під час капітального ремонту при $P_{пл} > P_{гст}$ (схема 2 із застосуванням двох превентерів із ручним керуванням, пластовий тиск більше гідростатичного)

Основними елементами ОП на схемі 2 є: колонна головка 16, трубна головка 15, перехідна котушка 7, превентер з ручним керуванням з плашками для НКТ 9, превентер з ручним керуванням з глухими плашками 10,

надпревентерна котушка 39, лінія глушіння 32, трубопровід викидний 14, факельний амбар 33, блок глушіння з місткостями запасу і дегазації рідини 23, 25. [10]

Додаткові елементи на схемі 2 залежно від компонування поділяють на 3 комплекти:

– комплект "а" - з'єднувальний патрубок 21, засувка фонтанної арматури 3, піднімальний патрубок 2, ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА 1;

– комплект "б" – з'єднувальний патрубок 6, перехідна котушка 5, перевідник до трубної головки 4, засувка фонтанної арматури 3, піднімальний патрубок 2, ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА 1;

– комплект "в" – з'єднувальний патрубок 18, кульовий кран 17 і ніпель швидкорознімного з'єднання з ЦА 1.

На схемах противикидне обладнання складається з основних і додаткових елементів. Основні елементи ПО встановлюють на гирлі свердловини на весь період ремонтних робіт, а додаткові елементи розташовують на робочому майданчику у відкритому положенні і встановлюють залежно від умов виконуваних робіт і стану свердловини.

При монтажі противикидного обладнання необхідно враховувати рельєф місцевості, розташування ліній електромереж, доріг, обладнання для ремонту свердловини, допоміжного устаткування та інших споруд і комунікацій. [10]

Обв'язка гирла свердловини ОП повинна виконуватись проінструктованим персоналом. Монтаж обладнання повинний відбуватись виключно після перевіряння його комплектності, ревізії всіх вузлів і деталей, гідравлічних випробувань на робочий тиск із складенням акта і записом у паспорті обладнання. Якщо ремонтні роботи були пов'язані із зварюванням або токарним обробленням корпусу, необхідно проводити випробування опресовуванням: на міцність, на пробний тиск і на герметичність, на робочий тиск. У випадку, що діаметр прохідного отвору ОП становить до 350 мм включно, то пробний тиск дорівнює двократному робочому тиску. Якщо діаметр прохідного отвору становить більше 350 мм,

то пробний тиск повинен розраховуватись як півторакратний робочий тиск.

При визначенні стану превентерів перевіряють:

– ступінь ступеня зношення ствольової частини превентера і надпревентерної котушки;

– кріплення гумових елементів плашок до їх корпусу;

– працездатності привода;

– стан всіх елементів і деталей (зокрема кільцевих канавок, плашок превентера, ущільнювальних металевих кілець і бокових кришок);

– чистоти робочих порожнин і відсутності сторонніх предметів у них.

Заміну всі вузлів і деталей слід виконувати відповідно до інструкції заводу.

Для виконання робіт з монтажу ОП на гирлі свердловини насамперед обладнують викидну лінію до факельного амбару і лінію глушіння з блоком глушіння. Сама свердловина повинна бути заглушена. Вимогою є і той факт, що об'єм факельного амбару повинний бути не менший об'єму свердловини. В кінці викидної лінії можливе встановлення відкритої місткості при неможливості обладнання земляного факельного амбару. Об'єм даної місткості повинний бути не менше об'єму свердловини. Довжина викидної лінії від гирла до факельного амбару повинна бути не меншою 100 м. При високій щільності розташування свердловин на ПСГ і невеликих їх дебітах (до 100 тис.м³/добу) довжина викидної лінії допускається менше 100 м, але не менше 40 м.

Прокладання лінії глушіння і викидної лінії повинно споруджуватись похило від гирла, подалі від проїзних доріг, мереж електропередач, котельних та інших споруд. Лінії заборонено прокладати під приймальними містками і спорудами.

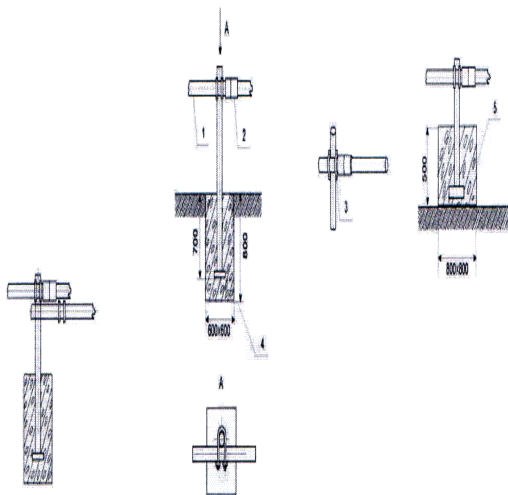
У виняткових випадках дозволяються повороти викидної лінії і лінії глушіння. Схема поворотів ліній повинна бути узгоджена зі спеціалізованою організацією, яка має відповідні дозволи Держгірпромнагляду. Вони виконуються із застосуванням кованих косинців на різьбових фланцях або трійників з буферним пристроєм.

До установаження їх слід опресувати на робочий тиск.

Діаметри внутрішніх діаметрів відводів трубної головки та встановлених на них засувок повинні відповідати діаметрам викидної лінії і лінії глушіння.

У зручному для обслуговування місці потрібно розміщувати викидну лінію і лінію глушіння. Кріпити її потрібно на спеціальних опорах, забетонуваних у ґрунт, або пересувних тумбах-опорах (рис. 4).

Не більшою 10 м повинна бути відстань між опорами (при умові встановлення якорів кріплення на гладкій частині кожної труби). 1 м не повинна перевищувати відстань останнього стояка від кінця відводу. Також для надійності поруч з останнім стояком (у бік гирла) встановлюється ще один стояк. У випадку повороту лінії встановлюються два стояки (в місці повороту).



1 – трубопровід викидний; 2 – муфта; 3 – вузол кріплення викидного трубопроводу до опору; 4 – опора; забетонувана в ґрунт; 5 – труба-опора

Рисунок 4– Кріплення вихідних трубопроводів на опорах, забетонуваних в ґрунт або на пересувних тумбах-опорах

Лінією продування повітрям від компресора піднімального агрегату або пересувного компресора потрібно обладнати обв'язку викидного трубопроводу. Після кожного відкриття

засувки на трубній головці, але не рідше одного разу на 10 діб необхідно проводити продування. При цьому потрібно робити відмітку в буровому журналі.

Збільшення діаметрів відводів лінії глушіння дозволяється можливе, але не більше ніж на 30 мм після блоку засувок. Заборонено виготовляти відводи з легкосплавних бурильних труб.

Трубопроводи від трубної головки до блоку засувок необхідно з'єднувати на фланцях, а після блоку засувок дозволено з'єднувати на замках або муфтах заводського виготовлення.

На відстані не менше 10 м від гирла свердловини необхідно встановлювати блок глушіння. Манометри на викидній лінії і лінії глушіння необхідно встановлювати на котушках або спеціальних фланцях з кранами високого тиску, з масляними роздільниками середовищ і шкалою тиску, що на 50 % перевищує тиск опресування обсадної колони.

Вимогою є і те, що необхідно встановлювати табличку, на якій водостійкою фарбою зазначено тиск опресування експлуатаційної колони. Розташовують її на видному місці блоку глушіння.

У випадку наявності переїзду через викидну лінію і лінію глушіння трубопроводи повинні бути закладені у труби діаметром не менше 219 мм. При цьому, потрібно (на ширину проїзду) виконувати обвалування. Проїжджу частину позначають віхами.

Одна з місткостей запасу промивальної рідини має бути відградуваною кожні 0,1 м³, обладнаною рівнемірром встановлена на висоті, що забезпечувала б доливання свердловини самопливом.

Монтаж ОП необхідно виконувати, забезпечуючи співвісність вишки, ротора і гирла свердловини.

Металевими кільцями ущільнюють фланцеві з'єднання всіх вузлів обв'язки. Не допускається застосування прокладок з інших матеріалів. Шпильки фланцевих з'єднань після кріплення повинні виступати над гайками на 1-3 нитки різі.

Дистанційним має бути керування превентером (перфораційною засувкою). Переважно його розміщують у пересувній металевій будці або під навісом, який

монтують з дощок товщиною не менше 50 мм, з металевим облицюванням завтовшки 2 мм, або з металевого листа товщиною не менше 5 мм із стіною, повернутою в бік свердловини. Стрілки, що вказують напрямки обертання штурвалу на закриття і відкриття, цифри, що вказують кількість обертів штурвалу до повного закриття, мітка, суміщення якої з міткою на валу штурвалу відповідає повному закриттю превентера; тиск опресування колони; діаметр встановлених плашок повинні бути нанесені перед кожним штурвалом на стіні водостійкою фарбою. У будці має бути освітлення у вибухобезпечному виконанні і зберігатися комплект ключів для фланцевих з'єднань превентера (перфораційної засувки).

На відстань не менше 10 м від гирла свердловини повинні виводитись штурвали ручного керування превентером (перфораційною засувкою) у легкодоступне безпечне місце. Приводи ручного керування превентером (перфораційною засувкою) розташовуються на спеціальних стояках. При цьому, їх заборонено встановлювати на відбійному щиті.

У напрямку місця встановлення штурвалів ручного керування превентером (перфораційною засувкою) потрібно розміщувати карданні вали приводів плашок. Так необхідно встановлювати, оскільки повинна бути можливість провести їх під основою. Кут між віссю карданного вала і віссю гідравлічного циліндра превентера не повинний перевищувати 8 градусів.

Противикидне обладнання повинно мати заводський паспорт. Всі нестандартні елементи обв'язки повинні виготовлятися відповідно до технічних умов, які узгоджені та затверджені в установленому порядку і мати паспорт.

Противикидне обладнання повинне бути розміщене на твердій основі, яка має невеликий схил для стікання рідини. Для роботи в темний час доби блок глушіння повинен мати належне освітлення.

Розміщувати цементувальні агрегати потрібно на спеціально підготовленому майданчику не ближче 25 м від гирла. Приєднання до обв'язки гирла свердловини відбувається через зворотні клапани.

Весь комплекс робіт та випробувань на ремонтній базі підприємства відповідно до вимог технологічних регламентів продовження терміну експлуатації ОП необхідно проводити, якщо термін амортизації обладнання закінчився перед установленням його на гирлі свердловини. Усі трубопроводи, арматура і засувки, які належать до комплексу ОП, після монтажу треба опресувати на робочий тиск.

Герметичність змонтованого імпортного ОП слід перевіряти відповідно до вимог щодо вітчизняного. На змонтоване обладнання складають у двох примірниках відомість, де зазначають:

- заводський та інвентарний номери обладнання;
- тип обладнання, рік випуску;
- тиск опресування на ремонтній базі (акт);
- внутрішні діаметри відводів;
- внутрішній діаметр, товщина стінки, марка сталі і довжина верхньої труби експлуатаційної колони;
- діаметр прохідного отвору обладнання;
- тиск, на який розраховано превентер;
- розміри плашок у превентері;
- розміри перехідних котушок;
- приєднувальні розміри фланців;
- тип і діаметр встановлених засувок;
- тиск опресування на гирлі (акт);
- копія сертифікату на кріплення деталей, виготовлених підприємством;
- перелік нестандартних деталей і вузлів з ескізами й актами про проведення дефектоскопії і на відповідність чинним технічним умовам;
- акт на виконання робіт з кріплення стояків викидної лінії і лінії глушіння;
- фактична схема обв'язки гирла з зазначенням розмірів по вертикалі і горизонталі, відстань від верхнього фланця ОП до роторних балок;
- тиск опресування кульових кранів (акт);
- тиск опресування викидної лінії і лінії глушіння (акт);
- дозвіл спеціалізованої організації на подальше продовження робіт. Один примірник відомості зберігає головний інженер, другий - майстер.

Противикидне обладнання повинно постійно перебувати в режимі оперативної готовності при експлуатації. [10]

Перед експлуатацією противикидне обладнання необхідно перевірити на справність та проінструктувати бригаду КРС щодо правил експлуатації обладнання і вимог фонтанної безпеки. Порядок перевірки противикидного обладнання перед його експлуатацією має відповідні вимоги:

- перевірити правильність монтажу ОП, наявність всієї документації (паспорти, акти на опресування) та необхідні написи на захисному щиті;
- перевірити технічну справність ОП;
- перевірити(у разі обладнання гирла свердловини превенторами) працездатність двох кранів кульових (одного на аварійній трубі, другого – запасного, розташованого в зручному місці біля поста бурильника);
- перевірити наявність на робочому майданчику всіх перевідників і патрубків.

Теми інструктажу обов'язково повинні враховувати такі особливості:

- причини та ознаки газопроявлень під час ремонту свердловин;
- дії бригади у разі виникнення газопроявлення.

Буровий майстер і начальник оперативно-виробничої служби щотижня зобов'язані перевіряти ОП у такому порядку:

- перевірити справність усіх манометрів;
- перевірити відповідність фактичної кількості обертів штурвалів ручного привода до повного закриття;
- перевірити герметичність кілець ущільнення штока привода плашок;
- перевірити затягування гайок кріплення обладнання на фланцях і хомутах;
- перевірити справність додаткових герметизувальних елементів ОП.

Плашки превентерів повинні відповідати діаметрам труб. У разі застосування колони труб різного діаметра плашки превентерів повинні відповідати діаметру верхньої секції бурильної колони (колони НКТ). На містках треба мати трубу, яка за діаметром і міцнісними характеристиками відповідає верхній секції бурильної колони (колони НКТ). Труба повинна мати кульовий кран, що перебуває у відкритому положенні, і

перевідник, які були піддані опресуванню в зборі і пофарбовані у червоний колір. На аварійній трубі фарбою наноситься мітка, яка відповідає відстані від ротора до плашок превентора, при цьому муфтове з'єднання повинно розташовуватися на 0,2-0,3 м нижче плашок превентора.

На початку зміни бригада КРС повинна перевіряти:

- стан ОП і підходів до нього;
- наявність аварійної труби з краном кульовим і необхідним перевідником, стан і захищеність різи на аварійній трубі та на перевіднику;
- наявність мітки на аварійній трубі;
- наявність та місце зберігання ключа керування краном кульовим;
- наявність та стан другого кульовогокрана;
- наявність запасного об'єму промивальної рідини відповідних параметрів кількістю, що дорівнює одному об'єму свердловини;
- місце зберігання та стан конуса для підвішування труб у котушці (якщо гирло обладнане перфораційною засувкою);
- місце зберігання та стан планшайби із засувкою та допускним патрубком. Особливу увагу необхідно звернути на стан та захищеність від ушкоджень ущільнювального металічного кільця та шпильок;
- наявність комплекту ключів для кріплення ОП;
- освітленість гирла, штурвалів ручного привода плашок та блоку дроселювання;
- положення засувок обв'язки ОП;
- положення штурвалів ручного привода плашок превентерів або перфораційної засувки. Інформацію про перевірку записують у буровий журнал.

Експлуатація обладнання повинна відповідати інструкції заводу-виробника.

Колона труб повинна бути підвішена на талевій системі у випадку закриття превентера. Гладку частину труби необхідно розмішувати проти плашок превентера, а засувки на викиді мають бути відкриті. [7]

Замінюючи деталі превентера, що вийшли з ладу, замінюючи плашки або сам превентер, ОП треба опресувати на тиск, визначений технічною службою

підприємства, враховуючи ступінь зношення колон.

Якщо температура нижче мінус 5 градусів за Цельсієм експлуатація ОП можлива при розігріванні його паром.

Бригади КРС потрібно забезпечити "Інструкцією з організування безпечного ведення робіт під час ліквідування газонафтоводопроявлень та відкритих газових і нафтових фонтанів" та надійним двостороннім радіо- або телефонним зв'язком.

При проведенні ремонтних робіт колонної головки свердловину потрібно загерметизувати установленням цементного моста або спеціального пакера.

При виявленні газопроявлення свердловину потрібно загерметизувати. У разі виникнення відкритого фонтану потрібно сповістити адміністрацію підприємства, спеціалізовану організацію, яка має відповідні дозволи Держгірпромнагляду і вжити заходи відповідно до плану ліквідації аварії.

Один раз на тиждень необхідно перевіряти співвісність вишки і ротора відносно гирла свердловини. Виконання даної умови проводиться для попередження пошкодження ОП, а також відсутність пошкоджень в місці кріплення колонної головки до технічної колони. Перевірку обов'язково потрібно оформляти актом.

Робочі бригади, які виконують капітальний ремонт свердловин повинні бути проінструктовані і мати практичні навички дій, які потрібно проводити у разі виникнення газопроявлення і відкритого фонтанування свердловини. Для набуття навичок практичних дій бригади КРС з герметизації гирла свердловини за максимально короткий час необхідно проводити навчальні тривоги "Викид" відповідно до вимог інструкції з дій обслуговуючого персоналу у випадку газопроявлень. Навчальні тривоги "Викид" буровий майстер повинен проводити 1 раз на місяць з кожною вахтою, інженерно-технічні працівники цеху КРС–1 раз на квартал за затвердженими графіками.

З причини вимушеного простою або ремонту наземного обладнання виникає необхідність перервати процес КРС. У всіх таких випадках потрібно вживати заходів для забезпечення фонтанної безпеки:

- бурильний інструмент або НКТ повинні бути спущені до максимально можливої глибини. За цих умов мінімальну глибину спуску труб (*L*), за якої вага колони труб перевищувала б виштовхувальну силу у випадку спорожнення стовбура свердловини від промивальної рідини у випадку газопроявлень, визначають за відповідною формулою;

- у разі обладнання гирла свердловини превентером із трубними плашками потрібно закрити превентер, кульовий кран та кінцеві засувки на відведеннях з хрестовини фонтанної арматури;

- у разі обладнання гирла свердловини перфораційною засувкою труби, розташовані у свердловині, треба підвісити на конусі у сидлі котушки; перфораційну засувку закрити, установити на ній планшайбу із засувкою, засувку на планшайбі закрити.

Планшайба до перфораційної засувки має бути закріплена на усі шпильки, гайки затягнуті з необхідним моментом.

У процесі закріплення:

- необхідно контролювати проміжок між фланцями;

- за свердловиною мають постійно наглядати члени вахти.

Заборонено припиняти роботи, коли ведуча труба, замок бурильної труби або муфта НКТ розташовані у роторі або проти плашок превентера.

Відновлення виконання робіт з КРС можливе і після тривалих перерв. Але, тоді слід вжити таких заходів із забезпечення фонтанної безпеки:

- встановити поточний пластовий тиск і переконатися, що створена на пласт репресія відповідає вимогам НПАОП 11.2-1.18;

- перевірити згідно з показами манометрів, чи немає надлишкового тиску на гирлі свердловини;

- відкрити засувки на місткість і переконатися у відсутності потоку розчину із свердловини;

- відновити циркуляцію, промити свердловину протягом одного циклу, контролюючи параметри розчину, переконатися, що ці параметри відповідають плановим і забезпечують необхідну репресію на пласт;

- якщо густина розчину, яким заповнена свердловина, недостатня для створення репресії на пласт, то необхідно підготувати розчин потрібної густини кількістю, що дорівнює двом об'ємам свердловини, і замінити розчин у свердловині на новий.

Якщо необхідно провести зміни типових схем об'язки гирла свердловин противикидним обладнанням, то дане питання потрібно погоджувати з територіальним органом Держгірпромнагляду та спеціалізованою організацією, яка виконує профілактичні та оперативні роботи з попередження та ліквідації протифонтанної безпеки на договірній основі та затвердити в організації, що експлуатує ПСГ.

Висновки. Підземні сховища відносяться до категорії найбільш ефективних і безпечних в екологічному відношенні засобів регулювання нерівномірності і забезпечення газопостачання промислових і комунально-побутових потреб. Але, процеси створення і подальшої експлуатації сховищ тягнуть за собою витрати газу. Питання вивчення втрат газу при експлуатації сховищ з метою їх зменшення потребує постійного аналізу у зв'язку з сучасними вимогами до газотранспортної системи.

Для зменшення втрат при експлуатації підземних сховищ при проведенні ремонтних робіт необхідно встановлювати ОП. Противикидне обладнання призначене для герметизації гирла нафтових і газових свердловин. Також його необхідно встановлювати для попередження відкритих фонтанів у ході капітального ремонту та герметизації гирла для ремонту. Основна вимога до противикидного обладнання – забезпечення високої герметизаційної здатності. Виконання цих умов зменшить втрати при проведенні ремонтних робіт на свердловинах.

Аналіз типових схем об'язки гирла свердловин противикидним обладнанням показує, що їх вибір необхідно проводити з урахуванням геолого-технічних характеристик сховища та параметрів режиму роботи свердловин. Також врахування потребує співвідношення пластового і гідростатичного тисків (які в певній мірі визначають дебіт свердловини). Від вибраної

типової схеми противикидного обладнання залежить методика експлуатації свердловини, а також технологія проведення ремонтних робіт, експлуатації свердловини в екстремальних умовах, виведення її з режиму роботи і повторне включення.

Важливо, щоб схема забезпечувала надійне функціонування і ремонт свердловини в умовах даного ПСГ. Тому до вибору кожної свердловини сховища повинний бути індивідуальний підхід, який базується на параметрах експлуатації.

Література

1. Навроцький Б. І. Сухін Є. І. Про втрати природного газу. Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу, 2004. № 2 (8). С. 168–171.
2. Федутенко А. М. Проблеми та перспективи розвитку підземного зберігання газу в Україні. Науковий вісник. Стан і перспективи підземного зберігання газу в Україні, 2004. 2(8). С.9-14.
3. Перович І. Л., Олесків Р.Є. Теоретичні аспекти моделювання процесів напружено-деформованого стану свердловин підземних сховищ газу. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2012. II (24). С. 126-129.
4. Olijnyk A. P., Chernova O. T. Estimation of gas losses based on the character of the state of wells of dashava storage. Eastern-evropean journal of enterprise technologyologies), 2017. 6/8(90). P. 25-32.
5. Бойко, В. С. Підземний ремонт свердловин: підручник. Івано-Франківськ: Факел, 2002. 465 с.
6. Сгупов Ю. А. Організація виробництва на промисловому підприємстві: навч. посіб. К.: центр навчальної літератури, 2006. 488 с.
7. Федутенко А. М. Проблеми та перспективи розвитку підземного зберігання газу в Україні. Науковий вісник. Стан і перспективи підземного зберігання газу в Україні, 2004. 2(8). С.9-14.
8. Шимко Р. Я., Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Федутенко А. М., Шваченко І. І. Забезпечення надійного функціонування ПСГ ДК "Укртрансгаз". Нефть и газ, 2002. № 4. С. 40–43.

9. Костриба І. В., Мосора Ю.Р., Дорохов М.А. Підвищення ефективності випробування противикидного обладнання. Міжнародна науково-технічна конференція "Нафтогазова енергетика", 2017 р., С. 157-159.

10. Підземні сховища газу. Монтаж і експлуатація противикидного обладнання при проведенні капітального ремонту свердловин. Технологічний регламент. Київ. ДК "УКРТРАНСГАЗ", 2004. 32 с.

11. Методика нормування витрат природного газу на компресорних станціях АТ "Укргазпром". УкрНДІГаз. Введ. 28.06.98. Харків: УкрНДІГаз, 1998. 52 с.

12. Бойко В. С. Підземний ремонт свердловин: підручник. Івано-Франківськ: Факел, 2002. 465 с.

REFERENCES

1. Navrotsky B. I. Sukhin, Y. I. About Natural Gas Losses. Scientific herald of the National Technical University of Oil and Gas, 2004. No. 2 (8). Pp. 168-171.

2. Fedutenko A. M. Problems and prospects of underground storage of gas in Ukraine. Scientific Herald Status and prospects of underground gas storage in Ukraine, 2004. 2 (8). P.9-14.

3. Perovich I. L., Oles'kov R. Ye. Theoretical aspects of simulation of stress-strain state of wells of underground gas storage. Modern achievements of geodesic science and production, 2012. II (24). Pp. 126-129.

4. Olijnyk A. P., Chernova O. T. Estimation of gas losses based on the character of the state of wells of dashava storage. Eastern-evropean

journal of enterprise technologyologies), 2017. 6/8 (90). P. 25-32.

5. Boyko, V.S. Underground repair of wells: textbook. Ivano-Frankivsk: Fakel, 2002. 465 с.

6. Yegupov Yu.A. Organization of production at an industrial enterprise: teaching manual K .: Center for Educational Literature, 2006. 488 с.

7. Fedutenko A. M. Problems and prospects of underground storage of gas in Ukraine. Scientific Herald Status and prospects of underground gas storage in Ukraine, 2004. 2 (8). Pp. 9-14.

8. Shimko R. Ya., Vecheryk R. L., Khayetsky Yu. B., Fedutenko A. M., Shvachenko I. I. Ensuring reliable functioning of the UGS Ukrtransgas. Oil and gas, 2002. No. 4. P. 40-43.

9. Kostriба IV, Mosora Yu. R., Dorokhov MA Improvement of the effectiveness of anti-theft equipment testing. International scientific and technical conference "Oil and Gas Industry", 2017, pp. 157-159.

10. Underground gas storage. Installation and operation of anti-theft equipment during major overhaul of wells. Technological regulations. Kiev. DK "UKRTRANSGAZ", 2004. 32 p.

11. Method of normalization of natural gas consumption at compressor stations АТ "Ukrgazprom". UkrNIIGaz Introduction 28.06.98. Kharkiv: UkrNIIGaz, 1998. 52 p.

12. Boyko V.S. Underground repair of wells: a textbook. Ivano-Frankivsk: Torch, 2002. 465 p.

УДК 004.6

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-26-31

АПАРАТНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В ПРИМІЩЕННІ

М.О.Слабінога, А.Б.Гавриш, Н.В.Іванків.

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

Робота присвячена розробці апаратного та програмного забезпечення системи моніторингу якості повітря в приміщенні. Було проведено аналіз існуючих рішень в галузі домашніх систем моніторингу якості повітря, виділено їхні основні переваги та недоліки, в результаті яких представлено вимоги до системи що розробляється. Виходячи з вимог, було розроблено загальну структуру системи, та вибрано засоби для реалізації її апаратного та програмного забезпечення. Зокрема, було прийняте рішення розробляти систему на базі концепції "Інтернет речей", та наступними складовими: вузол збору даних, сервер опрацювання та зберігання даних, клієнтські додатки (веб-інтерфейс та мобільний додаток для операційної системи Android). Вузол збору даних з датчиків та відправки запитів на сервер було спроектовано на базі мікропроцесорної плати ESP8266. Взаємодію між вузлами системи було реалізовано з допомогою HTTP-запитів. В результаті, спроектовано та реалізовано апаратне та програмне забезпечення для системи моніторингу якості повітря в приміщеннях, що базується на концепції "Інтернет речей" та дозволяє здійснювати поточний моніторинг якості повітря, а також переглядати дані попередніх записів з допомогою користувацьких інтерфейсів. Було реалізовано два інтерфейси користувача: веб-орієнтований (на базі розробленої структури сайту), з використанням технологій веб-розробки, та у вигляді додатку для мобільних пристроїв, що працюють на базі операційної системи Android (на основі розробленої діаграми активностей та класів, з використанням мови програмування Java). Проведене тестування та наведено приклади використання даних інтерфейсів користувача в реальних умовах. Розроблене апаратно-програмне рішення дозволяє ефективно вирішувати задачу моніторингу показників якості повітря в приміщеннях, а вартість компонентної бази та затрат на розробку є нижчою від вартості готових комерційних рішень з аналогічними характеристиками.

Ключові слова: метеостанція, моніторинг якості повітря, мікропроцесорна система, цифрові датчики, інтернет речей.

Работа посвящена разработке аппаратного и программного обеспечения системы мониторинга качества воздуха в помещении. Был проведен анализ существующих решений в области домашних систем мониторинга качества воздуха, выделены их основные преимущества и недостатки, в результате которых представлены требования к разрабатываемой системе. Исходя из требований, была разработана общая структура системы, и выбраны средства для реализации ее аппаратного и программного обеспечения. В частности, было принято решение разрабатывать систему на базе концепции "Интернет вещей", и следующими составляющими: узел сбора данных, сервер обработки и хранения данных, клиентские приложения (веб-интерфейс и мобильное приложение для операционной системы Android). Узел сбора данных с датчиков и отправки запросов на сервер был спроектирован на базе микропроцессорной платы ESP8266. Взаимодействие между узлами системы было реализовано с помощью HTTP-запросов. в результате, спроектировано и реализовано аппаратное и программное обеспечение для системы мониторинга качества воздуха в помещениях, основанной на концепции "Интернет вещей", которое позволяет осуществлять текущий мониторинг качества воздуха, а также просматривать данные предыдущих записей с помощью пользовательских интерфейсов. Было реализовано два интерфейса пользователя: веб-ориентированный (на базе разработанной структуры сайта), с использованием технологий веб-разработки, и в виде приложения для мобильных устройств, работающих на базе операционной системы Android (на основе разработанной диаграммы активностей и классов, с использованием языка программирования Java). Проведено тестирование и приведены примеры использования данных интерфейсов в реальных условиях. Разработанное аппаратно-программное решение позволяет эффективно решать задачу мониторинга показателей

качества воздуха в помещениях, а стоимость компонентной базы и затрат на разработку ниже стоимости готовых коммерческих решений с аналогичными характеристиками.

Ключевые слова: метеостанция, мониторинг качества воздуха, микропроцессорная система, цифровые датчики, интернет вещей.

The work is devoted to the development of hardware and software for indoor air quality monitoring system. The analysis of existing solutions in the field of home air quality monitoring systems was carried out, their main advantages and disadvantages were highlighted, as a result of which the requirements to the developed system were presented. Based on the requirements, the general structure of the system was developed, and the means for the implementation of its hardware and software were selected. In particular, it was decided to develop a system based on the concept of "Internet of Things", and the following components: data collection node, data processing and storage server, client applications (web interface and mobile application for Android operating system. Node for data collection from sensors and sending requests for the server were designed on the basis of the microprocessor board ESP8266, the interaction between the nodes of the system was implemented using HTTP-requests, as a result, designed and implemented hardware and software for indoor air quality monitoring system based on the concept of "Internet of Things" and allows to monitor the current air quality, as well as view the data of previous records using user interfaces. Two user interfaces have been implemented: web-based (based on the developed site structure), using web development technologies, and as an application for mobile devices, running on the operating system Android (based on the developed activity and class diagram, using the Java programming language. Testing and examples of using these user interfaces in real conditions. The developed hardware and software solution allows to effectively solve the problem of monitoring indoor air quality indicators, and the cost of the component base and development costs is lower than the cost of ready-made commercial solutions with similar characteristics.

Keywords: meteorological station, air quality monitoring, microprocessor system, digital sensors, Internet of Things.

На даний момент, проблема моніторингу якості повітря є надзвичайно актуальною в світі. Попри відносно непогану екологічну обстановку в Україні, станом на 29 жовтня 2020 року, столиця України перебувала в трійці мегаполісів з найгіршою якістю повітря [1]. Крім того, як показали події 2020 року, лісові пожежі та пожежі на сміттєзвалищах можуть дуже швидко змінювати екологічну обстановку в гіршу сторону. Тому, оперативний моніторинг якості повітря в домашніх умовах є доволі актуальною технічною задачею.

На даний момент, існує велика кількість рішень в галузі так званих "домашніх метеостанцій". При цьому, у більшості з них є ряд недоліків, зокрема:

- частина таких пристроїв не має давачів, що дають змогу оцінити зади́мленість або якість повітря, і фокусується тільки на температурі та вологості повітря;

- більшість недорогих пристроїв мають вивід тільки на рідкокристалічний дисплей і не фіксують значення, а просто виводять їх, не маючи можливості зберігати дані і передавати їх назовні;

- значна частка вартості пристроїв припадає на їх ергономіку корпусу та дисплей, тоді як виготовлення корпусу у вигляді звичайної коробки та використання передачі даних в інтернет та відображення з допомогою веб-інтерфейсу замість дисплею значно спростить дизайн та знизить ціну таких пристроїв.

Виходячи з вищезазначених недоліків було прийнято рішення спроектувати апаратне та програмне забезпечення моніторингу якості повітря в домашніх умовах, що базується на концепції "Інтернет речей" [2-5] та наступних принципах:

- максимальна стандартизація компонент з метою можливості виготовлення такої системи в домашніх умовах за специфікацією;

- низька вартість компонентної бази;

- підключення пристрою до мережі інтернет для запису показників в базу даних

- створення веб-інтерфейсу для відображення даних з бази;

- створення мобільного додатку для перегляду даних з бази на пристроях, що

працюють під операційною системою Android.

Загальний принцип роботи системи зображений на рис. 1.

Дані, отримані з датчиків метеорологічних параметрів з допомогою мікроконтролера збираються та передаються через мережевий протокол безпроводного зв'язку Wi-Fi на сервер з мережевим скриптом, що опрацьовує дані та базу, в яку вони будуть розміщені. З бази з допомогою мережевого скрипта дані можуть передаватися в веб-інтерфейс на будь-якому обчислювальному пристрої, що має інтернет-браузер.

Як контролер вузла збору інформації була вибрана мікропроцесорна плата ESP8266. До цієї мікропроцесорної плати було підключено наступні датчики:

- DHT11 — для вимірювання температури та вологості повітря;
- BMP180 — для вимірювання атмосферного тиску;
- MQ-2 — датчик на основі газочутливого матеріалу SnO₂, який здатний вимірювати показник загазованості повітря.

Загальна вартість компонентної бази системи (включаючи акумулятор, металевий корпус, провідники, модуль живлення HW-131) складає 635 грн, що є доволі низькою вартістю для системи з такими характеристиками та вимірювальними параметрами.

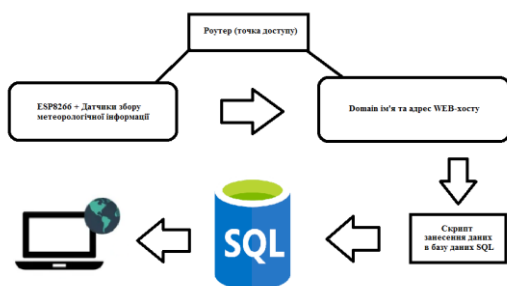


Рисунок 1 — Загальний принцип роботи системи моніторингу якості повітря.

Програмне забезпечення компонента збору даних з датчиків та відправки їх через мережу інтернет розроблялося з

використанням середовища Arduino IDE та включало використання наступних бібліотек:

- бібліотека роботи з датчиком DHT-11;
- бібліотека роботи з датчиком BMP-180;
- бібліотека Wire для роботи з датчиками сімейства MQ;
- бібліотека ESP8266WiFi для підключення до мережі WiFi;
- бібліотека ESP8266HTTPClient для відправки запитів до сервера з використанням мережевого протоколу HTTP.

Загальний вигляд вузла збору даних та відправки їх на сервер подано на рис. 2.

Для розробки серверного програмного забезпечення було використано мову програмування PHP та сервер баз даних MySQL. Для обміну повідомленнями між пристроями було використано формат JSON.



Структура бази даних (БД) подана на рис. 3.

Рисунок 2 — Апаратне забезпечення вузла збору показників якості повітря в приміщенні у зборі

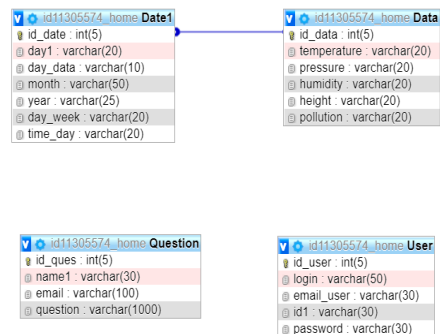


Рисунок 3 — Структура бази даних

База даних складається з 4 таблиць:
 - таблиця date1 зберігає дані про дату, день тижня, місяць, рік;
 - таблиця Data містить інформацію про показники температури, вологості, тиску, рівня забруднення;
 - таблиця Question містить звернення, отримані через форму зворотнього зв'язку у веб-додатку;
 - таблиця User містить облікові записи користувачів системи.

Веб-інтерфейс системи реалізований засобами мови розмітки HTML5 та технології CSS3, а також мови програмування Javascript. Структура сайту, що реалізує веб-інтерфейс системи, поданий на рис. 4.

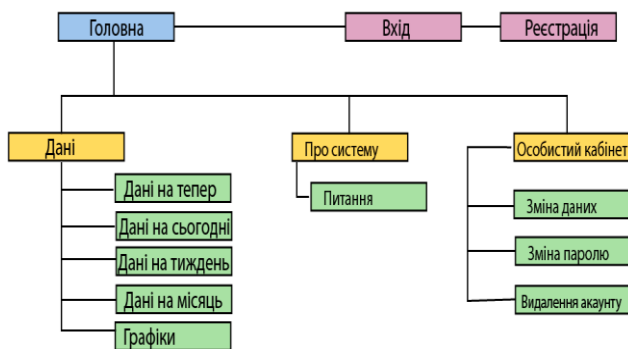


Рисунок 4 — Структура веб-інтерфейсу

Головна сторінка містить посилання на вхід в систему та реєстрацію нового користувача. З головної сторінки можна перейти на сторінку “Дані”, що містить поточні дані, сьогоднішні дані, дані за тиждень, дані за місяць, а також візуалізацію у вигляді графіків. На сторінці “Про систему” можна задати запитання щодо її функціонування. Сторінка “Особистий кабінет”, доступна для авторизованих користувачів, містить можливість зміни даних користувача, відновлення паролю та видалення акаунту. Реалізація веб-інтерфейсу на сторінці “Дані за день” подана на рис. 5.

Крім того, був розроблений мобільний додаток для телефонів, що працюють на базі системи Android. Структура взаємодії екранів подана на рис. 6. Початковий екран пропонує користувачу увійти, зареєструватися, або сигналізує про відсутність інтернету. В головному меню можна переключатися між

поточними показниками, історією вимірювання та даними за тиждень. Даний інтерфейс реалізується системою класів, яка подана на діаграмі класів на рис. 7.

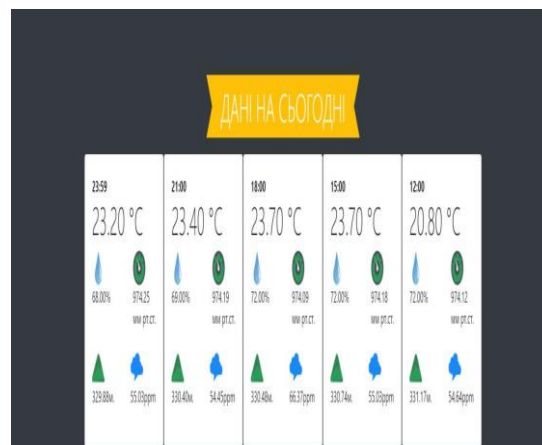


Рисунок 5 — Інтерфейс користувача на сторінці “Дані за день”

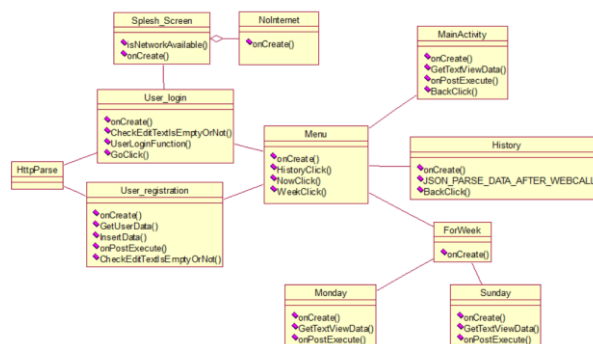


Рисунок 6 — Діаграма класів мобільного додатку

Splash_Screen – підклас AppCompatActivity, екземпляр даного класу створюється при запуску додатку і відповідальний за відображення екрану завантаження. В даному класі знаходиться функція isNetworkAvailable(), яка за допомогою ConnectivityManager перевіряє стан мережі мобільного пристрою.

NoInternet – клас, який активується, коли на пристрою користувача відсутнє підключення до Інтернету.

User_login – клас, до якого користувач переходить після екрану запуску додатку, в ньому описується авторизація в систему. CheckEditTextIsEmptyOrNot() – метод, який перевіряє чи заповнив користувач всі необхідні поля. Після перевірки, метод UserLoginFunction() звіряє з даними, що знаходяться в БД, інформацію, введену користувачем. Та функція GoClick забезпечує перехід до форми реєстрації користувача.

User_registration – клас, в якому здійснюється реєстрація нового користувача. Реєстрація здійснюється в методі InsertData(), шляхом внесення даних до БД. Далі метод «звертається» до PHP – скрипта, та вносить інформацію, яку отримує з функції GetUserData(), що зчитує введені користувачем дані. Інформація записується до БД після того як користувач заповнює всі необхідні поля, коректність внесених даних перевіряється методом CheckEditTextIsEmptyOrNot().

HttpParse – клас, в якому здійснюється підключення до Інтернету.

Menu – забезпечення меню додатку. Даний клас має чотири простих методи. onCreate() – стандартний метод який забезпечує зв'язок класу з відповідними графічними елементами. HistoryClick(), NowClick(), WeekClick() – функції які «викликають» Intent. Intent є об'єктом обміну повідомленнями, за допомогою якого можна запросити виконання дії у компонента іншого вікна. Тобто дані методи відкривають забезпечують перехід користувача до необхідних йому даних.

MainActivity – даний клас відображає інформацію для користувача, а саме стан показників повітря на даний момент, за допомогою методу onCreate(), який задає початкову установку параметрів при ініціалізації активності. BackClick() – метод який запезпечує перехід до попередньої активності. Функції даного класу створені для отримання даних з серверу та виведення їх на екран. Головні можливості класу реалізовані за допомогою HttpClient - базового класу для відправки HTTP - запитів і отримання HTTP-відповідей від ресурсу із заданим URI.

ForWeek – підклас TabActivity, який представляє розділ з даними за тиждень. В даному класі, за допомогою TabHost, який є

контейнером, що дозволяє групувати пов'язані елементи управління в серію вкладок, створені вкладки, з інформацією за понеділок, вівторок і т.д.

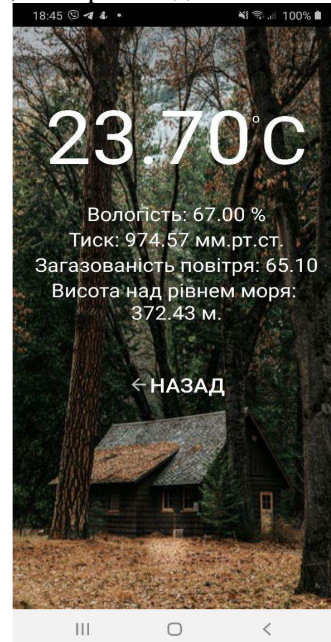


Рисунок 7 — Приклад інтерфейсу мобільного додатку

History – підклас AppCompatActivity який представляє «Історію погоди» та реалізує вивід даних про погоду в певний день. Для отримання даних з БД в методі JSON_WEB_CALL() здійснюється запит на отримання відповідей JSONArray на задану URL-адресу. Якщо записи існують, список даних виводить методом JSON_PARSE_DATA_AFTER_WEBCALL().

Приклад функціонування даного мобільного додатку подано на рис. 7.

Таким чином, було спроектовано та реалізовано апаратне та програмне забезпечення для системи моніторингу якості повітря в приміщеннях, що базується на концепції «Інтернет речей» та дозволяє здійснювати поточний моніторинг якості повітря, а також переглядати дані попередніх записів з допомогою мобільних пристроїв, що працюють на базі операційної системи Android (через мобільний додаток), а також пристроїв, на яких встановлений інтернет-браузер (через веб-інтерфейс). Вартість компонентної бази та затрати на розробку системи є значно меншими, порівняно з комерційними рішеннями, що володіють подібними характеристиками.

Література

1. Air quality in Kyiv [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.iqair.com/ukraine/kyiv>
2. Tromp, Jolanda & Le, Dac-Nhuong & Le, Chung. (2020). INTERNET OF THINGS. 10.1002/9781119654674.part2.
3. Jianyun, Chen & Yunfan, Sun & Chunyan, Lin. (2017). Research on Application of Automatic Weather Station Based on Internet of Things. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 104. 012015. 10.1088/1755-1315/104/1/012015.
4. Djordjevic, Milos & Dankovic, Danijel. (2019). A smart weather station based on sensor technology. Facta universitatis - series: Electronics and Energetics. 32. 195-210. 10.2298/FUEE1902195D.
5. Ossont, Steven & Apetroaie-Cristea, Mihaela & Scott, M. & Cox, S.J.. (2016). Applied Internet of Things. 10.1016/B978-0-12-805395-9.00015-0.

References

1. Air quality in Kyiv [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://www.iqair.com/ukraine/kyiv>
2. Tromp, Jolanda & Le, Dac-Nhuong & Le, Chung. (2020). INTERNET OF THINGS. 10.1002/9781119654674.part2.
3. Jianyun, Chen & Yunfan, Sun & Chunyan, Lin. (2017). Research on Application of Automatic Weather Station Based on Internet of Things. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 104. 012015. 10.1088/1755-1315/104/1/012015.
4. Djordjevic, Milos & Dankovic, Danijel. (2019). A smart weather station based on sensor technology. Facta universitatis - series: Electronics and Energetics. 32. 195-210. 10.2298/FUEE1902195D.
5. Ossont, Steven & Apetroaie-Cristea, Mihaela & Scott, M. & Cox, S.J.. (2016). Applied Internet of Things. 10.1016/B978-0-12-805395-9.00015-0.

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 622.673.1: 681.514.54

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-32-39

ДОСТОВЕРНОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В МОБИЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ

В.В. Лопатин

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, vlor@ukr.net

Гірські і нафтогазові підприємства (ГНПП) України експлуатують потенційно небезпечне обладнання різних виробників, яке знаходиться на межі вироблення ресурсу, тому потрібне створення методів і засобів технологічного контролю, що відповідає нормативно-правовим актам і галузевим стандартам. Найбільш перспективними засобами технологічного контролю ГНПП є мобільні системи контролю (МСК). Процес виробничого контролю мобільними системами контролю ГНПП обумовлений граничними можливостями, закладеними фізичними процесуальними явищами які формують конкретний виробничий контроль. Викладена точка зору автора, що він розуміє під термінами перебраковка і недобраковка в МСК і свої погляди на інші істотні питання достовірності контролю. Запропоновано для підвищення достовірності адресного інструментального контролю провідників жорсткої армування шахтного стовбура використовувати коефіцієнт варіації глибини корозії для конкретної шахти. Детально розглянуто методику та технологія трипараметричного контролю МСК в загальному вигляді. Запропоновано використовувати діаграму Ісікава для виявлення причинно-наслідкових взаємозв'язків між факторами і наслідками в досліджуваній задачі контролю для знаходження оптимального варіанту вирішення. Викладена оригінальна точка зору технологічного контролю і запропоновано новий підхід визначення показників достовірності контролю ГНПП. Запропоновано використовувати аналіз бюджету невизначеності МСК для поліпшення методики контролю і підвищення точності МСК.

Ключові слова: мобільні системи контролю (МСК), достовірність контролю, оцінка інформативності, коефіцієнт варіації, бюджет невизначеності, діаграма Ісікава.

Mining and oil and gas enterprises (MOGE) of Ukraine operate potentially hazardous equipment of various manufacturers that are on the verge of developing a resource, therefore it is necessary to create methods and means of technological control that comply with regulatory legal acts and industry standards. The most promising means of technological control of MOGE are mobile control systems (MCS). The process of production control by mobile control systems of MOGE is determined by the maximum capabilities inherent in the physical process phenomena that form a specific production control. The author's point of view is stated that he understands the terms re-refining and non-refining in the MCS and his views on other significant issues of the reliability of control. It is proposed to use the coefficient of variation of the depth of corrosion for a specific mine to increase the reliability of targeted instrumental control of conductors of rigid reinforcement of a mine shaft. The methodology and technology of three-parameter control of MCSs in general are examined in detail. It is proposed to use the Ishikawa diagram to identify causal relationships between factors and consequences in the control problem under study in order to find the optimal solution. An original point of view of technological control is stated and a new approach is proposed for determining the reliability indicators of MOGE control. It is proposed to use the analysis of the budget for the uncertainty of MCSs to improve the control methodology and increase the accuracy of MCSs.

Key words: mobile control systems (MCS), reliability of control, assessment of information content, coefficient of variation, uncertainty budget, Ishikawa diagram.

Горные и нефтегазовые предприятия (ГНПП) Украины эксплуатируют потенциально опасное оборудование различных производителей находящееся на грани выработки ресурса, поэтому мутребуется

создание методов и средств технологического контроля, отвечающим нормативно-правовым актами отраслевым стандартам. Наиболее перспективными средствами технологического контроля ГНПП являются мобильные системы контроля (МСК). Процесс производственного контроля мобильными системами контроля ГНПП обусловлен предельными возможностями, заложенными физическими процессуальными явлениями которые формируют конкретный производственный контроль. Изложена точка зрения автора, что он понимает под терминами перебраковка и недобраковка в МСК и свои взгляды на другие существенные вопросы достоверности контроля. Предложено для повышения достоверности адресного инструментального контроля проводников жесткой армировки шахтного ствола использовать коэффициент вариации глубины коррозии для конкретной шахты. Подробно рассмотрена методика и технология трехпараметрического контроля МСК в общем виде. Предложено использовать диаграмму Исикавы для выявления причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой задаче контроля для нахождения оптимального варианта решения. Изложена оригинальная точка зрения технологического контроля и предложен новый подход определения показателей достоверности контроля ГНПП. Предложено использовать анализ бюджета неопределенности МСК для улучшения методики контроля и повышения точности МСК.

Ключевые слова :мобильные системы контроля (МСК),достоверность контроля, оценка информативности, коэффициент вариации,бюджет неопределенности, диаграмма Исикавы.

Формулировка проблемы.

Экономический кризис, спровоцированный пандемией каронавируса, ставит серьезные задачи достоверности контроля на горных и нефтегазовых предприятиях. Горные и нефтегазовые предприятия Украины имеют ряд своих существенных особенностей и специфики связанной с безопасностью и охраной труда. Специфика и сложность контроля технологических процессов в горной отрасли заключается в проблематичности использования приборов и оборудования без отраслевой (ведомственной) экспертизы на соответствие нормативно-правовым актам и отраслевым стандартам Украины (СОУ)с согласованием и утверждением актов отраслевой (ведомственной) приемки другую специфику [1-3].

Процесс производственного контроля мобильными системами контроля (МСК)на горных и нефтегазовых предприятиях (ГНПП) обусловлен предельными возможностями, заложенными физическими процессуальными явлениями которые формируют конкретный производственный контроль [1-3]. Практика автора убедительно показала, что не существует аккуратных и последовательных применений математических знаний в технике производственного контроля на ГНПП. Бытует заблуждение и мнение о том, что для получения правильного ответа по конкретному производственному контролю на ГНПП вполне достаточно аккуратно и последовательно

применить известный вычислительный метод, что на практике, как правило, не работает. Например, на одном из производственных совещаний было сообщение, что вероятность аварии подъемного сосуда равна 10^{-6} за один час его работы. Понятно, что результат 10^{-6} получен делением взятых за определенный промежуток времени аварий для определенной группы подъемных сосудов на общее число их работы. Автор считает, что к выводам, полученным подобным образом, нужно относиться как кне имеющим точный количественный смысл, т.к. затруднительно определить, вероятность какого именно события они характеризуют: слишком различны подъемные сосуды и условия их работы, чтобы можно было все промежутки их работы часовой длительностью считать ансамблем статистически однородных экспериментов. Не верифицированные вероятностные модели контроля на ГНПП оказываются на практике абсолютно бесполезными, могущими претендовать на некоторую «истинность» в «общем» или «целом». С точки зрения автора причина бытующего заблуждения связана с принципиальной неясностью понятия статистического ансамбля и в логических и последовательных противоречиях математической статистики.

Как известно достоверность контроля является основным показателем эффективности любого неразрушающего контроля (НК) [4, 5]. Под достоверностью

контроля МСК, автором понимается вероятность принятия безошибочных решений, по результатам НК с помощью МСК. Таким образом, в МСК устанавливаются конкретные параметры объекта контроля ГНПП, чтобы оценить возможности контроля МСК с вероятностной точки зрения.

Существует несколько взглядов и научных подходов определения показателей достоверности контроля [4-14]. Поэтому автор излагает свою точку зрения, что он понимает под терминами перебраковка и недобраковка в МСК и свои взгляды на другие существенные вопросы достоверности контроля.

Изложение основного материала и результаты исследований

В отличие от приведенного выше примера, неопределенность контроля мобильными системами контроля (МСК) является имеющую точный количественный смысл, количественную меру и оценку качества контроля параметра МСК достоверностью того, насколько надежной является полученный МСК результат. С точки зрения автора, перебраковка в МСК – ошибка первого рода с математической точки зрения и риск поставщика с практической (ложный брак). То есть МСК определяет объект контроля дефектным, когда параметры объекта контроля не выходят за рамки допустимых технических параметров на данный объект. Недобраковка в МСК - ошибка второго рода с математической точки зрения и риск потребителя с практической (скрытый брак). То есть МСК определяет объект контроля годным к эксплуатации, когда параметры объекта существенно выходят за рамки допустимых технических параметров на данный объект контроля.

Таким образом, неопределенность в МСК означает увеличение степени достоверности результата контроля. Количественная оценка неопределенности МСК осуществляется двумя подходами:

- с применением закона распределения неопределенности контроля (если он известен);

- по методу Монте-Карло (когда распределение значительно отличается от нормального).

Стандартная неопределенность МСК выражается средним квадратичным отклонением, а расширенная неопределенность выражается интервалом, рассчитанным на основании ряда экспериментальных данных (по методу А) или на основании дополнительной информации (по методу В).

Исходными данными для оценивания стандартной неопределенности МСК по типу А являются выборка многократного контроля (измерений) $x_{i1}, \dots, x_{in}; i = 1, \dots, m$. На

основании этой выборки рассчитывается среднее арифметическое \bar{x}_i по формуле (1), которое является оценкой входной величины X_i ,

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n x_{ig}. \quad (1)$$

Стандартная неопределенность, связанная с оценкой \bar{x} является экспериментальным стандартным отклонением среднего значения и равна положительному квадратному корню из экспериментальной дисперсии среднего значения.

Стандартная неопределенность $u(x_i)$ вычисляется по формуле

$$u(x_i) = u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{g=1}^n (x_{ig} - \bar{x}_i)^2}. \quad (2)$$

для результата измерения $x_i = \bar{x}_i$, вычисленного как среднее арифметическое.

Как известно, достоверность контроля, характеризующая степень соответствия его результатов фактическому техническому состоянию объекта, определяется двумя показателями: точностью и доверительной вероятностью. Например, с целью определения возможности дальнейшей безопасной эксплуатации проводников жесткой армировки (ПЖА) шахтного ствола автором были проведены коррозионные исследования и ультразвуковая толщинометрия ПЖА [6].

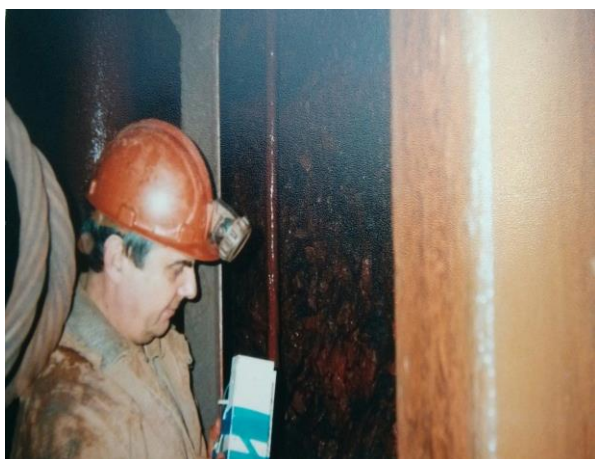


Рисунок 1. Шахтный эксперимент по эффективному обнаружению дефектов вкоробчатых ПЖА экспериментальной аппаратурой



Рисунок 2. Сквозное повреждение коробчатого ПЖА

При адресном контроле (мониторинге) ПЖА [6] возникает вопрос о достаточном и необходимом числе контрольных замеров (рис 1-2). Как известно, контроль в условиях шахтного ствола очень трудоемкая операция, которая парализует на время контроля транспортную цепочку «забой – поверхность». Сплошной контроль ПЖА в экстремальных условиях шахтного ствола практически парализует шахту и ставит её в трудное экономическое положение. Поэтому инструментальному контролю подвергают только ПЖА подвергающиеся повышенным нагрузкам и коррозии. Автор предлагает для повышения достоверности инструментального контроля ПЖА использовать коэффициент вариации глубины коррозии для конкретной шахты, v_k . Коэффициент вариации v_k можно достаточно точно определить на

демонтированных проводниках ПЖА для конкретной шахты. Из практики коэффициент вариации 0,1 – 0,4. (см. табл.1).

Таблица 1. Возможное процентное превышение изменения глубины коррозии ПЖА при доверительной вероятности 0,95

Отношение площади контролируемого участка к площади проводника (б/м)	v_k (б/м)			
	0,1	0,2	0,3	0,4
2	27,3	68,4	132	235
10	37,2	89,4	173	331
100	42,6	103	211	407

Как видно из табл.1 при известном коэффициенте вариации глубины коррозии v_k для конкретной шахты можно с приемлемой точностью для практики (30-50%) проводить мониторинг ПЖА по однократному контрольному замеру ультразвуковым толщиномером. Например, типа ЕРОСН 6LT фирмы Olympus, совместимым с МСК (рис 3).

Необходимо отметить, что при контроле одного и того же параметра одним МСК или одинаковыми методами данные контроля (параметры) должны согласовываться между собой в пределах, определяемых теорией ошибок.

Если такого согласия нет, т.е. возникает, например, корреляция между близкими во времени контрольными измерениями, то это тревожная информация о работе МСК. Поэтому, нами часто в методиках измерения МСК применяется случайный выбор объектов или точек измерения (рандомизация) для контрольной группы измерений, поскольку иным путем нельзя оценить влияние (действие) какого-то фактора в объекте контроля.

При этом средние значения существенных параметров объекта контрольных измерений, составляющих экспериментальную и контрольную группу измерений, не должны статистически значимо отличаться. Возникают существенные проблемы анализа, когда параметров, по которым производится сравнение, не один, а

много, причем их значения независимы. Мы стараемся избегать подобной ситуации гибким изменением методики контроля МСК.



Рисунок 3. Толщиномер типа EPOCH 6LT фирмы Olympus.

Рассмотрим трехпараметрический контроль МСК. По известным методикам, например [15-18] сформируем выборки энтропийного преобразования и будем их в дальнейшем использовать для сравнительного анализа информативности контролируемых параметров и оценки принимаемых МСК решений. Понятно, что получим три оценки принимаемых МСК решений. При рассмотрении принятия решений МСК по разности двух контролируемых параметров получим тоже три оценки. Однако следует учитывать оценку, когда используются все три контролируемых параметра. Таким образом, получаем семь возможных одномерных оценок. Понятно, что в этих семи оценках не учитываются корреляционные связи между выборками различных параметров. Поэтому автор считает необходимым анализ информативности разностей двумерных энтропийных преобразований. Таким образом, получаем по известным методикам семь двумерных оценок, которые учитывают корреляционные связи между выборками различных параметров. Аналогичным образом при необходимости получаем семь трехмерных оценок. По результатам трехпараметрического контроля проводится оценка информативности контролируемых МСК параметров для их анализа и подготовки данных для поддержки принятия решений в МСК. Автор считает, что оценка информативности контролируемого МСК параметра менее 0.5- сомнительна и свидетельствует о малой информативности

данного контролируемого параметра. С точки зрения автора, использование сомнительного параметра ухудшает вероятность принятия решения и оценку контроля МСК, что полностью подтверждается его многолетней практикой на ГНПП.

Общеизвестно, чем проще теоретическая наука, тем шире область ее применения и наоборот. Поэтому, автор сторонник необходимо-достаточных и простых моделей в МСК. Практика автора показывает, что для правильной оценки условной вероятности ошибок первого и второго рода в МСК необходимо всегда в результате контрольного замера обязательно показывать неопределенность замера, а также неопределенность измерительного преобразователя МСК. С точки зрения автора термин «неопределенность» – мера сомнений в том, насколько точно результат контроля представляет значение контролируемого МСК параметра. Неопределенность в МСК является количественной мерой того, насколько надежна оценка контроля и предполагает увеличение степени достоверности контроля. Итоговую оценку суммарной стандартной неопределенности результата контроля МСК - «бюджет неопределенности» получают из неопределенностей контролируемых параметров включающих данные по каждому контролируемому параметру и его вкладе в результат контроля.

Важно отметить, что бюджет неопределенности МСК относится к определенному результату контроля. Однако, разработанный алгоритм бюджета неопределенности, изложенный в методике расчета неопределенности, можно применять ко всем контрольным замерам, проведенным с использованием того же метода и того же МСК. А так как бюджет неопределенности МСК содержит информацию об относительных величинах вкладов всех контролируемых параметров в неопределенность, то данная информация является основным источником для улучшения методики контроля и повышения точности МСК. С целью обобщения источников неопределенности контролируемых МСК параметров и выявления источников неопределенности автор считает

целесообразным использовать диаграмму Исикавы для выявления причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой задаче контроля для нахождения оптимального варианта решения. С точки зрения автора, только в случае, когда достоверно математическое описание физических явлений, предопределяющее процесс контроля на ГНПП, может быть сформулирована задача компенсации их искажающего влияния путем построения соответствующего вычислительного метода в МСК. Только в этом случае можно гарантировать оценку контролируемого МСК параметра по заданным границам его допустимых значений («в допуске», «за допуском»), что очень важно на горных и нефтегазовых предприятиях (ГНПП). Необходимо помнить об обязательной государственной метрологической аттестации (допуске) МСК действующей на всех ГНПП Украины.

Таким образом, автор придерживается мнения, что построение матрицы оценки достоверности в МСК будет эффективной только в случае использования норм допустимости на конкретном объекте контроля и оценки возможности этого контроля с вероятностной точки зрения. В своих работах автор неоднократно высказывал данную точку зрения, подтвержденную практикой на ГНПП.

Выводы

Изложена оригинальная точка зрения технологического контроля и предложен новый подход определения показателей достоверности МСК контроля ГНПП

Для повышения достоверности инструментального контроля ПЖА предложен адресный контроль (мониторинг) ПЖА с использованием коэффициента вариации глубины коррозии для конкретной шахты.

Предложено использовать диаграмму Исикавы для выявления причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой задаче контроля для нахождения оптимального варианта решения.

Рассмотрен эффективный метод для решения задач классификации и оценки

информативности в МСК при многопараметрическом контроле объектов ГНПП по экспериментальным контрольным замерам в условиях полной статистической неопределённости.

Предложено использовать анализ бюджета неопределенности МСК для улучшения методики контроля и повышения точности МСК.

Литература

1. Лопатин В. В., Обеспечение необходимой точности мобильных систем контроля в горной и нефтегазовой отраслях / В. В. Лопатин // Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал - Івано - Франківськ - № 2 (37), 2016, С. 5-13

2. Лопатин В. В., Мобильные системы контроля в горной и нефтегазовой отраслях / В. В. Лопатин // Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал - Івано - Франківськ - № 2 (39), 2017, С. 83-90.

3. Лопатин В. В., Оптимизация структуры мобильной системы контроля / В. В. Лопатин // Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал - Івано - Франківськ - № 2 (42), 2018, С. 25-33.

4. Generazio E.R. Validating design of experiments for determining probability of detection capability for fracture critical applications // Materials Evaluation. Vol. 69. No 12. Pp 1399-1407.

5. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення: ДСТУ 2389-94. – К.: Держстандарт України, 1994. – 24 с.

6. Лопатин В. В. Гавруцкий А.Е. Опыт ультразвукового адресного мониторинга жесткой армировки шахтного ствола/ Научно-технический, производственный и экономический журнал «Уголь Украины» № 9-10, 2017, С.51-56.

7. МИ 1317–2004. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

8. Levin S.F. The problem of confidence probability / S.F. Levin // Measurement Techniques. – 2008. – V. 51, No 9. – P. 967-975.

9. Левин С.Ф. Неопределенность в узком и широком смысле результатов поверки средств измерений // Измерительная техника. 2007. № 9. С. 15–19.

10. Левин С.Ф. Проблема доверительной вероятности // Измерительная техника. 2008. № 9. С. 33–39.

11. Левин С.Ф. Нерешенные проблемы неопределенности // Главный метролог. 2009. № 4. С. 13–24.

12. Левин С.Ф. Нерешенные проблемы «Руководства по выражению неопределенности измерения» // Метрология. 2009. № 6. С. 3–21.

13. Левин С.Ф. Неопределенность как параметр распределения вероятностей: Прикладная нормативно математическая точка зрения // Главный метролог. 2010. № 5. С. 10–20.

14. Рабинович С. Г. О необходимости создания новых рекомендаций по оцениванию погрешностей и неопределенностей измерений // Системы обработки информации. 2010. № 4(85). С. 23–26.

15. Куренков, Н. И. Энтропийный подход к решению задач классификации многомерных данных [Текст] / Н. И Куренков, С. Н Ананьев // Информационные технологии. Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал. – 2006.– № 8. – С. 50-55.

16. Xu Rui. Survey of clustering algorithms [Text] / Rui Xu, D. Wunsch II // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. – V. 16, № 3. – P. 645.

17. Jenssen, R. An Information Theoretic Approach to Machine Learning [Text] : Diss. for the Deg. of Dr.Scientiarum / R. Jenssen ; Department of Physics University of Tromso. – Tromso, 2005. – 179 p.

18. Fedorovich, A. Classification of facilities multi parameters experimental measurements of their parameters [Text] / A. Fedorovich // European science review. – 2015. – № 7-8. – P. 140-142.

References

1. Lopatyn V. V., Obespechenye neobkhodimoi tochnosti mobylnykh system kontroliia v hornoi y nefte hazovoi otrasliakh / V. V. Lopatyn // Metody ta prylyady kontroliiu

yakosti. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal - Ivano - Frankivsk - № 2 (37), 2016, S. 5-13

2. Lopatyn V. V., Mobylnye systemy kontroliia v hornoi y nefte hazovoi otrasliakh / V. V. Lopatyn // Metody ta prylyady kontroliiu yakosti. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal - Ivano - Frankivsk - № 2 (39), 2017, S. 83-90.

3. Lopatyn V. V., Optymyzatsiia struktury mobylnoi systemy kontroliia / V. V. Lopatyn // Metody ta prylyady kontroliiu yakosti. Naukovo-tekhnichnyi izhurnal - Ivano - Frankivsk - № 2 (42), 2018, S. 25-33.

4. Generazio E.R. Validating design of experiments for determining probability of detection capability for fracture critical applications // Materials Evaluation. Vol. 69. No 12. Pp 1399-1407.

5. Tekhnichne diahnostuvannia ta kontrol tekhnichnoho stanu. Terminy ta vyznachennia: DSTU 2389-94. – K.: Derzhstandart Ukrainy, 1994. – 24 s.

6. Lopatyn V. V., Havrutskyi A.E. Opyt ultrazvukovoho adresnoho monytorynha zhestkoi armyrovky shakhtnoho stvola / Nauchno-tekhnycheskyi, proyzvodstvennyi y ekonomycheskyi zhurnal «Uhol Ukrainy» № 9-10, 2017, S.51-56.

7. MY 1317–2004. Rezultaty y kharakterystyky pohreshnosti yzmerenyi. Formy predstavleniia. Sposoby yspolzovaniia pry uspytanyiakh obraztsov produktsyy y kontrole ykh parametrov.

8. Levin S.F. The problem of confidence prob-ability / S.F. Levin // Measurement Techniques. – 2008. – V. 51, No 9. – P. 967-975.

9. Levyn S.F. Neopredelennost v uzkom y shyrokom smysle rezultatov poverky sredstv yzmerenyi // Yzmeritelnaia tekhnika. 2007. № 9. S. 15–19.

10. Levyn S.F. Problema doverytelnoi veroiatnosti // Yzmeritelnaia tekhnika. 2008. № 9. S. 33–39.

11. Levyn S.F. Nereshennyye problemy neopredelennosti // Hlavnyi metroloh. 2009. № 4. S. 13–24.

12. Levyn S.F. Nereshennyye problemy «Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti yzmereniia» // Metrolohiia. 2009. № 6. S. 3–21.

13. Levyn S.F. Neopredelennost kak parametr raspredeleniia veroiatnostei:

Prıkladnaia normatyvno matematycheskaia tochka zreniia // Главны метролох.

2010. № 5. S. 10–20.

14. Rabynovych S. H. O neobkhodymosti sozdaniia novykh rekomendatsyi po otsenyvaniu pohreshnosteï y neopredelennosteï yzmerenyi // Systemy obrobky informatsii. 2010. № 4(85). S. 23–26.

15. Kurenkov, N. Y. Энтропийны podkhod k resheniyu zadach klasyfykatsyy mnohomernykh dannyykh [Tekst] / N. Y Kurenkov, S. N Ananov // Ynforma-tsyonnye tekhnolohyy. Ezhemesiachny teoretichesky y prykladnoi nauchno-tekhnichesky zhurnal. – 2006.– № 8. – S. 50-55.

16. XuRui. Survey of clustering algorithms [Text] /RuiXu, D. Wunsch II // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. – V. 16, № 3. – P. 645.

17. Janssen, R. An Information Theoretic Approach to Machine Learning [Text] : Diss. for the Deg. of Dh.Scientiarum / R. Janssen ; Department of Physics University of Tromso. – Tromso, 2005. – 179 p.

18 .Fedorovich, A. Classification of facilities multi parameters experimental measurements of their parameters [Text] / A. Fedorovich // European sciencereview. – 2015. – № 7-8. – P. 140-142.

УДК 683.1+ 004.5

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-40-57

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ

В.М. Юрчишин

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

Метою даного дослідження є визначення методологічних підходів щодо оцінки якості програмного забезпечення при впровадженні на нафтогазовидобувних підприємствах сучасних інформаційних технологій. Відповідно до проведеного автором комплексного аналізу методичних підходів з оцінки програмного забезпечення запропоновано методичні положення оцінки якості програмного продукту.

Розглянуті та проаналізовані найбільш поширені програмні засоби, методичні підходи для оцінки якості програмних продуктів для інформаційних систем.

Сформульовано та розглянуто методологічні підходи щодо оцінки якості програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу. Розглянуто сучасний стан проблеми та попередні дослідження у цій сфері, а також основні, хоча і далеко не всі, методики оцінки якості програмного забезпечення.

Описано і проаналізовано деякі з проблем, що пов'язані зі створенням і застосуванням методик оцінки якості програмних кодів загалом і зокрема баз знань в нафтогазовій предметній області.

В статті представлені аргументи, що забезпечують необхідність оцінки затрат на якість програмного забезпечення.

Ключові слова: *інформаційні технології; програмний продукт; якість програмного коду; показники якості; стандарти якості; нафтогазова предметна область.*

Аннотація. *Целью данного исследования есть определение методологических подходов к оценке качества программного обеспечения при внедрении на нефтегазодобывающих предприятиях современных информационных технологий. Соответственно проведенному автором комплексному анализу методических подходов к оценке качества программного обеспечения предложено методические положения оценки качества программного продукта.*

Рассмотрены и проанализированы наиболее распространенные программные средства, методические подходы для оценки программных продуктов для информационных систем.

Сформулированы и рассмотрены методологические подходы к оценке качества программного обеспечения для объектов нефтегазового комплекса.

Рассмотрено современное состояние проблемы и предыдущие исследования в этой среде, а также основные, хотя и далеко не все, методики оценки качества программы.

Описано и проанализировано некоторые проблемы, которые связаны с созданием и использованием методик оценки качества программных кодов в целом и отдельно баз знаний в нефтегазовой предметной области.

В статье представлены аргументы, которые обеспечивают необходимость оценки затрат на качество программного обеспечения.

Ключевые слова: *информационные технологии; программный продукт; качество программного кода; показатели качества; стандарты качества; нефтегазовая предметная область.*

Annotation. *This article establishes methodological approaches to software quality assessment in the process of information technology implementation in oil and gas companies. This study offers methodological basis of software quality assessment drawing on complex analyses of*

methodological approaches to software quality assessment conducted by the author/

The article investigates and analyses the most commonly used approaches to software quality assessment for information systems.

The study examines methodological approaches to software quality assessment for oil and gas complex objects.

The article describes current state of affairs and the results of previous research in this field including the main methods of software quality assessment.

This research describes and analyses some of the problems connected to creation and implementation of software code quality assessment methods in general and oil and gas industry knowledge base in particular.

The article presents arguments for necessity for assessment of software quality expenses.

Key words: *information technology, software product, software code quality; quality indicators; quality standard; oil and gas industry.*

Вступ

Ефективне функціонування інформаційних технологій в нафтогазовій галузі визначається якістю компонент її складових: технічної, математичної, програмної, інформаційної, правової та інших. Одним з найбільш важливих складових є програмне забезпечення, управління якістю якого значною мірою визначається якість інформаційної системи. В даний час широко використовуються досить ефективні методи, моделі та способи оцінки якості програмного забезпечення, що включають такі показники якості програмних продуктів, як функціональність, надійність, практичність, ефективність, мобільність, інтерактивність тощо [1].

Створення високоякісного програмного забезпечення є однією з важливих завдань розвитку нафтогазової галузі. Від того, наскільки вдало зроблено програмне забезпечення системи, залежить в кінцевому результаті ефективне прийняття рішень при управлінні роботою нафтогазових об'єктів. Якість програмного забезпечення (ПЗ) є основною його характеристикою в різних сферах використання інформаційних технологій, яка вказує на ступінь його відповідності встановленим вимогам міжнародним стандартам якості [2]. Зазвичай, такі вимоги трактують по-різному, що породжує декілька незалежних визначень цього терміну. Здебільшого, під якістю ПЗ розуміють

набір властивостей програмного продукту, що характеризують його здатність задовольнити встановлені або передбачувані потреби замовника, які він висловив у вигляді користувацьких вимог до нього на початкових етапах його розробки.

Стандарт ISO/IEC 9126 [3] регламентує зовнішні й внутрішні характеристики якості ПЗ. Якщо зовнішні характеристики відображають вимоги до функціонування ПЗ, то внутрішні використовують для підготовки плану досягнення необхідних значень зовнішніх характеристик його якості. .

Як зовнішні, так і внутрішні характеристики якості відображають властивості самого ПЗ, а також погляди замовника і розробника на нього. Однак, безпосереднього користувача ПЗ в основному цікавить експлуатаційна його якість, тобто сукупний ефект від досягнення необхідних характеристик програми, значення яких вимірюється швидкістю та достовірністю отриманого результату, а не його властивістю.

Під оцінюванням якості ПЗ розуміють дії, що визначають, як саме ПЗ відповідає своєму призначенню. Якість ПЗ оцінюють з використанням моделі якості (ISO/IEC 9126-1, 2001). Таке оцінювання набуває особливого значення із розвитком і вдосконаленням технологій визначення якості ПЗ. Усе це призвело до потреби систематизації методів

оцінки якості програмного забезпечення, що використовується в нафтогазовій галузі.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій щодо розгляду питання оцінки якості програмного забезпечення дозволив скласти загальне уявлення про наявність існуючої методологічної бази сучасної науки в галузі інформаційних технологій [4-10]. Проведене дослідження показало, що оцінка якості програмних продуктів, що використовуються в нафтогазовій галузі на період сьогодні проводиться переважно з використанням розширених методів оцінювання техніко-економічних показників на різних стадіях впровадження нововведень, кількісних методів оцінювання якості програмного забезпечення. Безперечним є той факт, що проведення оцінки якості програмних продуктів з метою визначення рівня ефективності від використання їх на різних етапах видобування вуглеводнів потребує комплексного аналізу кількісних показників, які в найбільшій мірі будуть відповідати специфіці діяльності нафтогазовидобувного підприємства. Також в ході проведеного аналізу різних методичних підходів з оцінки якості програмного забезпечення було визначено наявність єдиної бази інструментарію оцінювання інноваційних дій на підприємстві, яка представляє собою поєднання роботи різних програм.

Таким чином, було виявлено наявність значного теоретичного підґрунтя для формування методологічної бази по оцінці якості програмного забезпечення, яке, на мою думку, потребує подальшої систематизації. На основі систематизації існуючих методичних підходів з оцінки якості програмного забезпечення можлива розробка єдиних методичних рекомендацій з цього питання, які повинні ґрунтуватися на принципах урахування загальних проблем впровадження інформаційних технологій на нафтогазовидобувних підприємствах.

Отже, необхідно визначити ефективні шляхи удосконалення методики оцінки якості програмного забезпечення на підприємствах нафтогазової галузі, які дозволять вирішити проблему невизначеності та недооцінки результатів в практиці господарської діяльності сучасних вітчизняних підприємств.

Згідно стандарту ISO/IEC 9126 для опису оцінки якості програмних продуктів важливими і досить незалежними є такі характеристики: 1) зручність експлуатації або модифікація; 2) життєздатність, чіткість, ефективність; 3) вартість; 4) мобільність і ступінь обліку людських факторів.

Кожна характеристика досягає свого найвищого значення тоді, коли вона є критерієм успіху групи, що розробляла програму. Усе більше фахівців починають визнавати важливість якості програмних засобів, і намагаються впливати на якісні характеристики програмного забезпечення.

Зроблено певні кроки у напрямку визнання важливості критерію надійності при проектуванні систем програмного забезпечення. З'явилися матеріали, присвячені проблемам створення метрики програмного забезпечення й аналізу його якості. Так, наприклад, книга Майерса стосується питань надійності програмного забезпечення [11], у якій увага зосереджується на методах конструювання високонадійних програм і способах оцінки надійності програмного забезпечення за результатами спостереження за процесами налагодження програм і усунення помилок.

Проведений аналіз показав відсутність єдиного підходу з окресленої проблеми як в наукових колах, так і в практиці застосування єдиних заходів з оцінювання якості програмного забезпечення. Тому, при такій оцінці, незважаючи на різні напрямки проведення такого оцінювання, ключовими аспектами процедури оцінювання виступають – кінцевий результат обраного напрямку оцінювання, або, іншими словами, результативність, а також ефективність застосування ПЗ.

Якості програмного забезпечення присвячено багато публікацій різного характеру. Їх автори в основному посилаються на один і той же стандарт серії ISO 9000, а також на національну нормативну базу. Основним способом забезпечення і підтвердження якості програмних продуктів пропонується вважати використання сертифікації на відповідність цим стандартам, але це явно недостатньо для реального забезпечення якості. Практичний наш досвід свідчить про відносну дійсність сертифікації і постійно ставить програмістів перед необхідністю реально вирішувати задачі

забезпечення, підтримання і підвищення якості своїх програмних продуктів.

Огляд літературних джерел та їх аналіз стосовно якості програмного забезпечення свідчить, що основними складовими є [8,9]: 1) якість інфраструктури (infrastructure quality), тобто апаратного відповідного програмного забезпечення (якість операційних систем, комп'ютерних мереж тощо); 2) якість даних (data quality), які використовуються інформаційною системою на вході; 3) якість адміністративного управління (administrative quality), тобто якість менеджменту, включаючи планування і календарний контроль; 4) якість сервісу (service quality), тобто якість навчання системною підтримкою.

Порівняльний аналіз стандартів показує, що в різних нормативних документах номенклатура показників якості програмних засобів помітно відрізняється один від одного. Стандарти практично не містять рекомендацій по вибору, застосуванню і впорядкуванню необхідної сукупності показників якості. Крім того, для більшості показників відсутні методики їх оцінки і порівняння з встановленими вимогами або критеріями. Практичне застосування нормативних документів ускладнюється тим, що ні один із них не містить повного переліку факторів, що впливають на якість програмних засобів і методик їх оцінки.

На жаль, в даний час добиватися задоволення усіх цих якостей при розробці програмного забезпечення досить складно. З іншого боку швидке збільшення складності і розмірів сучасних програмних комплексів при одночасному рості відповідальності функцій, що виконуються, різко підвищилися вимоги зі сторони замовників і користувачів до їх якості і ефективності застосування. В зв'язку з цим стратегічною задачею в життєвому циклі сучасного програмного забезпечення стало забезпечення необхідної якості програмних продуктів.

Отже, відповідно до визначення обмеженості наукових поглядів в методичних підходах по оцінці якості програмних продуктів при впровадженні інформаційних технологій на нафтогазовидобувних підприємствах вимагає систематизація такої оцінки.

Метою даного дослідження є визначення методологічних підходів щодо оцінювання якості програмного забезпечення при впровадженні на нафтогазовидобувних підприємствах сучасних інформаційних технологій

Відповідно до проведеного автором комплексного аналізу методичних підходів з оцінювання програмного забезпечення необхідно розробити методичні положення по оцінці якості програмного продукту. Таке поєднання видів оцінки може визначитися на основі інтегрального показника оцінювання рівня якості програмного продукту.

Отже, можна стверджувати, що метою оцінки якості ПЗ є комплексний аналіз задоволення потреб та її впливу на найважливіші показники діяльності нафтогазовидобувного підприємства, визначення доцільності й оптимальних варіантів реалізації нововведень, оперативне коригування управління нафтогазовидобувним об'єктом.

Як свідчить наш досвід, найбільшу трудність в процесі управління якістю будь-якою продукцією, в тому числі програмною, викликає встановлення факторів, які викликають встановлення, тих чи інших характеристик якості. Ще більше складною і в той же необхідною процедурою є їх оцінка. Виміряти їх – означає отримати об'єктивну основу для вироблення оперативних і економічно ефективних керуючих дій при впровадженні сучасних інформаційних технологій на нафтогазовидобувних підприємствах. Тому актуальним є вибір і впровадження методів, що забезпечують виявлення конкретних залежностей між факторами і характеристиками якості, методів, які дозволяють приймати обґрунтовані рішення і здійснювати конкретні заходи.

Така увага до розробки методів оцінки якості програмного забезпечення при впровадженні сучасних інформаційних технологій на нафтогазовидобувних підприємствах, на мою думку, є цілком зваженою та обґрунтованою. Визначаючи сутність впровадження нових технологій на підприємстві без попередньої оцінки якості програмних продуктів може спричинити негативні наслідки. Підприємству може не вистачити коштів для завершення початого проекту, що негативно

відобразиться на забезпеченні ефективної поточної роботи нафтогазовидобувного підприємства або й взагалі призведе до зупинки певного об'єкту.

Застосування сучасних методів оцінки якості програмного забезпечення можуть служити основою для систем забезпечення якості програмних засобів, але використання їх вимагає певного корегування, а також адаптації деяких положень стандартів стосовно до принципових особливостей технологій створення і характеристикам програмної продукції. При цьому є значна кількість методик оцінки якості програмних продуктів, що дають інколи суб'єктивні експертні заключення, що не відповідають існуючим технологіям проектування, виробництва і оцінки якості інформаційних систем, а також сучасним міжнародним стандартам, які необхідно освоювати і застосовувати для забезпечення конкурентоздатності продукції ІТ-галузі на світовому ринку. Важливість поставленої проблеми визначається тим, що найбільш зацікавленими у якості програмного комплексу є кінцевий користувач, що використовує програмний продукт.

Отже, в сучасних умовах для нафтогазовидобувних підприємств гостро стоїть проблема вибору найбільш ефективного впровадження інформаційних технологій з врахуванням оцінки якості програмного забезпечення для прийняття ефективних рішень при управлінні нафтогазовими об'єктами, обумовлюють актуальність даної теми дослідження.

В даний час розробка програмного забезпечення для інформаційних систем перетворилася в одну з самих дорогих індустрій і будь-які вузькі місця в технологічному процесі його створення можуть привести до небажаних наслідків. Збільшення термінів розробки програмного забезпечення може привести до подорожчання кінцевого продукту, а не виявлення в ході оцінки якості програмного продукту помилки приводить як мінімум до зниження продуктивності. Але й примітивні помилки, незрозумілі повідомлення і недбалий інтерфейс дратують користувача, які в результаті вибирають більш якісний програмний продукт конкурента, ІТ-компанія ризикує втратити не тільки клієнта, але й свою

долю на ринку. Нерідко це виникає в зв'язку з тим, що контракти, попередні плани, технічні умови і завдання на створення складного програмного забезпечення підготовлюється і оцінюється некваліфіковано, на основі неформалізованих уявлень замовників, розробників і користувачів про необхідні функції та характеристики якості програмного забезпечення, що часто не відповідають вимогам міжнародних стандартів серії ISO. Тому багато програмних продуктів не здатне повністю виконувати необхідні функціональні задачі з гарантованою якістю, і їх приходиться довго і інколи безуспішно допрацьовувати для досягнення необхідної споживчої якості та надійності функціонування, витрачаючи додатково значні засоби і час.

Розглянемо методологію оцінки якості програмного продукту. Програми набувають високої якості не стільки в результаті комплексного тестування кінцевого продукту, скільки в процесі його розробки. Якщо методологія створення програмного продукту така, що помилки виявляють на регулярній основі і на всіх стадіях виконання проекту, то на виході ПЗ не буде мати помилок.

Корпорація ІВМ запропонувала методологію створення складних програмних комплексів, що одержала назву Cleanroom Software Engineering [12]. Вона орієнтована на професіоналів, що бажають удосконалити свої методи розробки програмних продуктів. Cleanroom – це сукупність адміністративно-технологічних процесів, що дозволяють колективам розробників ПЗ планувати, вимірювати, проектувати, кодувати, тестувати і сертифікувати програмні продукти. Методологія Cleanroom побудована на трьох концепціях: 1) модульному принципі специфікації й проектування; 2) математичному доказі правильності застосовуваних алгоритмів; 3) використанні статистики за результатами тестування як основи для оцінки надійності програм.

Метод покрокової деталізації з адміністративної точки зору методології Cleanroom полягає у покроковій деталізації проекту, коли кінцева функціональність системи досягається ітераційно. На кожному етапі реалізується визначений рівень функціональних можливостей, що тестується і сертифікується

автономно. Такий спосіб розробки має кілька плюсів. З одного боку, видно, як система розвивається, а з іншого – виникають добрі передумови для поліпшення не тільки самого продукту, але і процесів його виробництва – адже на кожному етапі аналізуються джерела виникнення помилок і відбувається їх усунення. На етапі формування архітектури майбутньої системи процедури тестування проводяться більш ретельно, що дозволяє локалізувати помилки на ранніх стадіях. Специфікації Cleanroom дають повний і точний опис функцій системи. Вироблення специфікацій сприяє більш глибокому розумінню вимог, пропонувананих до кінцевого продукту, і його функцій, а самі специфікації є основою для тестування, сертифікації і подальшого розвитку системи. Відповідно до методології Cleanroom системи будуються за модульним принципом.

Відповідність роботи програми закладеним специфікаціям перевіряється в ході верифікації. Інструментом тестування надійності й оцінки якості ПЗ в методології Cleanroom є середовище Cleanroom Certification Assistant, в основі якої покладено ідею використання статистичних результатів тестування для визначення надійності ПЗ математичними методами.

Існуючі на сьогодні методи тестування програмного забезпечення не дозволяють однозначно і повністю виявити усі дефекти та установити коректність функціонування програми, яка аналізується, тому, що всі існуючі методи тестування діють в рамках формального процесу перевірки програмного забезпечення. На сьогодні це практично єдина характеристика якості програмного забезпечення, яку можна встановити автоматичним шляхом.

Для систематизації методів оцінки якості програмного забезпечення розглянемо існуючі різноманітні визначення якості ПЗ.

На сьогоднішній день згідно міжнародних стандартів існують різні визначення якості програмного забезпечення, які подібні одне на одне, наприклад [13]: 1. Якість програмного забезпечення - ступінь, в якій воно має необхідні комбінації властивостей. 2. Якість програмного забезпечення - ступінь, в якій система компонентів задовольняє вимогам, потребам або очікуванням замовника чи користувача. 3.

Якість програмного забезпечення - здатність програмного продукту при заданих умовах задовольняє встановленим або очікуваним потребам. 4. Якість програмного забезпечення - це сукупність характеристик цього забезпечення, яка здатна задовільнити встановлені і очікувані потреби.

Отже, підсумовуючи можна зробити висновок, що якість ПЗ - це характеристика програмного забезпечення, ступінь відповідності його до вимог. При цьому вимоги можуть трактуватись по-різному, що породжує декілька незалежних визначень терміну. Якість ПЗ - набір властивостей продукту, що характеризують його здатність задовольнити встановлені або передбачувані потреби замовника. Поняття якості має різні інтерпретації залежно від конкретної програмної системи і вимог до неї.

Під час оцінки і покращення якості ПЗ необхідно на нафтогазовому підприємстві виконувати такі задачі: 1. Порівнювати процес розробки програмного забезпечення, існуючого в даний час на підприємстві з описаною в стандарті моделлю. Аналіз результатів дає можливість визначити сильні і слабкі сторони процесу. 2. Оцінити можливості покращення даного процесу на основі визначення поточних можливостей. 3. Виконати технічну реалізацію поставлених задач на основі сформульованих цілей удосконалення процесу. Після цього увесь цикл починається з початку.

З нашого досвіду якість програмного забезпечення повинна відповідати наступним вимогам: легко використовувати; хороша продуктивність; немає помилок; не зіпсує дані користувача при збоях; може працювати тривалий час; можна використовувати на різних платформах; легко добавляти нові можливості; задовольняє потреби користувача; добре документоване.

Детальніше зупинимося на зовнішніх і внутрішніх характеристиках які визначають якість ПЗ. До зовнішніх характеристик відносяться властивості, які усвідомлює користувач програми [13]: 1. Коректність - відсутність або наявність дефектів у специфікації, проекті та реалізації системи. 2. Практичність - легкість вивчення і використання системи. 3. Ефективність - ступінь використання системних ресурсів. Ця характеристика

враховує такі фактори, як швидкодія програми і необхідний їй обсяг пам'яті. 4. Надійність - здатність системи виконувати необхідні функції за певних умов; середній інтервал між відмовами. 5. Цілісність - здатність системи запобігати неавторизованому або некоректному доступу до своїх програм та даних. Ідея цілісності передбачає обмеження доступу до системи для неавторизованих користувачів, а також забезпечення правильності доступу до даних, тобто одночасну зміну взаємопов'язаних даних, зберігання лише допустимих значень тощо. 6. Адаптованість - можливість використання системи без її зміни в тих галузях або середовищах, на які вона не була орієнтована безпосередньо. 7. Правильність - ступінь безпомилковості системи, особливо щодо виведення кількісних даних. Правильність характеризує виконання системою її функцій, а не те, чи створена вона коректно. Цим правильність відрізняється від коректності. 8. Живучість - здатність системи продовжувати роботу при введенні неприпустимих даних або в напружених умовах.

Деякі з цих характеристик перекриваються, проте кожна має свої відмінні риси, які в одних випадках виражені сильніше, а в інших слабше.

Зовнішні характеристики - єдина категорія властивостей ПЗ, яка турбує користувачів. Користувачів хвилює легкість роботи з ПЗ, а не легкість його зміни. Їх хвилює коректність ПЗ, а не зручність читання або структурованість коду. А програмістів хвилюють і зовнішні характеристики ПЗ, і внутрішні.

До внутрішніх характеристик програмного забезпечення відносяться: 1. Зручність супроводу - легкість зміни програмної системи з метою реалізації додаткових можливостей, підвищення швидкодії, виправлення дефектів тощо. 2. Гнучкість - можливий масштаб зміни системи з метою використання її в тих галузях або середовищах, на які вона не була безпосередньо орієнтована. 3. Портваність - легкість зміни системи з метою використання у середовищах, на які вона не була орієнтована безпосередньо. 4. Можливість повторного використання - масштабність і легкість використання частин системи в інших системах. 5. Зручність читання

- легкість читання та розуміння вихідного коду системи, особливо на детальному рівні окремих операторів. 6. Тестованість - можливий ступінь виконання блокового і системного тестування програми та перевірки її відповідності вимогам. 7. Зрозумілість - легкість розуміння системи і на рівні загальної організації, і на детальному рівні окремих операторів. Зрозумілість характеризує узгодженість системи на більш загальному рівні, ніж легкість для читання.

Різниця між внутрішніми і зовнішніми характеристиками якості розмита, тому що на деякому рівні перші впливають на другі. Якщо програма є не досить зрозумілою або незручною в супроводі, у ній важко виправляти дефекти, що в свою чергу впливає на такі зовнішні характеристики, як коректність і надійність. ПЗ, що потерпає від нестачі гнучкості, не можна поліпшити у відповідь на запити користувачів, що позначається на його практичності.

Розглянемо класифікацію різних підходів до оцінки якості програмного забезпечення, використовуючи такі два напрямки.

Перший напрямок орієнтований або на проект, або процес. Для підвищення якості програмного забезпечення можна зосередитись на якості програмного забезпечення, наприклад, зробити його більш комфортним для користувача. Альтернативний підхід полягає в тому, що чим кращий процес, тим краща якість програмного забезпечення.

Другий напрямок пов'язаний або з відповідністю, або з удосконаленням. Під відповідністю будемо вважати відповідність якому-небудь стандарту. Вдосконалення має своєю метою перехід на більш вдосконалені методи і кращу практику для підвищення якості.

Першою організованою спробою розробки методів оцінки якості програмного забезпечення була почата Рубайном і Гартвиком [14, 12]. Метод, запропонований у цій роботі, полягав у тому, щоб визначити набір властивостей, що характеризує програму. Бажаними властивостям давався словесний опис, а як критерії виступали математичні вирази, у яких аргументами були параметри, що прямо або побічно описували конкретні властивості програми. Зокрема, називалися такі властивості, як "А₁ – правильність виконання математичних обчислень", "А₅ – зрозумілість програми", "А₆ – простота внесення змін", потім проводився

докладніший аналіз для визначення більш конкретних характеристик цих властивостей, які можна було б вимірювати і тим самим виявляти властивість характеристики якості для даної програми. І хоча така деталізація була виконана для кожної із запропонованих авторами характеристик якості, лише деяким з них вдалося поставити у відповідність виміряні показники, крім того, не наводилося жодних прикладів практичного застосування розробленого методу.

Розроблено сучасний програмний засіб для визначення якості ПЗ методами метричного аналізу, що дає змогу за допомогою показників якості розрахувати відповідні метрики і визначити значення комплексного показника якості програмного продукту [15]. З'ясовано особливості процесу оцінювання якості ПЗ, тобто проаналізовано поняття якості програмного продукту як предмету стандартизації, а також рівні подання моделі якості ПЗ, що дало змогу встановити можливість її підвищення шляхом формування відповідних вимог до критеріїв оцінювання якості, вдосконалення моделей метричного аналізу його якості та методів кількісного її вимірювання на всіх етапах реалізації програмного проекту. Встановлено особливості використання метричного аналізу для визначення якості ПЗ, згідно з якими існує відсутність єдиних стандартів на метрики, тому кожен постачальник вимірювальної системи пропонує власні методи оцінювання якості ПЗ і відповідні метрики. Також є складним завдання інтерпретації значень метрик, оскільки для більшості користувачів як метрики, так і їх значення не зовсім є зрозумілими та інформативними. Виявлено, що основними параметрами при виборі варіанту реалізації ПЗ є його вартість та тривалість процесу розроблення й репутація фірми-проектанта, але рішення прийняті на підставі цих параметрів, не завжди гарантують належну якість ПЗ.

На всіх етапах розробки ПЗ повинен проводитися такий контроль його якості: перевірка відповідності користувацьких вимог до ПЗ з критеріями і показниками його якості; перевірка та атестація проміжних результатів розроблення ПЗ на кожному з етапів реалізації програмного проекту і визначення ступеня задоволення досягнутих критеріїв і показників

його якості; тестування готового ПЗ, збирання даних про відмови, дефекти та інші помилки, які було виявлено в ПЗ під час його безпосередньої експлуатації; підбір моделей надійності ПЗ за отриманими результатами його тестування (дефекти, відмови тощо.); перевірка досяжності критеріїв і показників якості ПЗ, заданих у вимогах до нього.

Доведення правильності роботи ПЗ – це математична або логічна методика, яку використовують для того, щоб переконати розробника ПЗ й інших зацікавлених сторін у тому, що розроблене ПЗ відповідає тим вимогам, які було визначено та узгоджено з замовником. Таке доведення є формальним методом.

Незважаючи на представлений досить змістовний перелік додаткових методів оцінювання якості програмного забезпечення на мою думку, його варто використовувати як розширений методичний підхід.

Для створення методики оцінки якості програмного необхідно з'ясувати такі три моменти: 1) чи можна дати означення характеристикам якості ПЗ, які б можна було виміряти і забезпечити при цьому достатньо незалежну оцінку якості; 2) наскільки точно можна виміряти якість ПЗ вцілому і його окремі характеристики; 3) як інформацію про характеристики якості ПЗ використати для вдосконалення процесу його експлуатації надалі.

Складність полягає в тому, що існуючі показники якості ПЗ, як правило, неадекватно відображають ті чи інші їх властивості, що визначені потребами і вимогами користувача. Ефективну методику оцінки якісних показників доцільно робити на основі добре продуманих формулювань відповідних характеристик з врахуванням їх важливості. Оскільки еталон програмного забезпечення не слід вважати абсолютним, загальний результат такої оцінки повинен розглядатись як інформація для проведення аналізу, а не як остаточний висновок. Три складові частини процесу створення якісного програмного забезпечення – це, по-перше, програмісти – розробники програм, по-друге, процеси, у вигляді яких організований випуск програмного забезпечення і, нарешті, технології, відповідно до яких реалізуються ці процеси. Очевидно, що

якість програмного продукту на виході технологічного ланцюжка визначається якістю його складових. Якість програмного забезпечення залежить від кваліфікації програмістів, склад яких неоднорідний у силу яскраво вираженої спеціалізації. Професійні виробники програмних продуктів давно вже переконалися, що найкращий спосіб поліпшити програму – це удосконалити процеси її створення на усіх етапах життєвого циклу.

В основі всіх цих концепцій лежить загальне розуміння життєвого циклу програмного забезпечення як сукупності фаз, що проходить програмний продукт у процесі свого розвитку. Це такі фази: 1) вироблення вихідних вимог до програмного забезпечення з боку користувача; 2) формулювання системних вимог до програмного забезпечення з боку розробника; 3) проектування архітектури; 4) детальна реалізація програмного забезпечення; 5) інсталяція ПЗ; 6) експлуатація.

Методи оцінки якості дозволяють переконатися, що певні характеристики якості програмного забезпечення досягнуті. Самі по собі вони не можуть допомогти їх досягнення, вони лише допомагають визначити чи вдалося отримати в результаті те, що хотілося, чи ні, а також знайти помилки, дефекти і відхилення від вимог. Методи оцінки якості програмного забезпечення можна класифікувати наступним чином: 1). методи, що зв'язані з вивченням властивостей програмного забезпечення під час його роботи; 2) методи визначення показників якості програмного забезпечення за допомогою моделей різного роду; 3) методи, що націлені на виявлення порушень формалізованих правил побудови початкового коду програмного забезпечення, проектних моделей і документації; 4) методи звичайного або формалізованого аналізу проектної документації і початкового коду для виявлення їх властивостей.

При дослідженні оцінки якості програмного продукту з'ясовано, що важливою є інформація про те, де і як з'являються дефекти програмного забезпечення, ніж про частоту їх появи. Найбільшою цінністю є такі автоматичні засоби аналізу якості програмного забезпечення, які не тільки діагностують програму, а і реєструють конкретні недоліки програми. Незважаючи на численні дослідження

програмних еталонів, у цій галузі, як і раніше, залишається багато невирішених питань. По-перше, технологія вимірювання якості ще не досягла зрілості. По-друге, відсутні єдині стандарти на еталони..

Фундаментом усіх методів оцінки якості є загальне розуміння життєвого циклу програмного забезпечення, як сукупності фаз, що проходить програмний продукт в процесі свого розвитку. Таким, зокрема є: вироблення початкових вимог до програмного забезпечення зі сторони користувача; формування загальних вимог до програмного забезпечення зі сторони розробника; проектування архітектури; детальна реалізація програмного забезпечення; інсталяція програмного забезпечення в організації замовника і його подальша експлуатація.

За допомогою експертних методів можуть бути отримані як вихідні дані для розрахунку оцінок значень показників якості, так і самі оцінки. Визначення характеристик показників якості експертним методом здійснюється групою експертів-фахівців, компетентних у вирішенні даного завдання. При цьому рішення базується на досвіді та інтуїції експертів. При використанні експертних методів необхідно оцінювати компетентність і сумлінність групи експертів. Визначення характеристик показників якості експертним методом передбачає наступний порядок дій: 1) підбір і підготовка групи експертів; 2) постановка завдання експертам; 3) контроль роботи експертів; 4) збір оцінок експертів; 5) оцінка компетентності та сумлінності групи експертів; 6) розрахунок експертної оцінки.

Методики отримання експертних оцінок значень показників якості з метою методологічної єдності повинні ґрунтуватися на загальному методі оцінки якості, правил вибору номенклатури показників якості та діючих методичних матеріалів по оцінці заданого показника якості ПЗ.

Розрахункові методи засновані на використанні теоретичних і емпіричних залежностей, статистичних даних, що накопичуються при випробуванні, експлуатації та супроводі ПЗ. За допомогою розрахункових методів визначаються тривалість і точність обчислень, час реакції, необхідні ресурси тощо.

Методи прийняття рішень про якість ПЗ можуть бути отримані при узагальненні оцінки

по групі показників якості, логічно пов'язаних та або не пов'язаних в номенклатурі показників якості, а також оцінки окремих показників якості і оцінка якості ПЗ в цілому.

Прийняття рішень про якість ПЗ здійснюється після того, як отримані необхідні оцінки показників якості. Як правило, цих оцінок може не вистачити для отримання узагальненої оцінки якості ПЗ в цілому, тому прийняття рішень про якість ПЗ здійснюється в умовах невизначеності і ризику. Залежно від особливостей ПЗ, що досліджується та характеру отриманих оцінок, завдань і цілей дослідження якості ПЗ ступінь невизначеності та ризику прийняття рішень про якість значно коливається. Основною причиною застосування методів прийняття рішень про якість ПЗ є відсутність інформації для завдання якості ПЗ на відповідній множині. Таким чином, завдання прийняття рішень зводиться до задачі визначення значущості отриманих оцінок показників якості.

До інших методів належить комплексний метод оцінки якості, заснований на логіці розумових заключень, що визначають якість ПЗ шляхом логічних операцій над характеристиками ПЗ і результатами його розробки та використання.

Найбільш поширеним серед інших методів оцінки якості ПЗ є метод порівняння ПЗ, що порівнюється з базовим зразком (еталоном). Цей метод передбачає: вибір базового зразка ПЗ; порівняння характеристик ПЗ, що оцінюється, з відповідними характеристиками базового зразка ПЗ; перерахунок оцінок показників якості базового зразка з порівнянням показників ПЗ, що оцінюється.

Розвиток ПЗ і розширення області застосування ПЗ обумовлюють можливість появи інших методів оцінки якості ПЗ. Склад методів оцінки якості ПЗ і їх класифікація є відкритими і допускають розширення.

Для розробки методу оцінки якості ПЗ необхідно вибрати модель оцінки програмного продукту. Першою широко відомою моделлю якості програмного забезпечення стала запропонована в 1977 МакКолом модель [4]. В ній характеристики якості розділені на три групи. 1. Фактори, які описують ПЗ з позицій користувача. Задаються вимогами. 2. Критерії,

які описують ПЗ з позицій розробника. Задаються як цілі. 3. Метрики, які використовуються для кількісного описання і вимірювання якості. Фактори якості, яких було виділено, групуються в три групи за різними способами роботи людей з ПЗ. Отримана структура відображається у вигляді трикутника МакКола Критерії якості – це числові рівні факторів, що визначені як цілі при розробці. Об'єктивно оцінити або виміряти фактори якості безпосередньо важко. Тому МакКол ввів метрики якості, які з його точки зору легше виміряти і оцінити. Кожна метрика впливає на оцінку деяких факторів якості. Числовий вираз фактору уявляє собою лінійну комбінацію значень впливаючих на нього метрик.

Під метриками вважають кількісну оцінку програмного продукту, процесу або проєкта, яка використовується безпосередньо або на основі якої здійснюються інші вимірювання чи виконується прогноз.

У 1978 Боем запропонував свою модель, яка по суті є розширенням моделі МакКола [6]. Атрибути якості поділяють за способом використання ПЗ. Визначено 19 проміжних атрибутів, які включають усі 11 факторів якості по МакКолу. Проміжні атрибути розділяються на примітивні, які в свою чергу, можуть бути оцінені за допомогою метрик.

Така модель повинна бути побудована з врахуванням усіх складових якості програмного забезпечення і вимог міжнародних стандартів ISO на основі показників якості. Для практичної реалізації моделі пропонується використання системи підтримки і прийняття рішень на основі підходів багатокритеріального аналізу альтернатив і нечіткого моделювання.

Модель якості програмного забезпечення має наступні чотири рівня представлення згідно стандарту якості ISO 9126.

Перший рівень відповідає визначенню характеристик якості програмного забезпечення, кожна з яких відображає окрему точку зору користувача на якість, Згідно стандарту в модель якості входить шість характеристик або показників якості: функціональність (functionality); надійність (reliability); зручність використання або практичність (usability); продуктивність або ефективність (efficiency); зручність супроводу (maintainability); переносимість або мобільність (portability).

Другому рівню відповідають атрибути для кожної характеристики якості, які деталізують різні аспекти конкретної характеристики. Набір атрибутів характеристик якості вичерповують при оцінці якості.

Третій рівень призначений для вимірювання якості за допомогою метрик, кожна з яких згідно стандарту визначається як комбінація методу вимірювання атрибуту і шкали вимірювання значень атрибутів. Атрибут якості визначається за допомогою однієї або декількох методик оцінки на етапах життєвого циклу і на завершальному етапі розробки програмного забезпечення.

Четвертий рівень – це оцінюючий елемент метрики (вага), який використовується для оцінки кількісного або якісного значення окремого атрибуту показника програмного забезпечення. В залежності від призначення, особливостей і умов супроводу програмного забезпечення вибираються найбільш важливі характеристики якості і їх атрибути.

Розглянемо критерії оцінки якості програмного забезпечення. Кожний програмний продукт повинен виконувати визначені функції, тобто робити те, що задумано розробниками. Якісний програмний продукт повинен мати набір властивостей, які дозволять успішно його використовувати упродовж тривалого періоду, тобто мати визначену якість. З визначення якості випливає, що, по-перше, якість поняття динамічне: оскільки з часом потреби можуть змінюватися, необхідно періодично переглядати і вимоги до якості. По-друге, оскільки якість – сукупність властивостей, необхідні показники для їх опису та кількісні характеристики для їх оцінки. Сукупність властивостей ПЗ, що забезпечує задовільну для користувача якість ПЗ, залежить від умов і характеру експлуатації цього ПЗ. Тому при опису якості ПЗ, насамперед, повинні бути визначені критерії оцінки якості ПЗ. В даний час критеріями якості ПЗ прийнято вважати ті характеристики якості програмного забезпечення, які входять в перший рівень: *функціональність* – здатність ПЗ виконувати певний набір функцій, які задовольняють потреби користувачів; *надійність* – здатність ПЗ підтримувати визначену працездатність у заданих умовах. *зручність використання або практичність* – це характеристика ПЗ, яка дозволяє мінімізувати

зусилля користувача по підготовці вхідних даних, і оцінці отриманих результатів; *продуктивність або ефективність* – це відношення рівня послуг, які надає ПЗ користувачу при заданих умовах, до обсягу використаних усіх типів ресурсів; *зручність супроводу* – це зручність проведення всіх видів діяльності, пов'язаних із супроводом програм і дозволяє мінімізувати зусилля по внесенню змін для усунення в ньому помилок та його модифікації відповідно до потреби користувача; *переносимість або мобільність* – здатність ПЗ зберігати працездатність при перенесенні з одного середовища в інше, включаючи організаційні, апаратні й програмні аспекти оточення.

Функціональність і надійність є обов'язковими критеріями якості ПЗ, причому забезпечення надійності червоною ниткою проходить по всім етапам і процесам розробки ПЗ. Зручність використання або практичність свідчить про результативність оцінки якості і вказує, в якій мірі було досягнуто мети, а ефективність дасть можливість охарактеризувати якісний ступінь задоволення потреб користувача. Інші критерії використовуються в залежності від потреб користувача у відповідності до вимог, що пред'являються до ПЗ.

Для того, щоб своєчасно враховувати фактори, що впливають на якість програмного забезпечення необхідно володіти знаннями, що складають ядро професійних навиків в області інформаційних технологій. Знання розробників програмних засобів відрізняються значною різноманітністю, які часто не повні, не узгоджені, спеціалізовані в певних предметних областях. В основі експертних систем, які використовуються при видобутку вуглеводнів є бази знань (БЗ).

Розглянемо застосування методики оцінки якості програмних продуктів на прикладі експертних систем, що використовуються в нафтогазовій галузі: POKLAD – для визначення наявності покладів флюїдів; COLECTOR – для визначення наявності нафтогазового колектора; PLAST – для вибору технології обмеження припливу пластових вод у свердловину; NAFTA – для вибору методу інтенсифікації видобутку нафти [16]. Створення наукових основ проектування експертних систем вимагає

дослідження проблем кількісної оцінки якості систем на різних стадіях їхнього життєвого циклу. Оскільки невід'ємними компонентами експертних систем є база знань і механізм логічного висновку, то виникає необхідність їх включення в загальну оцінку експертної системи якісних характеристик цих двох інтелектуальних компонентів.

Однією з основних задач проблеми оцінювання якості баз знань є вибір метрик і методів їхнього вимірювання. Проблема подання знань ускладнюється ще й деякими додатковими проблемами, включаючи подання знань в практичних додатках, таких як видоучення і внесення знань, ефективне подання знань, вибір інструментарію схем подання знань, модифікація знань при зміні середовища, оперування знаннями та використання відповідних знань в створенні рішень, що пропонуються. Під методикою у цьому випадку розуміють елементарну характеристику, що є характеристикою нижнього рівня, яка не розчленовується і підлягає безпосередньому вимірюванню.

Можна припустити, що по аналогії з базами даних відповідно до можливостей БЗ вони також утворюють чотири групи метрик адекватності БЗ як інформаційної моделі предметної області [17]: 1) метрики адекватності концептуальної схеми; 2) метрики адекватності логічної схеми; 3) метрики адекватності схеми бази знань; 4) метрики БЗ.

При виборі метрик і методів їхнього виміру варто керуватися такими положеннями: 1) метрики повинні бути коректно визначені, тобто метрики з різними іменами повинні мати різні визначення; 2) метрики повинні включати властивості об'єкта, і мати фундаментальні відмінності один від одного; 3) метрики повинні, з одного боку, мати практичну цінність, а з іншого – допускати максимальну можливість їхнього кількісного оцінювання; 4) метрики повинні брати участь у формуванні якості БЗ як у розрізі окремої інтегральної характеристики, так і загалом, забезпечуючи при цьому можливість використання єдиного, незалежного від номенклатури характеристик, алгоритму оцінювання; 5) методи виміру метрик повинні забезпечувати різну точність оцінок якості БЗ відповідно до висунутих до них вимог; 6) методи виміру метрик повинні бути

ефективними, тобто забезпечувати найбільш економічний вимір метрики.

Головним поняттям в системі оцінки якості загалом і програмного продукту зокрема, є поняття вимірювання, яке є відображенням фізичних величин їхніми значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів. У контексті програмного забезпечення вимірювання – множина однорідних значень, які відіграють роль індексів. Для певного вимірювання можуть бути визначені певні ієрархії значень. Це дозволяє здійснювати агрегацію показників. Найбільш раціональний спосіб дій з оцінки якості програмного забезпечення полягає в тому, щоб розробити певну систему індикації його недоліків і використовувати цю систему для подальшого вдосконалення програмних засобів.

Таким чином, стандарти, з одного боку, вимагають вимірювання показників якості, а з другого – в них відсутні конкретні переліки якості і методи їх оцінки. Крім цього, відсутні необхідні методичні рекомендації по аналізу відповідної інформації. Більш вагомим користь при розробці індивідуального переліку показників розробник програмного забезпечення очікує отримати при використанні спеціальних міжнародних і вітчизняних нормативних документів.

Отже, для всіх етапів життєвого циклу програмних продуктів програміст повинен самостійно розробляти комплекси показників якості, які в сукупності утворюють систему показників. Він самостійно виявляти фактори, що впливають на якість. Тільки структурований індивідуальний підхід до вибору і утворення показників і факторів забезпечує ефективний контроль і управління якістю.

Вибір і обґрунтування факторів повинен здійснюватися комплексно, в залежності від прийнятої системи показників якості, висунутих гіпотез про причини зміни якості програмного продукту, встановлених цілей статистичного аналізу і інших причин.

Завжди є імовірність того, що не всі суттєві фактори включені до розгляду, а значення деякі з них не точні. Тому при виборі факторів більшу роль відіграє досвід експерта. Необхідно враховувати, що фактори здійснюють різний вплив на значення показників якості

При виборі методу оцінки якості програмного забезпечення має значення природа факторів - кількісна, якісна чи змішана. З нею зв'язані вид статистичної моделі якості програмного продукту і спосіб аналізу даних. Кількісні фактори оцінюють в основному регресійним аналізом, якісні дисперсійним аналізом, змішані ковариційним аналізом [18].

Сукупність вибраних факторів не повинна містити протиречивих і взаємовиключних компонентів. З точки зору теорії планування результати експлуатації програмного продукту є пасивним експериментом, тому апріорне управління значеннями або факторами не можливе. Вони уявляють собою випадкові числа або події і повинні розглядатися як статистичні дані, отримані в результаті спостережень. Основою для вироблення ефективних дій на якість програмних продуктів служить оцінка факторів. Рішення про проведення такої оцінки приймається на відповідності показників якості встановленим вимогам. Фактори можна розглядати як причину зміни якості програмного продукту, а показники – як наслідок дії факторів. При цьому показники відображають структуру і значення факторів, що діють на програмний продукт і впливають на його якість.

Слід зауважити, що до негативних факторів, які впливають на якість програмного забезпечення відносяться: 1) внутрішні дефекти: проектування, алгоритмізації, програмування, захисту; 2) зовнішні дії: помилки персоналу, спотворення в каналах, відмовлення апаратури..

Підводячи підсумки аналізу проблеми оцінки факторів, що впливають на якість програмних продуктів, слід відзначити, що метод регресійного аналізу має ряд особливостей, які необхідно враховувати при його практичному застосуванні. Наприклад, для охоплення максимально можливого числа факторів і врахування динаміки необхідно суттєво збільшити розмірність задачі. Якщо ж період спостережень за результатами експлуатації програмного продукту незначний, то виникають труднощі з оцінкою адекватності моделі якості. Іншою важливою особливістю є необхідність використання математичних методів обчислення коефіцієнтів регресії. Але в цілому регресійний аналіз є працездатним

методом, забезпечує високу ефективність факторів, які впливають на якість програмних продуктів і можуть бути рекомендовані до практичного застосування.

Така методика не є єдино можливою. Основне, щоб запропонований спосіб був з ідейного, методологічного обчислювального боку достатньо пророблений і забезпечував практичну оцінку факторів і реальне управління якістю програмних продуктів.

Розглянемо фактори, які впливають на якість програмного коду: читабельність коду; легкість підтримки; низька складність коду; коректність обробки винятків.

Якість коду може визначатись різними критеріями. Деякі з них мають значення тільки з точки зору людини. Наприклад, форматування тексту програми є неважливим для комп'ютера, але може мати велике значення для супроводу. Багато з існуючих стандартів кодування, що визначають специфічні для мови програмування угоди та задають низку правил, мають на меті полегшити супровід ПЗ в майбутньому. Також існують інші критерії, що визначають чи вдало написаний код, наприклад, такі, як структурованість - ступінь логічного розділення коду на блоки.

Методом покращення якості коду є рефакторинг. Рефакторинг - це процес зміни коду без зміни функціональності. Тобто з точки зору користувача програма не змінюється. Але з точки зору програміста вона змінюється, при чому у бік покращення, якщо рефакторинг проводиться грамотно. Рефакторинг полягає в чищенні програмного коду від дефектів і зміні архітектури з метою зробити його більш зрозумілим і гнучким [18, 5].

За наявності достатніх знань можна при бажанні записати до десяти рядків нормального коду в один рядок. Ціна за це буде невисокою - усього лише повна неможливість швидко виправити помилку в цьому коді. Якщо код, що створюється вимагає детального знання спеціальних правил пріоритету або змушує додатково робити аналіз літературних джерел, то цього не варта робити.

Зазвичай доводиться переносити або виклики функцій з великою кількістю аргументів. Але переносити треба обов'язково, так, щоб весь код було видно без прокручування його на екрані по горизонталі.

Багато середовищ програмування зараз автоматично вирівнюють код, але не всі, тому програмісту необхідно на це звернути увагу.

Щоб зробити програму високоякісну необхідно дотримуватися таких рекомендацій: 1. Код програми повинен бути модульним і добре написаним. 2. В розробці повинні використовуватися автоматичні тести, краще якщо тест написано до початку утворення коду, що тестується. 3. Необхідно мати хороший контакт з користувачами, які приймають участь в тестуванні та пропонували покращення. 4. Управління проектом повинно бути об'єктивним і далекоглядним. 5. Досить нав'язлива реклама шкідлива і цілком недопустима. 6. Важливим є вдала назва програми 7. Коментарі повинні бути частими [18].

Щоб зробити програмний код зрозумілішим і не створювати складнощів при подальшому супроводі необхідно обов'язково писати коментарі. Якщо програмний продукт не прокоментовано, то коли виникне потреба через певний час повернутися до нього для доопрацювання (а це часто доведеться робити), відсутність коментарів призведе до додаткових втрат робочого часу. Втрачений час неможливо компенсувати.

Слід, однак, зазначити, що написання коментарів - це теж мистецтво. Для досягнення майстерності у цьому виді діяльності необхідна практика. Коментарі бувають хороші й погані. Не треба писати занадто довгих коментарів. З іншого боку, не слід писати дуже коротких коментарів. Коментарі не тільки економлять час, але вони й самі потребують часу на прочитання, крім того, вони збільшують фактичні розміри програми на екрані монітора, в результаті чого необхідно одночасно зменшувати обсяг діючого програмного коду.

Кінцева мета така: написати програмний код таким чином, щоб стороння людина, не маюча уявлення про те, що цей код робить, могла зрозуміти його якомога швидше. Один з основних способів досягнення цієї мети полягає в тому, щоб давати змінним, функціям чи процедурам зрозумілі імена. При цьому необхідно давати об'єктам імена досить довгі й наочні для їх розуміння, однак не настільки довгі й громіздкі, щоб це ускладнювало читання програмного коду,

Якщо програма досить велика, в ній є безліч функцій і процедур, то потрібно кожному з них перевіряти на наявність помилок. Необхідно писати код так, щоб він перевіряв процедуру чи функцію на наявність підозрілих даних і захищався від них.

Переваги такого підходу не вичерпуються захистом програми від збоїв. Хороші механізми перевірки на наявність помилок також прискорюють налагодження програмного коду. Якщо в якій-небудь процедурі наявні всі механізми перевірки, то не доведеться проходити її крок за кроком у пошуках помилок.

Слід зазначити, що оптимізація часто йде в супереч ясності, у деяких випадках оптимізація необхідна. Проте майже ніколи не відомо заздалегідь, що саме необхідно оптимізувати, до тих пір, поки не протестовано реально функціонуючий код за допомогою інструменту під назвою профайлер (профайлер - це програма, яка спостерігає за програмним кодом і оцінює час, що витрачається на виконання окремих викликів) [19].

Використовуючи [профайлер](#) можна відзначити декілька основних проблем. По-перше, вважається, що це інструмент призначений тільки для програміста. Результати коду є настільки технологічними, що мало зрозумілі для тих, хто зацікавлений в підвищенні якості програмного продукту, але не готові вникати в деталі. По – друге, відносно поняття “якості” програмного продукту все ще поширене досить вузьке розуміння питання. По – третє, є цілком певний конфлікт інтересів. Програміст може бути зовсім не зацікавлений в тому, щоб узнати про свій код усі деталі. Для розробника програмного коду найціннішим ресурсом є час. Керівник розробки і так знаходиться в постійному цейтноті, планує терміни виходу версій і формує склад змін майбутньої версії. Про технічний борг він і так знає. Ну, виявить, аналізатор ще деякі промахи і недоліки, то поставить у чергу в кращому випадку. Тестувальники зайняті і мотивовані виявленням помилок у функціональності, а їх керівники не бачать загальної картини того, як добре чи погано програма в дійсності зроблена.

Код високоякісної програми повинен бути на стільки простим, на скільки це можливо. Простий код легший у читанні та у підтримці.

Оскільки він коротший і зрозуміліший, то значить, містить менше помилок,

Користувач в основному проявляє зацікавленість в застосуванні програмного забезпечення, його продуктивності і результатах використання. Користувачі оцінюють програмне забезпечення без вивчення його внутрішніх аспектів або того, як вона утворювалася. Користувача можуть цікавити наступні питання: 1. Чи є необхідні функції в програмному забезпеченні? 2. Наскільки надійне програмне забезпечення? 3. Наскільки ефективно програмне забезпечення? 4. Чи являється програмне забезпечення зручним для користувача? 5. Наскільки просто переноситься програмне забезпечення в інше середовище.

З точки зору користувача та розробника процес створення ПЗ вимагає використання одних і тих же характеристик якості програмного забезпечення, оскільки вони застосовуються для встановлення вимог і прийомів. Коли розробляється програмне забезпечення для продажу, у вимогах якості повинні бути відображені передбачені потреби. Так як розробники відповідають за створення програмного забезпечення, яке повинно задовольняти вимогам якості, вони зацікавлені в якості проміжних програмних кодів так само, як і в якості кінцевого програмного продукту.

Керівник нафтогазовидобувного підприємства може бути більш зацікавлений в загальній якості, ніж в конкретній характеристиці якості, і з цієї причини буде потребувати у визначенні важливості значень, що відображають комерційні вимоги для індивідуальних характеристик. Керівникові можливо також знадобиться співставлення підвищення якості з критеріями управління, такими як планова затримка або перерозхід вартості, тому що він бажає оптимізувати якість програмного забезпечення в межах обмеженої вартості, трудових ресурсів і встановленого терміну його розробки.

Кожна компанія прагне зайняти саме високе положення на IT – ринку, тому повинна прикладати зусилля для створення якісного програмного забезпечення, яке подобається користувачам. На жаль, деколи тиск замовників заставляє розробників нехтувати якістю програмного забезпечення, і вони поставляють готовий продукт, що невідповідає очікуванням.

Низька якість проявляється тільки тоді коли програмне забезпечення перестає працювати.

Виявляється, що достатньо якісне програмне забезпечення створити досить складно. Це пояснюється сукупністю таких причин [20]: 1. Часто якість прагнуть визначити тільки в термінах дефектів (помилки). З точки зору користувача не менш важливим є готовність до певної дати. 2. Передбачається, що незначна кількість помилок рівносильна кращій якості, і користувач надає перевагу якраз такій якості. Але інколи користувач готовий іти на компроміси і примиритися з декількома помилками в обмін на більш швидке виконання роботи. 3. Ігнорування таких факторів, як моральний стан команди програмістів і адекватне умови для роботи.

Нажаль, “високоякісне” програмне забезпечення рідко буває достатньо високоякісним. Цікаве спостереження, яке полягає в тому, що деякі команди прагнуть до зниження інтелектуального рівня показників свого програмного продукту, що підкреслюють багато програмістів. IT-компаніям надзвичайно вигідно мати справу з людьми, технічна класифікація яких не дозволяє визначити реальні аспекти (наприклад, якість, складність, цінність) програмного продукту. Прикриваючись “спрощенням” роботи і підвищенням доступності комп’ютера для користувачів, компанії багатократно перевантажують і ускладнюють програмне забезпечення таким чином, щоб користувачеві було досить важко зрозуміти яким чином воно працює насправді і стати професіоналом.

А замовник буде задоволений і приведе з собою ще замовників, тільки в тому випадку, якщо куплений програмний продукт буде повністю задовольняти його реальним і життєвим потребам, як специфікованим, так і не специфікованим. Але все це не настільки абстрактно, на скільки може показатися з першого разу.

Якість ПЗ має цілком певний вартісний вираз. Якраз це заставляє програмістів забезпечувати необхідний рівень якості програмних продуктів. Економічні наслідки помилок в них можуть бути значні. Часті зусилля по ліквідації причин, що викликають претензії користувачів програмних продуктів

здатні довести до банкрутства будь-яку ІТ-компанію.

Концепція загальних втрат передбачає, що головним є загальні втрати, які утворюються в результаті недоліків даного програмного продукту. Вартість якості ПЗ може бути диференційована на вартість попередження дефектів, вартість оцінювання ефективності роботи, вартість внутрішніх і зовнішніх збоїв під час роботи ПЗ. Рушійною силою успішної реалізації програмних проектів є бажання їх керівників розробити таке ПЗ, яке б володіло певною цінністю, тобто було значущим для вирішення певних завдань або досягнення цілей – тактичних і стратегічних. Цінність ПЗ можна виражати у формі його вартості або в деякому іншому вигляді. Замовник, зазвичай, має своє уявлення про максимальну вартість вкладення коштів, повернення яких він очікує в разі досягнення основних цілей під час використання ПЗ. Він також може мати своє бачення щодо функціональних можливостей ПЗ та певні очікування щодо його якості. Замовник спочатку концентрує свою увагу на функціональних можливостях ПЗ й не замислюється над питаннями його якості, а тим більше над пов'язаною з ними вартістю його розроблення. Тому на початковому етапі реалізації програмного проекту предметом обговорення може стати питання про повне розуміння замовником вигоди від використання ПЗ і вартості його розроблення, пов'язаної з досягненням того чи іншого рівня якості ПЗ, а також про його залучення до процесу прийняття відповідних рішень. В ідеальному випадку більшість таких рішень потрібно приймати на етапі встановлення користувачьких вимог до ПЗ, але ці питання можуть підніматися протягом всіх етапів його розроблення. Не існує якихось "стандартних" правил щодо того, як саме необхідно приймати такі рішення. Однак, системні інженери повинні чітко уявляти різні альтернативні способи досягнення певного рівня якості ПЗ та відповідну вартість його розробки для того, щоб можна було спрогнозувати загальну вартість реалізації програмного проекту [21].

Таким чином, в статі сформульовано та розглянуто методологічні підходи щодо оцінки якості програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу.

Розглянуто сучасний стан проблеми та попередні дослідження у цій сфері, а також основні, хоча і далеко не всі, методики оцінки якості програмного забезпечення.

Аналіз основних характеристик програмного забезпечення, таких як: функціональні можливості, надійність, практичність, ефективність, супровід, мобільність показав, що вони можуть бути покладені в основу споживчих оцінок якості програмних продуктів, а в формалізованому вигляді - використані в узагальненій моделі оцінки якості програмного забезпечення інформаційних систем, що можуть бути впроваджені в нафтогазовій галузі.

Описано і проаналізовано деякі з проблем, що пов'язані зі створенням і застосуванням методик оцінки якості ПЗ загалом і зокрема баз знань в нафтогазовій предметній області.

Література

1. Соммервил І. Інженерия програмного обеспечения. 6-издание.– Москва–Санкт–Петербург–Киев, 2002 –623 с.
2. ISO/IEC 12207:1995. Information technologies. Software life cycle processes. // ISO/IEC. -1995. – 61 p.
3. Бутаков Е. А. Методы создания качественного программного обеспечения ЭВМ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 232с. — С. 114.
4. В. В. Кулямин. Технологии программирования. Компонентный подход. М.: ИНТУИТ-Бином, 2007. 463 с.
5. Андон Ф.И., Коваль Г.И., Коротун Т.М. Основы инженерии качества программных систем. 2-е издание. — К.: Академперіодика, 2007. — 672 с.
6. Бозм Б., Браун Дж., Каспар Х. и др. Характеристики качества программного обеспечения. – М.: Мир, 1981. – 206 с.
7. Жарко Е.Ф. Сравнение моделей качества программного обеспечения: аналитический подход / XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 4585-4594.
8. Воробьев В. И., Копыльцов А. В., Пальчун Б. П., Юсупов Р. Методы и модели

оценивания качества программного обеспечения. М. С-Пб.: СПИИРАН, 1992. 33 с.

9. Липаев В.В. Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты. – М.: Синтег, 2001. 380 с.

10. Кулаков А.Ю. Оценка качества программ ЭВМ. Киев: Техніка. 1984. 167с.

11. Майерс Г. Надежность программного обеспечения / Майерс Г. М.: Мир, 1980. – 360 с.

12. Вовк О. Б. Аналіз та оцінювання якості програмного продукту (поняття, терміни, означення) / О. Б. Вовк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2003. № 489 :Інформаційні системи та мережі. – С. 64-73

13. Стів Макконелла Профессиональная разработка программного обеспечения. СПб.: Символ-Плюс, 2006. - 240 с.,

14. Rubey R.J., Hartwick R.D. Quantitative Measurement of Program Quality, Proceedings, ACM National Conference. – 1986. – P. 671–677.

15. Грицюк Ю. І., Андрущакевич О. Т. Засіб для визначення якості програмного забезпечення методами метричного аналізу. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 6. С. 159–171.

16. Юрчишин В.М., Шекета В.І., Юрчишин О.В. Інформаційне моделювання нафтогазових об'єктів - Івано-Франківськ; Видавництво Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу 2010 -192с.

17. . Оценка качества баз данных. Метрики адекватности баз данных. Методические материалы // ИПС АН Украины. – 1994. – 57

18. Стів Макконнелл. Совершенный код. Мастер-класс / Пер. с англ. — М. : Издательско-торговый дом «Русская Редакция» ; СПб.: Питер, 2005. — 896 с.

19. Кнут Д. Э. Искусство программирования. Том 1. Основные алгоритмы — Москва: Вильямс, 2002. — Т. 1. — 720 с.

20. Коваль Г.И. Подход к прогнозированию надежности ПО при управлении проектом // «Проблемы программирования». –2002. - № 1 – 2. – С. 282 – 290.

21. Стів Макконнелл. Сколько стоит программный проект ; СПб.: Питер, 2007. — 304 с.

References

1. Sommervil I. Inzheneriya programmnoho obespecheniya. 6-izdanie.– Moskva–Sankt–Peterburg–Kiev, 2002 – 623 s. [in Russian]

2. ISO/IEC 12207:1995. Information technologies. Software life cycle processes. // ISO/IEC. -1995. – 61 p.

3. Butakov E. A. Metody sozdaniya kachestvennogo programmnoho obespecheniya EVM. — М.: Energoatomizdat, 1984. — 232 s. — S. 114.

4. V. V. Kulyamin. Tekhnologii programmirovaniya. Komponentnyj podhod. М.: INTUIT-Binom, 2007. 463 s.

5. Andon F.I., Koval' G.I., Korotun T.M. Osnovy inzhenerii kachestva programmnyh sistem. 2-e izdanie. — К.: Akadempriodika, 2007. — 672 s.

6. Boem B., Braun Dzh., Kaspar H. i dr. Harakteristiki kachestva programmnoho obespecheniya. – М.: Mir, 1981. – 206 s.

7. Zharko E.F. Sravnenie modelej kachestva programmnoho obespecheniya: analiticheski jpodhod / XII Vserossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya. VSPU-2014. Moskva, 16-19 iyunya 2014 g.: Trudy. М.: IPU RAN, 2014. S. 4585-4594.

8. Vorob'ev V. I., Kopyl'cov A. V., Pal'chun B. P., YUsupov R. Metody i modeli ocenivaniya kachestva programmnoho obespecheniya. М. S-Pb.: SPIIRAN.1992.-33s.

9. Lipaev V.V. Obespechenie kachestva programmnyh sredstv. Metody i standarty. – М.: Sinteg, 2001. – 380 s.

10. Kulakov A.YU. Ocenka kachestva programm EVM.–Kiev: Tekhnika.–1984.–167s.

11. Majers G. Nadezhnost' programmnoho obespecheniya / Majers G. – М.: Mir, 1980. – 360 s.

12. Vovk O. B. Analiz ta ocinyuvannya yakosti programmnoho produktu (ponyattya, termini, oznachennya) / O. B. Vovk // Visnik Nacional'nogo universitetu "L'viv'ska politekhnika". – 2003. – № 489: Informacijni sistemi ta merezhi. – S. 64-73

13. Stiv Makkonell. Professional'naya razrabotka programmnoho obespecheniya. SPb.: Simvol-Plyus, 2006. - 240 s.

14. Rubey R.J., Hartwick R.D. Quantitative Measurement of Program Quality, Proceedings, ACM National Conference. – 1986. – P. 671–677.

15. Gricyuk YU. I., Andrushchakevich O. T. Zasib dlya viznachennya yakosti programnogo zabezpechennya metodamy metricnogo analizu. Naukovij visnik NLTU Ukraïni. 2018, t. 28, № 6. S. 159–171.
16. Yurchishin V.M., Sheketa V. I, Yurchishin O.V. Informacijne modelyuvannya naftogazovih ob'ektiv - Ivano-Frankivs'k; Vidavnictvo Ivano-Frankivs'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu nafti i gazu 2010 -192s.
17. Ocenka kachestva baz danyh. Metriki adekvatnosti baz danyh. Metodicheskie materialy // IPS AN Ukrainy. – 1994. – 57
18. Stiv Makkonnell. Sovershennyj kod. Master-klass / Per. s angl. — M. :Izdatel'sko-torgovyj dom «Russkaya Redakciya» ; SPb.: Piter, 2005. — 896 s.
19. Knut D. E. Iskusstvo programmirovaniya. Tom 1. Osnovnye algoritmy — Moskva: Vil'yams, 2002. — T. 1. — 720 s.
20. Koval' G.I. Podhod k prognozirovaniyu nadezhnosti PO pri upravlenii proektom // «Problemy programmirovaniya». –2002. - № 1 – 2. – С. 282 – 290.
21. Stiv Makkonnell. Skol'ko stoit programmnyj proekt; SPb.: Piter, 2007. — 304 s.

УДК 681.518.5

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-58-65

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ НА ЗАСАДАХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

О.В Кучмистенко

*¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67,
e-mail: kafatr@ukr.net*

В роботі розглядається актуальна науково-практична задача, яка полягає в розробці нових Досліджено актуальну науково-практичну задачу, яка полягає в розробці нових способів і методів оцінки технічного стану магістральних нафтопроводів, що забезпечить безпечне автоматизоване управління нафтотранспортної системи. Визначено, що в умовах інтенсивного старіння основних фондів нафтотранспортних систем та фінансового обмеження, комплексне технічне діагностування магістральних нафтопроводів стає найбільш ефективним засобом, що забезпечує надійність і безпеку усєї нафтотранспортної системи.

Імітаційне моделювання є складним, по суті, і тривалим за часом процесом, який вимагає безлічі обчислень, в тому числі розподілених. Виділяють кілька етапів імітаційного моделювання (ІМ). У найзагальнішому, укрупненому вигляді, це наступні етапи: постановка задачі, збір і обробка даних, розробка і коректування моделі, моделювання, накопичення результатів, планування експериментів, аналіз результатів, документування та зберігання результатів. Для проведення таких досліджень створюються різні системи автоматизації імітаційних досліджень (САІД). Хмарний підхід до проведення ІМ, що дозволяє спростити і уніфікувати проведення досліджень для кінцевого користувача, абстрагувати дослідника від технічних особливостей організації обчислень. Хмарна САІД є інваріантною стосовно кінцевого апаратного та програмного забезпечення. Саме тому розробка нових і перспективних засобів контролю і управління на основі штучного інтелекту з поєднанням хмарних технологій є актуальною науково-практичною задачею за результатами якої визначено основні наукові проблеми, що вимагають подальших досліджень.

Ключові слова: магістральний нафтопровід, система автоматичного контролю, об'єкт керування, інтелектуальна труба.

В работе рассматривается актуальная научно-практическая задача, которая заключается в разработке новых Исследована актуальную научно-практическую задачу, которая заключается в разработке новых способов и методов оценки технического состояния магистральных нефтепроводов, который обеспечит безопасное автоматизированное управление нефтетранспортной системы. Определено, что в условиях интенсивного старения основных фондов нефтетранспортных систем и финансового ограничения, комплексное техническое диагностирование магистральных нефтепроводов становится наиболее эффективным средством, обеспечивающим надежность и безопасность всей нефтетранспортной системы.

Имитационное моделирование является сложным, по сути, и длительным по времени процессом, который требует множества вычислений, в том числе распределенных. Выделяют несколько этапов имитационного моделирования (ИМ). В самом общем, укрупненном виде, это следующие этапы: постановка задачи, сбор и обработка данных, разработка и корректировка модели, моделирование, накопления результатов, планирование экспериментов, анализ результатов, документирования и хранения результатов. Для проведения таких исследований создаются различные системы автоматизации имитационных исследований (САИИ). Облачный подход к проведению ИМ, что позволяет упростить и унифицировать проведения исследований для конечного пользователя, абстрагировать исследователя от технических особенностей организации вычислений. Облачная САИИ является инвариантной относительно конечного аппаратного и программного обеспечения. Именно поэтому разработка новых и перспективных средств контроля и управления на основе искусственного интеллекта с сочетанием облачных технологий является актуальной научно-практической задачей по результатам которой определены основные научные проблемы, требующие дальнейших исследований.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, система автоматического контроля, объект управления, интеллектуальная труба.

The paper considers an urgent scientific and practical task, which consists in the development of new ones. An urgent scientific and practical task is investigated, which consists in the development of new methods and methods for assessing the technical condition of oil trunk pipelines, which will provide safe automated control of the oil transportation system. It has been determined that in conditions of intensive aging of fixed assets of oil transportation systems and financial constraints, complex technical diagnostics of oil trunk pipelines becomes the most effective means of ensuring the reliability and safety of the entire oil transportation system.

Simulation modeling is inherently complex and time-consuming process that requires many computations, including distributed ones. There are several stages of simulation modeling (MI). In the most general, enlarged form, these are the following stages: setting the problem, collecting and processing data, developing and adjusting the model, modeling, accumulating results, planning experiments, analyzing the results, documenting and storing the results. To carry out such research, various systems for the automation of imitation research (SAIS) are being created. A cloud-based approach to conducting MI, which makes it possible to simplify and unify research for the end user, to abstract the researcher from the technical features of the organization of calculations. Cloud AISI is invariant with respect to the target hardware and software. That is why the development of new and promising control and management tools based on artificial intelligence with a combination of cloud technologies is an urgent scientific and practical task, based on the results of which the main scientific problems requiring further research have been identified.

Key words: main oil pipeline, automatic control system, control object, intellectual pipe.

Вступ. Сучасна система моніторингу нафтопроводів повинна являти собою не тільки сукупність заходів, способів, програмних і технічних засобів, призначених для контролю і реєстрації стану магистрального нафтопроводу, а й систему, що забезпечує користувача повної, достовірної та надійною інформацією про стан контрольованого нафтопроводу, а також про індикатори розвитку небезпечних процесів як в штатному режимі роботи об'єкта, так і в разі виникнення аварійних ситуацій.

Виявлення потенційно небезпечних ділянок нафтопроводу здійснюється не лише за допомогою моніторингу, а також розроблених способів використання математичних моделей та програмних засобів.

Постановка завдання: дослідження та аналіз застосування нових способів і методів оцінки технічного стану магистральних нафтопроводів, що забезпечить безпечне автоматизоване управління нафтотранспортної системи.

Метою даної роботи є створення інтелектуальної системи автоматизованого управління багатовимірними об'єктами, зокрема безпечна експлуатація лінійної частини магистрального нафтопроводу на засадах хмарних технологій з використанням гібридних систем обчислювального інтелекту.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу ділянки магистрального нафтопроводу в автоматичному режимі на засадах хмарних технологій з використанням гібридних систем обчислювального інтелекту.

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

Основними вимогами до систем моніторингу є:

1. Система моніторингу повинна бути побудована з урахуванням типізації постів спостережень за видом геологічної небезпеки.

2. При побудові системи моніторингу повинні бути враховані методи моніторингу кожної ділянки, що підлягає контролю, з урахуванням ранжирування геологічного ділянки за ступенем небезпеки для нафтопроводу.

3. Ділянка, якому присвоєно найвищий ступінь небезпеки, повинен контролюватися автоматизованим вимірювальним

обладнанням, яке передає інформацію в диспетчерську в режимі реального часу. Одночасно повинна контролюватися деформація частини нафтопроводу, прокладеного через цю ділянку. Інформація про деформації частини нафтопроводу також повинна віддаватися в диспетчерську в режимі реального часу.

4. Оцінка даних моніторингу повинна здійснюватися за допомогою єдиної інформаційної технології з використанням ГІС та математичного моделювання взаємодії нафтопроводу з ґрунтом на всіх етапах: від збору, накопичення, зберігання та обробки первинних даних до підтримки прийняття рішень з управління безпекою нафтопроводу в штатних і аварійних ситуаціях.

5. Система моніторингу повинна контролювати поточний стан спостережуваних геологічних процесів і зміна деформації ділянок нафтопроводу, а також здійснювати оцінку динаміки їх розвитку, аналіз і прогноз зміни стану на основі математичного моделювання ПДВ нафтопроводу.

6. Автоматизовані точки контролю, що працюють в режимі реального часу, повинні здійснювати регулярний комунікаційний обмін оперативною інформацією щодо єдиної технологічної програмою.

7. Технологія моніторингу параметрів геологічних процесів і стану магістральних нафтопроводів, прокладених в складних інженерно-геологічних умовах, повинна забезпечити комплексний контроль показників, що впливають на безпеку нафтопроводів.

Для ведення технологічного процесу транспортування нафти магістральними нафтопроводами у бажаному режимі, в комплексі технологічних агрегатів нафтопровідної системи, необхідно встановити закон взаємозв'язку між вхідними і вихідними параметрами окремих агрегатів і системи, що неможливо здійснити без спеціальних засобів і математичного апарату. Ефективності рішення цього завдання і управління складними промисловими системами можливо за допомогою

комп'ютерних систем на основі математичних моделей і алгоритмів, створених з урахуванням природи і будови промислового комплексу, типу процесів, що протікають в них, видів режимів.

Розглянемо основні функції математичних моделей, що використовуються при вирішенні задач аналізу і вибору оптимальних режимів роботи складних технологічних комплексів. Моделювання може використовуватися для розробки теорії об'єкта, особливо якщо безпосереднє дослідження об'єкта або процесу неможливо, тобто аналіз моделей найчастіше дозволяє забезпечити розвиток теорії. Моделювання дає можливість в окремих випадках замінити вимірюванням або спростити завдання. Математичне моделювання стає особливо доцільно, коли розробляються або досліджуються дорогі об'єкти, наприклад найбільші технологічні установки для дослідження таких об'єктів, при визначенні раціональних режимів їх експлуатації. Застосування математичних моделей складних промислових об'єктів може приносити значний економічний ефект. Воно дозволяє проводити дослідження процесів, що відбуваються в технологічних агрегатах, при незмірно менших витратах, ніж натурних досліджень на реальних агрегатах, на стендах або на фізичних моделях. Нарешті, система математичних моделей (моделі агрегатів, об'єднання в загальну систему) може використовуватися для ефективності вирішення завдань вибору та оптимізації технологічних систем.

Крім того, на основі моделей, що дозволяють визначити залежність критеріїв якості від керуючих параметрів, можна вирішувати зворотну задачу - завдань вибору та прийняття оптимальних рішень. При цьому задаються вимоги до вихідного параметра об'єкта, наприклад, бажане значення локальних критеріїв, і обмеження щодо ведення процесу, обумовлені технологічним регламентом об'єкта (інтервалу значень режимних параметрів, керуючих впливів і ін.). Потім, застосовуючи спеціальні алгоритми вибору та оптимізації, визначають набір

керуючих параметрів, що забезпечують бажане значення критеріїв якості. Аналізуючи отримані результати оптимізації, здійснюється вибір альтернатив, тобто вирішення завдань вибору і прийняття рішень. Проблеми і підходи до вирішення розгляд вище прямому і зворотному завдань, що виникають при багатокритеріальній. Вибори оптимального режиму роботи технологічних комплексів магістральних нафтопроводів по економіко-екологічних критеріях, є метою дослідження даної монографії.

Для математичного опису зв'язків цікавлять нас параметрів досліджуваного об'єкта зазвичай використовується комбінована інформація різних типів: теоретичні уявлення про природу і характер процесу, що протікає в об'єкті; вихідних статистичних даних, що характеризують функціонування аналізованої системи; дані експертної оцінки, в т.ч. нечітка інформація, якісно описує стан об'єкта.

Залежно від доступності тих чи інших видів перерахувань даних можуть бити побудови різних типи моделей агрегатів установки. При цьому слід зазначити, що при створенні комплексу моделей для системного моделювання технологічного комплексу нафтопроводу необхідно враховувати, чи добре розробиться тип моделей окремих агрегатів. Ця проблема відноситься до однієї з слабкої освітленості в літературі питань. Ефективний підхід до вирішення цієї проблеми запропонований в роботі моделей. У даній роботі цей метод застосовується до комплексу агрегатів нафтопровідної системи.

Побудова моделей технологічних агрегатів шляхом теоретичного підходу можливо в основному для найпростіших процесів. Для більш складних агрегатів, або коли є комплекс взаємозв'язаних агрегатів, отримання їх детермінованих моделей практично неможливо. Це пов'язано з тим, що в цих випадках відсутні або обмежені теоретичні відомості про характер процесів модельованого об'єкту, або отримана в результаті модель може виявитися занадто громіздкою, складною, її інформаційне забезпечення (пошук, визначення коефіцієнтів

моделі) досить трудомістким, так , що розробка такої моделі буде недоцільною. Однак, важливо методологічне значення цього підходу, що дозволяє оцінити стан об'єкта за допомогою рівнянь, враховуючих загальні фундаментальні закони природи. А ці закони, як правило, відображають і управляють процесами та явищами в природі і техніці.

Таким чином, в промислових умовах, коли на стан технологічних агрегатів одночасно впливає велика кількість параметрів, важливу роль відіграють випадкові впливи. Для опису таких агрегатів розглянемо будь реальний процес, якому властиві випадкові коливання, наприклад, викликані фізичною мінливістю будь-яких факторів $x_i + x_i(\tau)$ або зовнішніми випадковими впливами. В силу цього при рівному середньому значенні вхідних характеристик $x(\tau)$ в моменти τ_1 і τ_2 вихідні параметри $y(\tau)$ будуть неоднаковими, тому для таких стохастичних процесів, де не можна знехтувати випадковими коливаннями $\Delta x_i(\tau)$ по порівняно з $x_i(\tau)$ і випадковими зовнішніми впливами $\zeta_i(\tau)$ необхідно характеризувати систему з урахуванням статистичного закону розподілу миттєвих значень $y(\tau)$ щодо середньої величини $y_{cp}(\tau)$ рівнянням:

$$y(\tau) = y_{cp}(\tau) + \Delta y(\tau) = f(y_{cp}) + \zeta(\Delta x, \zeta) \quad (1.1)$$

Моделі типу (1.1), що відображають випадковий характер параметрів і факторів об'єкта, називають стохастичними. Статистичні моделі є більш широким класом моделей і включають детерміновані моделі як крайній одиничний випадок, в якому вихідні змінні у однозначно визначаються вхідними змінними x [1].

Побудова та дослідження статистичної математичної моделі включає розробку, оцінку якості і дослідження поведінки системи за допомогою деякого рівняння або системи рівнянь, описуючих модельований агрегат агрегат. В цьому випадку вихідна інформація добувається на основі експериментально-статистичного підходу, шляхом проведення спеціального експерименту з реальною системою, для чого створені методи підготовки та проведення такого експерименту, обробки результатів, а

також критерії оцінки отриманих моделей. Цей підхід еквівалент відомої проблеми дослідження «чорного ящика», тобто мова може йти про побудову математичної моделі на рівні статистичної інформації, описуючої поведінку об'єкта.

З метою максимального добування інформації з проведених експериментів і зменшення їх числа провадиться планування експериментів, тобто вибір кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання із заданою точністю.

Для побудови статистичної моделі застосовують два види експериментів: пасивний і активний. Перший вид експерименту за рахунок тривалого і пасивного спостереження за ходом процесу дозволяє зібрати ряд даних для подальшого статистичного аналізу. При активному експерименті, є можливість регулювання умов проведення дослідів. Причому найбільш ефективно одночасне варіювання величини всіх факторів за певним планом, при цьому вдається знайти взаємодію факторів і істотно скоротити об'єм експериментів.

З проведеного аналізу можна зробити вивід, що основним достоїнством статистичних моделей є їх простота, що дозволяє широко застосовувати такі моделі в системах автоматизованого управління складними технологічними об'єктами. У ряді випадків статистичні моделі є найбільш ефективним засобом побудови математичної моделі процесу, коли система рівнянь для складної системи виявляється занадто громіздкою, а метою моделювання є оперативне прогнозування та управління процесом.

Однак ці моделі мають і істотні недоліки. Перш за все, статистичні моделі недостатньо змістовні. В рамках цих моделей не відкриваються властиві об'єкту глибокі причинно-наслідкові зв'язки, а тому не враховується все різноманіття появ процесів, що протікають в об'єкті, вплив різних зовнішніх факторів на ці процеси

Одна з труднощів, якщо не вважати цілком природною складність самого процесу

математичного опису систем агрегатів, полягає в тому, що вихідна інформація, яку реально вдається зібрати для моделювання та оптимізації досліджуваного об'єкта, може виявитися неповною і нечіткою тобто невизначеною. Така складність пов'язана з тим, що більшість складних об'єктів, як правило, кількісно важкоописувані, а спеціальні засоби збору та обробки статистичних даних в умовах недостатньої, не володіють необхідними якостями або відсутні. Для моделювання таких об'єктів традиційний підхід (детерміновані, експериментально-статистичні), розгляд вище, недоцільний, оскільки він не дасть суттєві результати.

Одним з перспективних підходів подолання зазначених проблем, який значно підвищує ефективність методів математичного моделювання та управління складними, кількісно важкоописувані технологічні установки нафтопереробки, є обґрунтоване використання та формалізація апріорної якісної інформації про особливості функціонування цих об'єктів. Ефективна формалізація якісної інформації, що представляє собою знання, судження фахівців експертів про досліджуваний об'єкт, можна здійснювати на основі методів теорії нечітких множин (ТНМ).

Часто технологічні об'єкти в виробничих умовах функціонують в умовах невизначеності, пов'язаної нечіткістю деяких параметрів процесу. Однак людина - оператор в змозі керувати ним, покладаючись на деякі моделі якісного характеру, що формуються в його свідомості в процесі навчання і спостереження за функціонуванням об'єкта. Можна отримати формалізовану модель такого агрегату, не вдаючись до допомоги складних математичних структур, а покладаючись на здатності людини вирази його сутність в нечітких термінах природного мови. Далі, обробляємо отриману якісну інформацію методами теорії нечітких множин і можливостей, можна отримати кількісну оцінку, тобто модель цього об'єкта, використовувану при виборі режим роботи керованої виробничої системи.

Таким чином, застосування математичного апарату теорії нечітких множин і можливостей дозволяє побудувати більш прості і ефективні моделі і алгоритми методи вибору оптимальних режимів роботи магістральних нафтопроводів, коли застосування традиційних підходів недоцільно або неможливо.

Поряд з ефективністю застосування теорії нечітких множин слід відмінити деякі її обмеження: відносну складність отримання та систематизації первинної якісної інформації, необхідність додаткової перевірки достовірності інформації, труднощі вибору вирішальних правил, представлених у вигляді умовних пропозицій для синтезу алгоритму багатокритеріального вибору.

Таким чином, на практиці при виборі оптимальних режимів роботи технологічних комплексів, якими є магістральні нафтопроводи, по економіко-екологічних, технічних та іншим критеріях необхідно розробити і застосовувати методи работоздатні в невизначеному середовищі, викликані дефіцитом, випадковістю і нечіткістю вихідної інформації.

На практиці при побудові моделей реальних промислових агрегатів доводиться використовувати комбінований підхід, який по можливості поєднує універсальність теоретичного, простоту експериментально-статистичного підходу і можливість урахування додаткової якісної інформації на основі методології теорії нечітких множин. При цьому можливі різноманітні варіанти об'єднання цих підходів. Наприклад, для оцінки стану об'єкта використовуються рівняння, описуючі загальні закони збереження, а окремі коефіцієнти моделі визначаються експериментально-статистичним методом.

Інтелектуальні системи, що включають електронний вимірювальний канал, є послідовністю функціональних ланок (вимірювальних перетворювачів), які зв'язують чутливий елемент мікроелектронного датчика з засобами інтелектуального оброблення отриманої інформації (мікроконтролером) [2,3].

Мікроелектронний датчик може бути конструктивно відокремлений від інших вимірювальних перетворювачів, або може включати вторинний аналоговий та аналого-цифровий вимірювальні перетворювачі, а також мікроконтролер, що керує процесом вимірювань і виконує підготовку даних для інтелектуального оброблення. Таким чином, в сучасних інтелектуальних системах мікроелектронний датчик як джерело первинної інформації, є невід'ємною і ключовою ланкою інтегрованого комплексу апаратних і програмних засобів (рис. 1).

Спроектвані датчики мають мати не тільки високі метрологічні характеристики, але й високу пожежо-, вибухобезпеку, стійкість, часову і температурну стабільність та надійність. Встановлені датчики хімічних величин (газові), датчики тиску і температури як для окремого так і для одночасного вимірювання такі датчики можуть працювати в екстремальних умовах, і їх можна використати у спецтехніці для контролю параметрів середовищ замкнених об'ємів (температура, витрата, тиск).

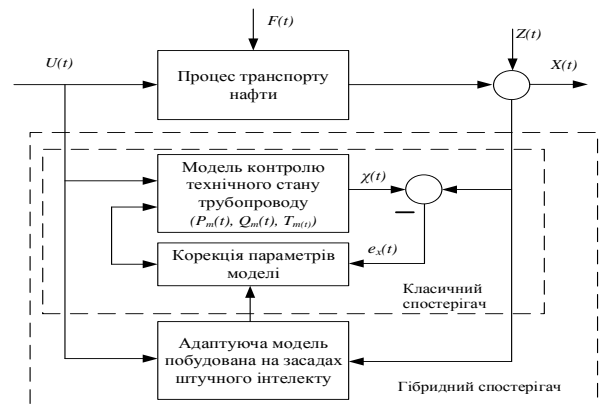


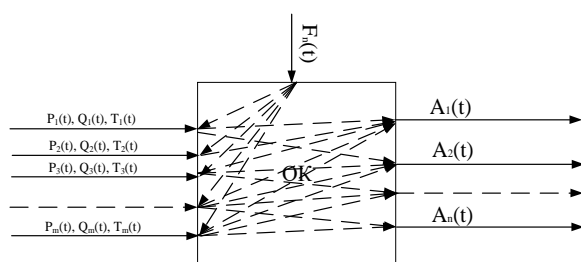
Рисунок 1 – Структура гібридного спостереження за процесом транспорту нафти

Технологічний процес перекачування нафти це об'єкт управління, в який входить сукупність технічних засобів (машин, апаратів, пристроїв), які виконують технологічний процес, але при цьому потребують спеціально організованих впливів ззовні для досягнення поставленої мети керування. Неможливо уявити повноцінне

управління процесом перекачування нафти без надійної роботи системи моніторингу лінійної частини МН. В нашому випадку об'єкт керування ОК має декілька вхідних і вихідних параметрів, тому його називають багатовимірним (рис. 2) [3].

На рис. 2 показано лише зв'язки $P_m(t)$, $Q_m(t)$, $T_m(t)$, $F_n(t)$ і $A_m(t)$ з усіма іншими, хоча загалом кожна вхідна змінна пов'язана з кожною вихідною змінною.

Необхідно буде вирішити принципове питання стосовно побудови універсальних вимірювальних кіл, нейтралізації впливу нестабільних неінформативних параметрів їх елементів у вигляді опору, індуктивності і ємності, виконання цифрового оброблення результатів вимірювань, у тому числі коригування похибок. Створити уніфіковані апаратно-програмні засоби для реалізації серійно спроможних, надійних і конкурентоспроможних систем різних типів інтелектуального рівня, що побудовані на засадах хмарних технологій [4,5].



$P_1(t)$, $Q_1(t)$, $T_1(t)$... $P_m(t)$, $Q_m(t)$, $T_m(t)$ – значення контрольованих параметрів тиску, витрати температури, цілісності труби і т.д.; $F_n(t)$ – зовнішні сили і перешкоди, що впливають на експлуатацію труби; $A_1(t)$... $A_m(t)$ – значення параметрів, які дають інформацію про стан труби і процес перекачування в ній (тиск, температура, витрата, пошкодження і деформації) у вигляді рівня аварійності

Рисунок 2 – Структура інформаційних потоків багатовимірного ОК типу МІ–МО (multy input–multy output)

Хмарні технології (Cloud technologies - СТ) - сучасний підхід до розробки розподілених модульних додатків, заснований на виділенні в якості елементарних блоків додатки багаторазово-використовуваних

автономних і відокремлених ІТ-сервісів з чітким інтерфейсом, взаємодіючих між собою за допомогою обміну стандартизованими повідомленнями через обчислювальну мережу [6].

Відзначимо, що, незважаючи на те, що СТ часто реалізовується саме в вигляді вебсервісів (і REST-сервісів), застосування одних лише вебсервісів не дозволяє побудувати сервіс-орієнтовані рішення, якщо не слідувати принципам СТ.

В першу чергу виділимо сервіси в додатку GPSS Cloud, відповідні окремих етапах імітаційного дослідження [7]: • сервіс моделювання процесу транспортування нафти; • сервіс розподіленого моделювання / синхронізації з усіма елементами МНП; • сервіс високопродуктивного моделювання режимів перекачування; • сервіс оптимізації роботи насосного обладнання; • сервіс математичних розрахунків; • сервіс аналізу і статистичної обробки результатів моніторингу технічного стану магістральних нафтопроводів; • сервіс графічних розрахунків (графіки і тренди); • сервіс взаємодії з БД / СТД (сервіс зберігання даних).

Для інтеграції сервісів в єдиний хмарний додаток застосовується шаблон сервісної шини підприємства ESB (Enterprise Service Bus). ESB - особливий спосіб побудови СТ-рішень, при якому сервіси, що становлять додаток, розгортаються навколо сервісної шини, що утворює середовище для їх взаємодії.

Висновки

Були отримані алгоритми функціонування та метрологічні характеристики базових модулів, призначені для побудови інтелектуальних систем для наукових досліджень і промислово-технологічних потреб транспортування нафти МНП. Вони відрізняються від відомих зразків провідних світових виробників значно ширшими функціональними можливостями, діапазонами вимірювання та робочих частот, більш високими розрізнявальною здатністю і точністю в тому числі здатністю бути інтегрованими у вебсервіси за допомогою хмарних технологій.

Література

1. Семенцов Г.Н. Фаззі-модель для імітаційного моделювання несанкціонованого витікання нафти з нафтопроводу / Г.Н. Семенцов, О.В. Кучмистенко // Академический вестник. – Кривой Рог. – 2004. - № 13. – С. 84-86.
2. Sementsov G. N., Chugur I. I. Fuzzy identification of rock layers with anomalous pressure // Proceeding of Third Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) – Zittay (Germany)/ - 2003. – P. 570-573.
3. Семенцов Г.Н. Автоматизація виробничих процесів транспорту нафти і газу: [навч. посібник] / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч, М.М.Дранчук, В.С.Борин. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 265 с.
4. Семенцов Г.Г. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами: [навч. посібник] / Г.Н.Семенцов, Ю.Б.Головата. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2012. 173 с.
5. Семенцов Г.Н. Сучасні тенденції побудови автоматичних систем управління в промисловості / Г.Н.Семенцов // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія «Технічна кібернетика і електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу». – 1999. Вип. 86 (том 6). – С.3-12.
6. Кучмистенко О.В. Підвищення ефективності автоматизованої системи керування процесом транспортування нафти на основі інтелектуальних технологій. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ : всеукр. наук.-техн. журн. - Івано-Франківськ : Факел. - 2018. - №2. – С. 7-13.
7. Кучмистенко О.В. Проектування об'єктів транспорту нафти з розподіленими параметрами на засадах хмарних технологій О.В. Кучмистенко // Международная научная конференция «ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ». Материалы конференции 14-15 мая 2020 г. KindleDP Сизтл, Вашингтон, США совместно с «ISE & E» & SWorld. 2019. – С. 120-125.

References

1. Sementsov GN Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline / G.N. Sementsov, OV Kuchmistenko // Academic Bulletin. - Krivoy Rog. - 2004. - № 13. - P. 84-86.
2. Sementsov G. N., Chugur I. I. Fuzzy identification of rock layers with anomalous pressure // Proceeding of the Third Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) - Zittay (Germany) / - 2003. - P. 570-573.
3. Sementsov GN Automation of production processes of oil and gas transport: [textbook. manual] / GN Sementsov, YR Koguch, MM Dranchuk, VS Borin. - Ivano-Frankivsk: Fakel, 2003. - 265 p.
4. Sementsov GG Intelligent process control systems: [textbook. manual] / GNSementsov, YB Golovata. - Ivano-Frankivsk: IFNTUNG. - 2012. 173 p.
5. Sementsov GN Modern tendencies of construction of automatic control systems in industry / GNSementsov // Exploration and development of oil and gas fields. Technical Cybernetics and Electrification of Fuel and Energy Complex Series. - 1999. Vip. 86 (vol. 6). - P.3-12.
6. Kuchmistenko OV. Improving the efficiency of the automated control system of the oil transportation process based on intelligent technologies. // Exploration and development of oil and gas fields: all-Ukrainian. scientific and technical magazine. - Ivano-Frankivsk: Torch. - 2018. - №2. - P. 7-13.
7. O.V. Kuchmystenka, Design of oil transport facilities with distributed parameters on the basis of cloud technologies OV Kuchmistenko // International Scientific Conference "ORGANIZATION OF SCIENTIFIC RESEARCH IN MODERN CONDITIONS". Proceedings of the conference May 14-15, 2020 KindleDP Seattle, Washington, USA together with ISE & E & SWorld. 2019. - P. 120-125.

УДК 681.5

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-66-81

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБ'ЄКТІВ

М. І. Горбійчук, М. І. Козуляк, В. С. Борин

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

Умовою успішного застосування на локальному рівні управління промислових регуляторів та програмованих логічних контролерів є наявність інтегрованих програмних засобів автоматичного тюнінгу параметрів алгоритму регулювання. Динамічні властивості об'єкта найчастіше визначають за результатами активного експерименту безпосередньо на об'єкті через процедуру ідентифікації, що ґрунтується на попередньо оброблених даних.

Проаналізовані основні технології фільтрації часових рядів та підібрана система показників для їх порівняння. Сплановані і проведені серії імітаційних експериментів по отриманню розгінних характеристик з різними ступенями накладання адитивних перешкод по входу та виходу. Досліджено прості інженерні алгоритми експоненціального, медіанного, ковзного середнього простого і зваженого та інших віконних фільтрів на предмет ефективності згладжування в режимі off-line і on-line обробки отриманих даних за показниками відносного середнього квадратичного та інтегрального середнього відхилення від базової лінії і проведено оцінку обчислювальної складності методів.

За результатами проведених досліджень сформульовано висновки про реальну ефективність застосування on-line фільтрації, наведено рекомендації стосовно їх практичного використання на апаратних платформах локальних засобів регулювання і доведено низький рівень згладжування off-line методів на обмеженій експериментальній вибірці. Встановлено напрямки подальших досліджень у напрямку застосування складніших алгоритмів фільтрації для сигналів з високим рівнем завад.

Ключові слова: розгінна характеристика контролер, вікно згладжування, імітаційний експеримент, цифровий фільтр.

Условием успешного применения на локальном уровне промышленных регуляторов и программируемых логических контроллеров является наличие интегрированных программных средств автоматического тюнинга параметров алгоритма регулирования. Динамические свойства объекта зачастую определяют по результатам активного эксперимента непосредственно на объекте через процедуру идентификации, основанной на предварительно обработанных данных.

Проанализированы основные технологии фильтрации временных рядов и подобрана система показателей для их сравнения. Спланированы и проведены серии имитационных экспериментов по получению разгонных характеристик с различными степенями наложения аддитивных помех по входу и выходу. Исследованы простые инженерные методы экспоненциального, медианного, скользящего среднего простого и взвешенного и других оконных фильтров на предмет эффективности сглаживания в режиме off-line и on-line обработки полученных данных по показателям относительного среднего квадратического и интегрального среднего отклонения от базовой линии и проведена оценка вычислительной сложности методов.

По результатам проведенных исследований сформулированы выводы о реальной эффективности применения on-line фильтрации, приведены рекомендации по их практическому использованию на аппаратных платформах локальных средств регулирования и доказано низкий уровень сглаживания off-line методов на ограниченной экспериментальной выборке. Установлено направления дальнейших исследований в направлении применения более сложных алгоритмов фильтрации для сигналов с высоким уровнем помех.

Ключевые слова: разгонная характеристика, контроллер, окно сглаживания, имитационный эксперимент, цифровой фильтр.

The condition for successful application at the local level of control of industrial controllers and programmable logic controllers is the presence of integrated software for automatic tuning of the parameters of the control algorithm. The dynamic properties of an object are most often determined by the results of an active experiment directly on the object through an identification procedure based on pre-processed data.

The main technologies of time series filtering are analyzed and the system of indicators for their comparison is selected. A series of simulation experiments to obtain overclocking characteristics with different degrees of addition of additive barriers to entry and exit are planned and conducted. Simple engineering algorithms of exponential, median, moving average simple and weighted and other window filters are investigated for the efficiency of smoothing in the mode of off-line and on-line processing of the obtained data on the indicators of relative root mean square and integral mean deviation from the baseline. methods.

Based on the results of the research, conclusions are drawn about the real effectiveness of on-line filtering, recommendations for their practical use on the hardware platforms of local controls and the low level of smoothing of off-line methods in a limited experimental sample. The directions of further researches in the direction of application of more difficult filtering algorithms for signals with a high level of interference are established.

Keywords: *overclocking characteristic, controller, smoothing window, simulation experiment, digital filter.*

Вступ

Досить часто при дослідженні динамічних характеристик промислових об'єктів вимірюється не вихідна координата $y(t)$, а сума її з деякою випадковою функцією (перешкодою) $n(t)$. Таким чином, експериментатор при знятті перехідних функцій реєструє не саму перехідну характеристику об'єкта, а випадкову функцію $z(t) = y(t) + n(t)$.

Стационарний випадковий процес $n(t)$ генерується безпосередньо в самому досліджуваному об'єкті або є випадковою перешкодою в ланцюгу вимірювання $y(t)$, чи привноситься в об'єкт іншими вхідними координатами. Як правило, $n(t)$ має нормальний закон розподілу з нульовим математичним очікуванням; спектральна щільність його близька до постійної величини в деякій смузі пропускання $[0; \omega_z]$ об'єкта.

Визначити за такою перехідною характеристикою коефіцієнти диференціального рівняння можливо лише після відповідного оброблення, що полягає у виділенні з функції $z(t)$, названої далі експериментальною перехідною функцією, істинного значення $h(t)$.

Така задача виникає при створенні систем автоматичного керування з автоматичним налаштуванням параметрів, у загальному випадку, ПД-регуляторів, які реалізовані на сучасних мікроконтролерах. Зважаючи на обмежений об'єм пам'яті таких технічних засобів, актуальною науковою задачею є вибір оптимального для конкретного мікроконтролера фільтра ефективного подавлення шумів, які присутні у вихідних даних, що підлягають подальшому обробленню.

Огляд літературних джерел

На теперішній час в інженерній практиці застосовуються цілий ряд алгоритмів фільтрації експериментальних даних. Найбільш поширеним методом згладжування, є метод ковзного середнього (рухомого вікна) [1], суть якого в тому, що в рухомому уздовж всієї кривої вікні, що містить кілька вихідних точок, середня точка обчислюється як середнє арифметичне усіх точок, що входять в це вікно. І чим більший розмір вікна, тим сильніше відбувається згладжування сигналу.

Така процедура корисна, якщо початково обрана надлишкова частота збору даних. Надлишкова частота не покращує точність аналізу, проте час обробки даних і вимоги до використовуваної пам'яті зростають.

Замість простого середнього можна використовувати зважене середнє. Зважування здійснюється з використанням різних вікон: трикутне, Ханна, Хеммінга, Гаусса, Кайзера та інші [2].

До групи методів ковзного зваженого середнього можна віднести і методи експоненціального згладжування [3]. Однак, на відміну від ковзного середнього, де в усередненні беруть участь декілька останніх значень (точки, які входять у вікно), для процедури експоненціального згладжування середнє розраховується з врахуванням всіх наявних даних. При цьому вклад пізніших значень зменшується за експоненціальним законом. Метод простий у реалізації, що зумовило широке його застосування, проте він має певні недоліки, оскільки процедура вибору параметра згладжування носить суб'єктивний характер і при зміні ситуації може вимагати переналаштування. Крім того, при наявності монотонних тенденцій цей метод дає систематичну помилку.

Савицький і Голей [4] запропонували спосіб фільтрації шумів, заснований на методи

найменших квадратів (МНК), який, незважаючи на складність моделі, простий при реалізації.

Медіанний фільтр [5,6] є альтернативою лінійним фільтрам для випадку змішаних (гаусових адитивних і імпульсних) завад. Перевага медіанного фільтра в тому, що він є найкращим з нелінійних фільтрів для подолання імпульсних та змішаних шумів. При відсутності шумів він практично без спотворень пропускає сигнали типу «різкий перепад», «ломана», «нахилений перепад» тощо, а при наявності шумів мінімально спотворює корисний сигнал у порівнянні з іншими нелінійними фільтрами.

Алгоритм Калмана - послідовний рекурсивний фільтр [7], що використовує модель динамічної системи для отримання оцінки, яка може бути істотно відкоригована в результаті аналізу кожної нової вибірки вимірювань як часової послідовності.

Цей алгоритм знаходить застосування в управлінні багатьма складними динамічними системами, наприклад, безперервними виробничими процесами.

Дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) є базовим алгоритмом цифрової обробки сигналів у частотній області [8]. Завдяки публікації в 1965 році статті Кулі (Cooley) і Тьюкі (Tukey) з практичним алгоритмом швидкого обчислення,

що зумовило широке його використання для цілей цифрової фільтрації та спектрально-кореляційного аналізу сигналів.

Перетворення Фур'є має суттєвий недолік, який проявляється в різкому розширенні Фур'є-спектра при появі таких особливостей сигналу, як, наприклад, стрибок базової лінії. Це сильно ускладнює конструювання фільтрів, які ґрунтуються на Фур'є-спектрі.

Вейвлет-перетворення за своїми принципами подібне до перетворення Фур'є, але як базисні використовуються, як правило, функція Гауса та її похідні, а не синуси і косинуси. При вейвлет-аналізі сигнал розкладається на апроксимуючі коефіцієнти, що представляють згладжений сигнал. Інформація про шумовий компонент в основному міститься в таких коефіцієнтах, тому зазвичай саме вони обробляються при очищенні сигналу від шумів. Для фільтрації сигналу від шуму використовують наступні типи вейвлетів: вейвлет Хаара, дискретний вейвлет Мейєра, вейвлети Добеші і Сімлета [9].

Таке розкладання підходить для окремо розташованих піків і не особливо добре згладжує піки, які частково взаємно перекриваються. Для ефективного застосування вейвлет-перетворення необхідно мати апріорну інформацію про положення базової лінії і очікувану ширину піків.



Рисунок 1-Типові алгоритми згладжування експериментальних даних

Адаптивна обробка сигналів використовується тоді, коли з поставленим завданням не можуть впоратися фільтри з фіксованими параметрами. Це відбувається, як правило, у випадках, коли умови фільтрації невідомі або змінюються, а тому вимоги до параметрів фільтра не можуть бути сформульовані заздалегідь.

Адаптивні алгоритми фільтрації базуються на відомих підходах Колмогорова-Вінера [10, 11] і

відноситься до нелінійних алгоритмів. Опис основних різновидів адаптивних алгоритмів, які існують на сьогодні, можна знайти, наприклад, в [12-14]. Прообразами більшості адаптивних алгоритмів служать алгоритм Ньютона, алгоритм найшвидшого спуску і алгоритм за критерієм найменших квадратів. До простих належать різновиди градієнтних адаптивних алгоритмів за критерієм найменшого квадрата (Least Mean Square, LMS), та його

нормалізованої версії (Normalized LMS, NLMS), а до складних - різновиди рекурсивних алгоритмів за критерієм найменших квадратів (Recursive Least Squares, RLS).

Алгоритми фільтрації Калмана, Фур'є- і вейвлет-фільтри, а також адаптивні фільтри є достатньо складними у обчислювальному сенсі та вимагають значних ресурсів пам'яті, окрім *on-line* алгоритмів, тому їх застосування доцільне у випадках, коли інші прості алгоритми згладжування не справляються з поставленими задачами.

На рівні локальної автоматики доцільно застосовувати прості інженерні методи згладжування перехідних функцій (рис.1). Проте всі перераховані методи згладжування можна застосовувати, якщо відомо, що $h(t)$ має неколивний характер, тобто функція передачі об'єкта має тільки дійсні полюси.

Постановка задачі дослідження

З появою нового покоління багатоядерних 32-розрядних мікроконтролерів (наприклад, на базі *Arm Cortex*), які є базою сучасних промислових контролерів (PLC) та PID-контролерів, появилась можливість, крім традиційних алгоритмів керування та регулювання, реалізовувати складні алгоритми адаптивного та оптимального керування на рівні локальної автоматики. Цьому сприяє потужний арсенал обчислювальних можливостей мікроконтролерів, зокрема, арифметика з плаваючою комою, матрична математика та операції з комплексними числами, а також потужні бібліотеки математичної обробки (наприклад, бібліотека DSP). Важливим фактором вибору та застосування PLC в промисловості є наявність алгоритмів адаптивного налаштування регуляторів безпосередньо на об'єкті. Одним з етапів цього процесу є ідентифікація об'єкта, яку складно якісно виконати без попередньої обробки інформації. Тому в умовах обмежених ресурсів пам'яті контролерів важливо правильно підібрати прості і ефективні алгоритми згладжування даних експерименту.

Таким чином, можна сформулювати наступні задачі досліджень: провести аналіз простих інженерних методів *on-line* та *off-line* згладжування експериментальних даних; спланувати обчислювальний експеримент та підібрати параметри оцінки якості

згладжування; виконати аналіз проведених досліджень і дати рекомендації щодо ефективності застосування алгоритмів при обробці даних.

Аналіз методів фільтрації при обробленні експериментальних даних

Принципово можливий такий спосіб знаходження перехідної функції $h(t)$. Для цього необхідно отримати g експериментальних перехідних функцій $z_k(t)$, $k = \overline{1, g}$ і знайти оцінку математичного очікування за множиною значень g . Так як сигнал $n(t)$ стаціонарний і його математичне сподівання дорівнює нулю, то при досить великому g будемо мати

$$M[z(t)] = h(t) \quad \text{або} \quad h(t) \approx \frac{1}{g} \sum_{k=1}^g z_k(t).$$

Для отримання достатньо достовірних результатів число експериментальних перехідних функцій g має бути не менше $40 \div 60$, що є досить обтяжливою умовою при дослідженні динамічних характеристик реальних промислових об'єктів. Тому значний інтерес представляють інженерні методи згладжування експериментальної перехідної функції, заданої таблицею рівновіддалених один від одного значень $z(t_i) = z_i$, де $t_i - t_{i-1} = \Delta t = \text{const}$, $i = \overline{0, N}$. На практиці число ординат $z(t_i)$ невелике - $N \leq 30 - 100$.

Суть різних способів згладжування зводиться до заміни фактичних рівнів часового ряду розрахунковими, що володіють меншою флуктуацією, і дають змогу виявити тенденції розвитку динамічного процесу. Іноді згладжування застосовують як попередній етап перед використанням інших методів виділення такої тенденції.

Експоненціальне згладжування (EMA) - один з найпростіших засобів вирівнювання послідовностей. В його основі лежить розрахунок експоненціальних середніх за таким різницеvim рівнянням [3]:

$$\hat{h}(t_i) = (1 - \alpha) \hat{h}(t_{i-1}) + \alpha z(t_i), \quad (1)$$

де α - постійний коефіцієнт ($0 \leq \alpha \leq 1$), який носить назву - постійна згладжування. Його

можна знайти через задане вікно w усереднення

$$\alpha = \frac{2}{w+1}.$$

Практика показує, що α слід вибирати в межах від 0,01 до 0,3. Перше значення експоненціального змінного середнього, приймається рівним першому значенню вихідної функції.

Експоненціальне ковзне середнє можна застосовувати повторно

$$\hat{h}_i^{(q)} = \alpha \hat{h}_i^{(q-1)} + (1-\alpha) \hat{h}_{i-1}^{(q)}, \quad (2)$$

де $\hat{h}_i^{(q)}, \hat{h}_{i-1}^{(q)}$ – значення експоненціального змінного середнього q -го порядку в точці i та $i-1$; $\hat{h}_i^{(q-1)}$ – значення експоненціального змінного середнього $(q-1)$ -го порядку в точці i .

Подальшим розвитком експоненціального згладжування є адаптивний алгоритм (АМА) Перрі Кауфмана [15], який є похідною від класичної формули (1) зі змінним коефіцієнтом α .

Суть методу в поєднанні швидкого ковзного середнього для врахування швидких змін сигналу (розраховується на вузькому вікні) та трендового - повільного (розраховується на широкому вікні). Причому конкретне значення ширини вікна визначається автоматично виходячи із значення коефіцієнта ефективності.

При цьому вводять три апертури: $m1$ – для обчислення коефіцієнта ефективності; f – для швидкого ковзного середнього; s – для повільного ковзного середнього.

Коефіцієнт ефективності розраховують на кожному кроці за формулою [15]

$$k_i^{(ef)} = \frac{z_i - z_{i-m1+1}}{\sum_{j=1}^{m1} |z_{i-j-1} - z_{i-j}|}.$$

Для уникнення різких переходів при перемиканнях на інший коефіцієнт ефективності доцільне його усереднення за декілька кроків.

Коригований поточний коефіцієнт згладжування визначають за таким алгоритмом адаптації [15]:

$$\alpha_i^* = \left(k_i^{(ef)} (\alpha^{(f)} - \alpha^{(s)}) + \alpha^{(s)} \right)^2,$$

$$\text{де } \alpha^{(f)} = \frac{2}{f+1} \quad \text{і} \quad \alpha^{(s)} = \frac{2}{s+1} \text{ – постійні}$$

коефіцієнти експоненціального згладжування для швидкого та повільного вікна.

З врахуванням значення α_i^* адаптивний алгоритм експоненціального ковзного середнього (1) набуде такого вигляду:

$$\hat{h}(t_i) = (1 - \alpha_i^*) \hat{h}(t_{i-1}) + \alpha_i^* z(t_i).$$

Медіанний фільтр (ММА) це віконний фільтр, який послідовно ковзає по масиву значень сигналу і повертає на кожному кроці один з елементів, що потрапили у вікно (апертуру) фільтра. Вихідний сигнал y_k змінного медіанного фільтра шириною $w = 2p + 1$ для поточного відліку k формується з вхідного часового ряду $\dots, x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, \dots$ за формулою [5]:

$$y_k = \text{med}(x_{k-p}, x_{k-p+1}, \dots, x_k, \dots, x_{k+p-1}, x_{k+p}) = x_{p+1},$$

де процедура med передбачає ранжування елементів у вікні в порядку зростання їх значень:

$$\tilde{x}_1 \leq x_2 \leq \dots \leq \tilde{x}_{2p+1}; \quad \tilde{x}_1 = \min(x_1, x_2, \dots, x_{2p+1});$$

$$\tilde{x}_{2p+1} = \max(x_1, x_2, \dots, x_{2p+1}).$$

Таким чином, медіанна фільтрація здійснює заміну значень відліків в центрі апертури значенням вихідних відліків у середині вікна фільтра. На практиці апертура фільтра для спрощення алгоритмів обробки даних, як правило, встановлюється з непарним числом точок.

Якщо перехідна характеристика носить лінійний характер (хоча б на вузькій ділянці, наприклад для об'єктів без самовирівнювання), то для згладжування застосовується проста ковзна середня. Спостереження, які використовуються для розрахунку середнього значення, називаються активною ділянкою згладжування (вікно).

Метод простої ковзної середньої (SMA) [1] полягає в тому, що вихідний часовий ряд перетворюється в ряд згладжених значень (оцінок) за формулою:

$$\hat{h}_i = \frac{1}{w} \sum_{j=i-m}^{i+m} z_j, \quad (3)$$

де w - розмір вікна, j - порядковий номер точки у вікні згладжування, m - величина, яка визначається за такою формулою: $m = (w-1)/2$. Очевидно, що розмір вікна w доцільно вибирати непарним числом. Оскільки згладжування іноді необхідно проводити в режимі реального часу, то ковзне середнє розраховується не для середньої точки вікна, а для останньої, тому (3) прийме вигляд

$$\hat{h}_i = \frac{1}{w} \sum_{j=i-w}^i z_j.$$

Для спрощення обчислень доцільно [1] застосувати рекурентну формулу в такому вигляді:

$$\hat{h}_i = \hat{h}_{i-1} + \frac{1}{w}(z_i - z_{i-w}).$$

де \hat{h}_{i-1} - попереднє значення простого ковзного середнього.

У тому випадку, коли динамічна характеристика містить істотно нелінійний характер згладжування часового ряду часто проводиться за допомогою зваженої ковзної середньої. Особливо зручно застосовувати подібне згладжування в тому випадку, коли для аналізу бажано зберегти невеликі «вигини» ряду. Загальна формула згладжування зваженої ковзної середньої для режиму *off-line* має вигляд

$$\hat{h}_i = \left(\sum_{j=i-m}^{i+m} w_{g,j} \right)^{-1} \sum_{j=i-m}^{i+m} w_{g,j} z_j,$$

де $w_{g,j}$ - зважені вагові коефіцієнти. Сума зважених вагових коефіцієнтів $w_{g,j}$ рівна одиниці.

Часто для зважування коефіцієнтів застосовують правило: вага кожного члена вихідної функції, починаючи з меншого, дорівнює відповідному члену арифметичній прогресії. Цей спосіб отримав назву лінійного зваженого ковзного середнього [2] (LWMA). Для арифметичної прогресії з початковим значенням i кроком, рівним 1, формула обчислення ковзної середньої в режимі *on-line* набуде вигляду

$$\hat{h}_i = \frac{2}{w(w+1)} \sum_{j=0}^{w-1} (w-j) z_{i-j}.$$

Очевидно, що будь-яка гладка функція при довільних припущеннях може бути локально представлена поліномом з досить високим ступенем точності. Насправді, немає необхідності підбирати поліноми кожен раз. Можна показати, що ця процедура еквівалентна лінійної комбінації спостережень з коефіцієнтами, які можуть бути визначені раз і назавжди.

Допустимо, наприклад, що ми хочемо підбирати поліном k порядку для групи експериментальних даних z_i з шириною вікна p у дискретні моменти часу $i = -m, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, m$. Коефіцієнти полінома визначаються методом найменших квадратів (метод назвали RWMA - алгоритм Савицького-Голея) [4] мінімізацією критерію наближення

$$\min : \sum_{i=-m}^m \left(z_i - \sum_{r=0}^k a_r i^r \right)^2, \quad (4)$$

який подамо у матрично-векторній формі

$$\min : (\bar{z} - M\bar{a})^T (\bar{z} - M\bar{a}),$$

$$\text{де } \bar{z} = \begin{bmatrix} z_{-m} \\ z_{-m+1} \\ \dots \\ z_{-1} \\ z_0 \\ z_1 \\ \dots \\ z_{m-1} \\ z_m \end{bmatrix}, \bar{a} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_k \end{bmatrix},$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -m & (-m)^2 & \dots & (-m)^k \\ 1 & -m+1 & (-m+1)^2 & \dots & (-m+1)^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & -1 & (-1)^2 & \dots & (-1)^k \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & m-1 & (m-1)^2 & \dots & (m-1)^k \\ 1 & m & m^2 & \dots & m^k \end{bmatrix}.$$

Після розкриття дужок і приведення подібних членів, останній вираз набуде такого вигляду:

$$\min : \left(\bar{z}^T \bar{z} - 2(M\bar{a})^T \bar{z} + \bar{a}^T M^T M \bar{a} \right)^T. \quad (5)$$

Мінімізація виразу (5) за вектор-змінною \bar{a} дає такий результат: $M^T M \bar{a} = M^T \bar{z}$.

У тому випадку, коли існує матриця обернена до матриці $M^T M$ значення \bar{a} можна виразити у явному вигляді

$$\bar{a} = (M^T M)^{-1} M^T \bar{z}. \quad (6)$$

В результаті із виразу (6) отримуємо коефіцієнти $a_r, r = 0, k$ для апроксимуючих поліномів різної степені та різної ширини ковзного вікна p .

В табл.1. приведені коефіцієнти (ваги) при згладжуванні поліномами другого та третього порядку з різною довжиною вибірки та активною ділянкою в центрі вікна.

При довжині вікна $p=7$ згладжування здійснюється за формулою

$$\hat{h}_i = \frac{1}{21} \begin{pmatrix} -2z_{i-3} + 3z_{i-2} + 6z_{i-1} + \\ +7z_i + 6z_{i+1} + 3z_{i+2} - 2z_{i+3} \end{pmatrix}.$$

У випадку поточного згладжування активна ділянка знаходиться справа від вікна (*on-line* режим) і коефіцієнти для полінома другого порядку подані в табл.2.

Як впливає з алгоритмів обробки ковзним середнім перші і останні m точок втрачаються. Для компенсації затримки в обробці сигналу

можна використати технологію змінного розміру вікна [17], суть якого у відновленні втрачених даних перехідної характеристики за формулою:

• для початкової ділянки

$$\hat{h}_d = \frac{1}{2d-1} \sum_{i=1}^{2d-1} z_i;$$

• для кінцевої ділянки

$$\hat{h}_{N-d+1} = \frac{1}{2d-1} \sum_{i=1}^{2d-1} z_{N-i+1},$$

де $d = 1, m-1$.

Для кращого згладжування вказаних ділянок можна застосувати також такий підхід:

1. Два перших та два останніх значення згладженої перехідної функції знаходимо з наступних виразів:

$$\hat{h}_0 = z_0 - \frac{1}{5} (z_0 - 3z_1 + 3z_2 - z_3) + \frac{1}{12} (z_0 - 4z_1 + 6z_2 - 4z_3 + z_4);$$

Таблиця 1- Ваги для підрахунку ковзного середнього підбором поліномів другого та третього порядку з активним елементом у центрі вікна

Довжина інтервалу згладжування p	Вагові коефіцієнти $a_r, r = \overline{0, k}$ для елементів симетричного вікна
5	$[-3, +12, +17] \cdot 1/35$
7	$[-2, +3, +6, +7] \cdot 1/21$
9	$[-21, +14, +39, +54, +59] \cdot 1/231$
11	$[-36, +9, +44, +69, +84, +89] \cdot 1/429$
13	$[-11, 0, +9, +16, +21, +24, +25] \cdot 1/143$

Таблиця 2 - Ваги для підрахунку ковзного середнього підбором поліномів другого порядку з активним елементом справа вікна

Довжина інтервалу згладжування p	Вагові коефіцієнти $a_r, r = \overline{0, k}$ для елементів не симетричного вікна
5	$[+3, -5, -3, +9, +31] \cdot 1/35$
7	$[+5, -3, -6, -4, +3, +15, +32] \cdot 1/42$
9	$[+21, -3, -17, -21, -15, +1, +27, +63, +109] \cdot 1/165$
11	$[+18, +2, -9, -15, -16, -12, -3, +11, +30, +54, +83] \cdot 1/143$
13	$[+11, +3, -3, -7, -9, -9, -7, -3, +3, +11, +21, +33, +47] \cdot 1/91$

$$\begin{aligned} \hat{h}_1 &= z_1 - \frac{2}{5}(z_0 - 3z_1 + 3z_2 - z_3) - \\ & - \frac{1}{7}(z_0 - 4z_1 + 6z_2 - 4z_3 + z_4); \\ \hat{h}_{N-1} &= z_{N-1} - \frac{2}{5}(z_{N-3} - 3z_{N-2} + 3z_{N-1} - z_N) - \\ & - \frac{1}{7}(z_{N-4} - 4z_{N-3} + 6z_{N-2} - 4z_{N-1} + z_N); \\ \hat{h}_N &= z_N + \frac{1}{5}(z_{N-3} - 3z_{N-2} + 3z_{N-1} - z_N) + \\ & + \frac{1}{12}(z_{N-4} - 4z_{N-3} + 6z_{N-2} - 4z_{N-1} + z_N). \end{aligned}$$

2. Інші члени ряду включно до m , як справа та і зліва послідовності, визначаємо з використанням технології динамічного вікна середнього ковзного або зваженого ковзного з шириною вікна $w=5$.

Численними дослідженнями свідчать, що чим вища ступінь полінома і коротший відрізок ковзання, тим ближче розрахункові значення до первинних даних. При цьому, крім тенденції можуть відтворюватися і випадкові коливання, які порушують її сенс. І навпаки, чим нижче ступінь полінома і чим довший відрізок ковзання, тим більш гладкою є перехідна характеристика і тим в більшій мірі вона відповідає властивостям тенденції, хоча помилка апроксимації буде при цьому вищою. Зважування коефіцієнтів для різних алгоритмів зваженого ковзного середнього представлені на рис.2.

Постановка імітаційного експерименту та параметри оцінювання фільтрації

Для тестування ефективності роботи алгоритмів згладжування при обробленні розгінних характеристик об'єктів керування в середовищі MatLab розроблено імітаційну модель об'єкта першого порядку з генеруванням шумів на вході та виході. Фрагмент програми наведений нижче.

```
% ===== МОДЕЛЬ =====
K0=1.0; T1=180;tau0=120;
wk1=idtf([K0],[T1 1],'inputdelay',tau0);
% ++++++Керувальна дія ++++++
m1=9*T1+tau0;% Прогнозована довжина масиву
Tc=1; % Час дискретизації
m=ceil(m1/Tc) % Довжина масиву
u0=10; % Приріст керувальної дії
dz=[-1 1]; % Дисперсія сигналу перешкоди
```

```
%-----Шуми на вході і виході-----
x = u0+idinput(m,'rgs', dz)+idinput(m,'rbs',dz) ;
u = iddata([],x,1);
e=idinput(m,'rgs', 0.5*dz);
opt2 = simOptions('AddNoise',true,'NoiseData',e);
% ++++++ СИМУЛЯЦІЯ ++++++
z= sim(wk1,u,opt2);
Для зашумлення перехідної характеристики
застосовані два види сигналів: 'rbs'- випадковий
бінарний сигнал; 'rgs' - випадковий гаусовий
сигнал. Значення дисперсій випадкового
сигналу були такими:  $d_z = [0,333; 0,667; 1]$ .
Довжина експериментальної вибірки
 $N = T_e/T_c$ , де  $T_e$  – час експерименту
(тривалість перехідного процесу),  $T_c$  – час
дискретизації. Для on-line фільтрації (робота в
такті робочого циклу PLC) можна прийняти
 $T_c = 1 c$ , а для off-line фільтрації (усічена
вбірка)  $T_c = 20 c$ . Параметр  $T_c$  залежить від
інерційності об'єкта. Експерименти
проводилися серіями по  $K$ -реалізацій для
кожного алгоритму і заданого розміру вікна.
Для оцінки якості процесу згладжування в
наукових публікаціях [16] запропоновані різні
критерії, з яких будемо застосовувати такі.
```

1. $M_c(i)$ – середнє відхилення за ансамблем експериментів. Відхилення $M_c(i)$ від нуля характеризує систематичну похибку згладжування. Систематична (методична) похибка - це міра зміщенням згладженого значення за рахунок властивостей методу. Її не можна виключити, так як форма сигналу задалегідь невідома. Вона повинна враховуватися в сумарні похибки оцінки згладженого значення.

$$M_c(i) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (\hat{h}(i, j) - h(i)), i = \overline{1, N}, (7)$$

де $h(i)$ – істинне значення незашумленої перехідної характеристики в i -й точці; $\hat{h}(i, j)$ – значення зашумленого сигналу в i -й точці j -го експерименту після застосування процедури згладжування; N - загальне число точок; K - число експериментів в ансамблі.

2. S_r - стандартне відхилення, розраховане за K згладженими експериментальними вибірками. S_r є характеристикою випадкової похибки згладжування :

$$S_r(i) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (\hat{h}(i, j) - h(i) - M_c(i))^2}, \quad (8)$$

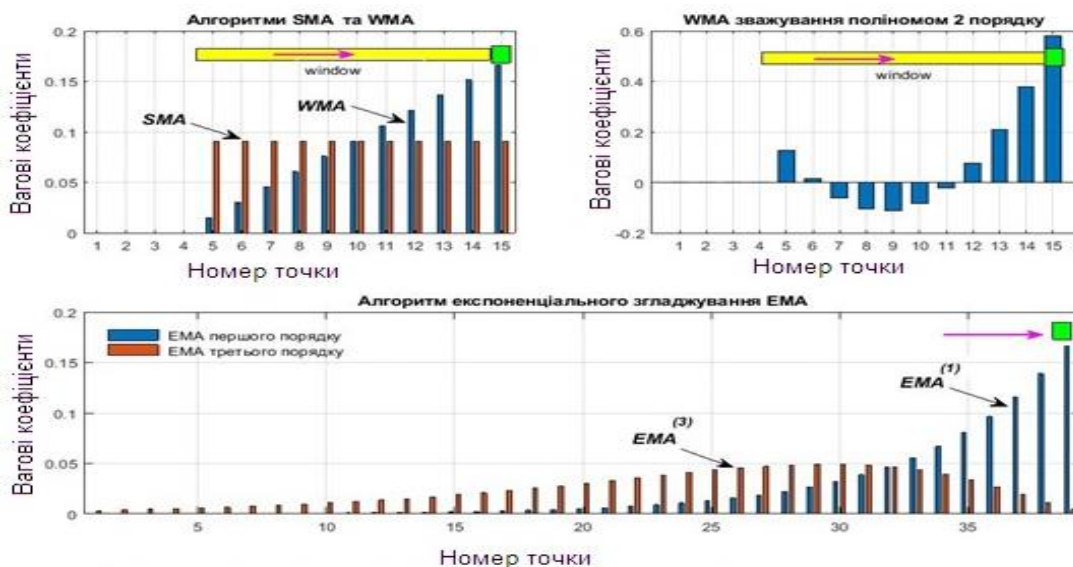
$i = \overline{1, N}$.

3. R - відношення S_r/S_t , яке характеризує випадкову похибку у відсотках

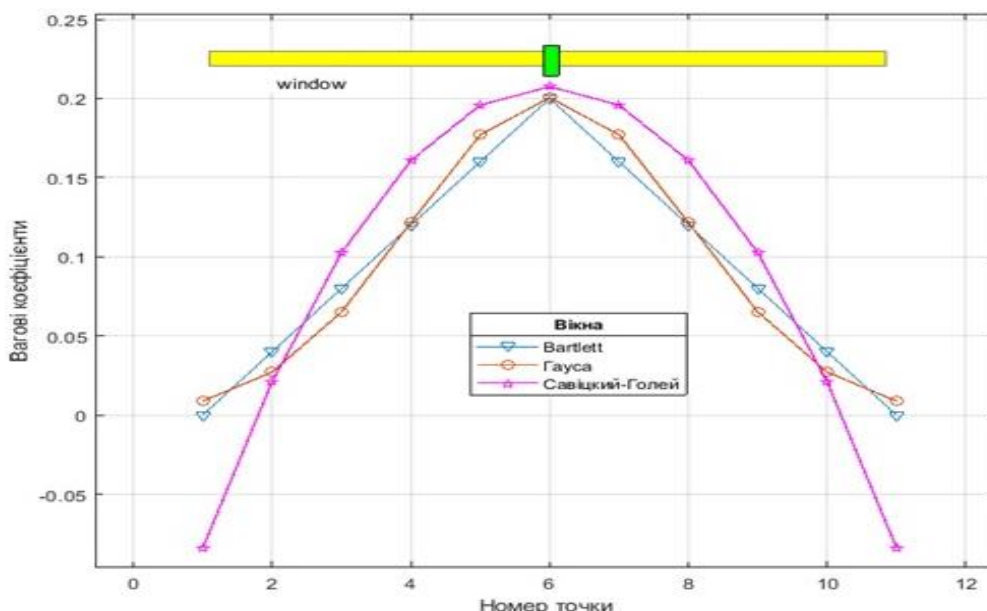
$$R(i) = \frac{S_r(i)}{S_t(i)} \cdot 100\%, \quad i = \overline{1, N}. \quad (9)$$

де $S_t(i)$ - середнє стандартне квадратичне відхилення сигналу від нуля

$$S_t(i) = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (\hat{h}(i, j) - h(i))^2}, \quad i = \overline{1, N}.$$



а) алгоритми придатні для *on-line* згладжування



б) алгоритми придатні для *off-line* згладжування

Рисунок 2 - Різні технології зважування коефіцієнтів для ковзного середнього ($window=11$)

Відношення (9) дає змогу оцінити величину систематичного відхилення в остаточному результаті згладжування: чим менші значення $S_r(i)$ і $S_i(i)$, тим якісніше згладжування у відповідній точці вибірки. Для методів, заснованих на ковзному середньому, параметр $M_c(i)$, характеризується нескінченно великою статистикою, яку можна отримати, застосувавши відповідний фільтр до сигналу без шумів $h(i)$ з наступним відніманням сигналу $\hat{h}(t)$ з виходу фільтра.

Наведені тренди дають змогу виконувати візуальний і кількісний аналіз результатів згладжування.

Для інтегральної оцінки вибрані такі показники.

1. *BNR (baseline noise reduction)* - величина, що дорівнює відношенню стандартного середньоквадратичного відхилення шуму на вході S_n до шуму згладжених даних S_i :

$$BNR = \frac{S_n}{S_i}. \quad (10)$$

2. *MC* – інтегральна середня оцінка зміщення при фільтрації

$$MC = \frac{\sum_{i=1}^N M_c(i)}{Nh_\infty(t)} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де N – число експериментальних точок.

3. Відсоток випадкової похибки

$$RC = \frac{S_r}{S_i} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Для оцінки стандартного відхилення на основі незміщеної оцінки дисперсії використано відому формулу

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^2},$$

де $\hat{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$; $X_i = \hat{h}(i) - h(i) - M_c(i)$.

При розрахунку значень S_n і S_r , та параметр X_i відповідно рівний - $X_i = z(i) - h(i)$;

$$X_i = \hat{h}(i) - h(i).$$

Оцінку обчислювальної складності алгоритмів можна здійснити шляхом поопераційного підрахунку, але в даному випадку запропонована інша процедура. Для кожного методу фіксується час виконання алгоритму за допомогою MatLab - функцій керування таймером *tic (пуск таймера)* та *toc (контроль таймера)*. Тобто $tv_i = tv_{si} - tv_{pi}$, де tv_i - час виконання i - алгоритму; tv_{si} , tv_{pi} – відповідно час закінчення та початку роботи алгоритму.

Відносне значення параметра TV_i розраховували за такою формулою:

$$TV_i = \frac{tv_i}{\max : tv_i} \cdot 100\%, \quad i = \overline{1, df}, \quad \text{де } df \text{ - кількість}$$

досліджуваних алгоритмів.

Таким чином, алгоритмічна структура проведення досліджень була такою:

$$IN \langle T_c, dz, N, K \rangle \Rightarrow \langle z(i, j), method, w \rangle \Rightarrow \langle \hat{h}(i, j) \rangle \Rightarrow \langle version, M_c, S_r, S_i, R, BNR, MC, TV \rangle.$$

Дані структуровані в кортежах на кожному етапі досліджень: *sim*- симуляція серій перехідних характеристик; *filter*– згладжування вхідних даних заданим методом і розміром вікна; *control* – оцінка якості згладжування набором вибраних показників для *version* досліджу, яка визначається рівнем заданих шумів dz . На останньому етап *control* спочатку відбувається локальне усереднення за серіями, а потім визначають інтегральні показники за вибіркою.

Для реалізації розглянутих алгоритмів згладжування в середовищі Matlab є стандартні функції, які можна застосувати для оброблення даних:

$y = filter(b, a, x)$ - цифровий фільтр;

$y = medfilt1(x, p)$ -медіанний фільтр з вікном p .

Цифровий фільтр має раціональну передавальну функцію, яка у формі z -перетворення має такий вигляд:

$$Y(z) = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n_b + 1)z^{-n_b}}{a(1) + a(2)z^{-1} + \dots + a(n_a + 1)z^{-n_a}} X(z),$$

де n_a – порядок фільтра зворотного зв'язку, а n_b – порядок фільтра подачі.

Через нормалізацію допускаємо, що $a(1) = 1$.

Якщо відома функція передачі фільтра, то можна записати різницеve рівняння, яке можна програмно реалізувати на мікроконтролерах

$$y(k) = b(1)x(k) + b(2)x(k-1) + \dots + b(n_b+1)x(k-n_b) - a(2)y(k-1) - \dots - a(n_a+1)y(k-n_a),$$

де $k = 0, 1, 2, \dots$

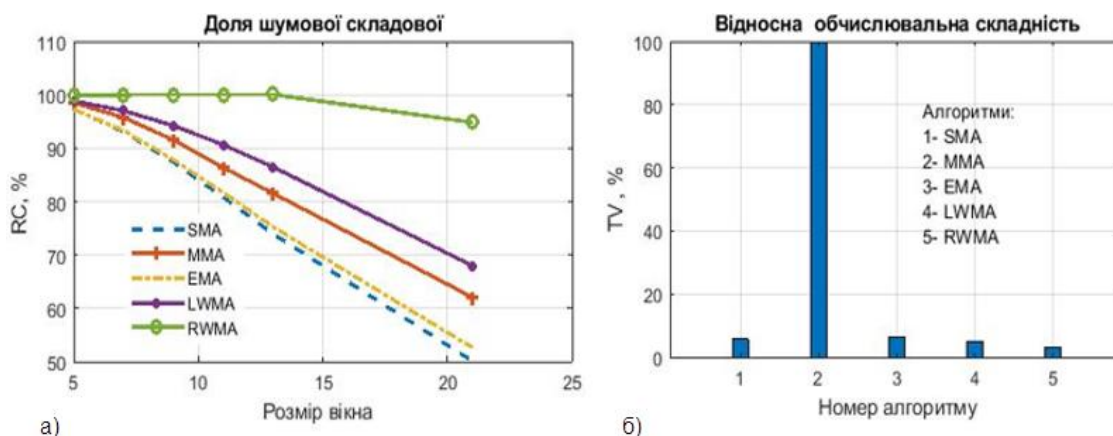


Рисунок 3 - Аналіз методичної похибки *on-line* методів згладжування

При реалізації алгоритмів *SMA*, *LWMA* *RWMA* компоненти вектора \bar{b} - вагові коефіцієнти для елементів ковзного вікна, а вектор $\bar{a} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$. Для алгоритму *EMA* параметри фільтра задають у такий спосіб: $b = [\alpha]$, $a = [1 \ (1-\alpha)]$. Алгоритм *medfilt1()*

розрахований на оброблення даних, коли активний елемент знаходиться у центрі вікна, тому значення виходу необхідно зсунути на край вікна або замість даного алгоритму застосувати безпосередньо MatLab-функцію *median()*.

Аналіз результатів досліджень

Проведення експерименту та аналіз реалізацій по серіях ($K=10;50;100$ дослідів в серії) з використанням критеріїв (7-9) показав, що критерії (8-9) мають приблизно сталі величини вздовж усередненої вибірки за серією, які залежать тільки від параметра K при різних методах згладжування, розмірах вікна та значень дисперсії шуму, тому їх використання надалі є недоцільним. Це свідчить про те, що в процесі обробки даних алгоритмами не вносяться додаткові зсуви окрім систематичної похибки методу, яка контролюється параметром MC . Проаналізуємо цей параметр детальніше. Методична похибка при згладжуванні в реальному часі є природною, оскільки

фільтрація ґрунтується на використанні ковзного несиметричного вікна. Критерієм оцінки служить абсолютне (або абсолютне зважене до величини нового усталеного значення) відхилення від базової лінії.

При пропусканні сигналу через фільтр можна знайти відхилення вихідного сигналу від базової лінії (перехідна характеристика без накладання перешкод). Ця величина характеризує методичну похибку MC , яку вносить фільтр при обробленні сигналу. Значення похибки MC у кожній точці масиву даних вхідного сигналу показані на рис. 3,а.

Як видно з рис.3,а в точці відриву від попереднього усталеного значення, де формується різкий перехід, згладжений сигнал відстає від базової лінії і при цьому формується методична похибка MC . Для врахування динаміки зміни MC доцільно контролювати максимальне його значення, а не середнє за вибіркою. Найменші значення MC притаманні для фільтра *RWMA*. Максимальне відхилення MC залежить від розмірів вікна та часу квантування вхідного сигнал T_c (рис.3,б і 3,в). Якщо задати приведену абсолютною похибку фільтрації, наприклад, на рівні 2.5% (за умовами експерименту $h_{\infty}(t) = 10$ і відповідно $MC = 0,25$), тоді об'єм вибірки N

треба взяти не менший за 1100-1200 точок, що відповідає часу дискретизації вимірювань

$T_c = 1c$ для модельного об'єкта.

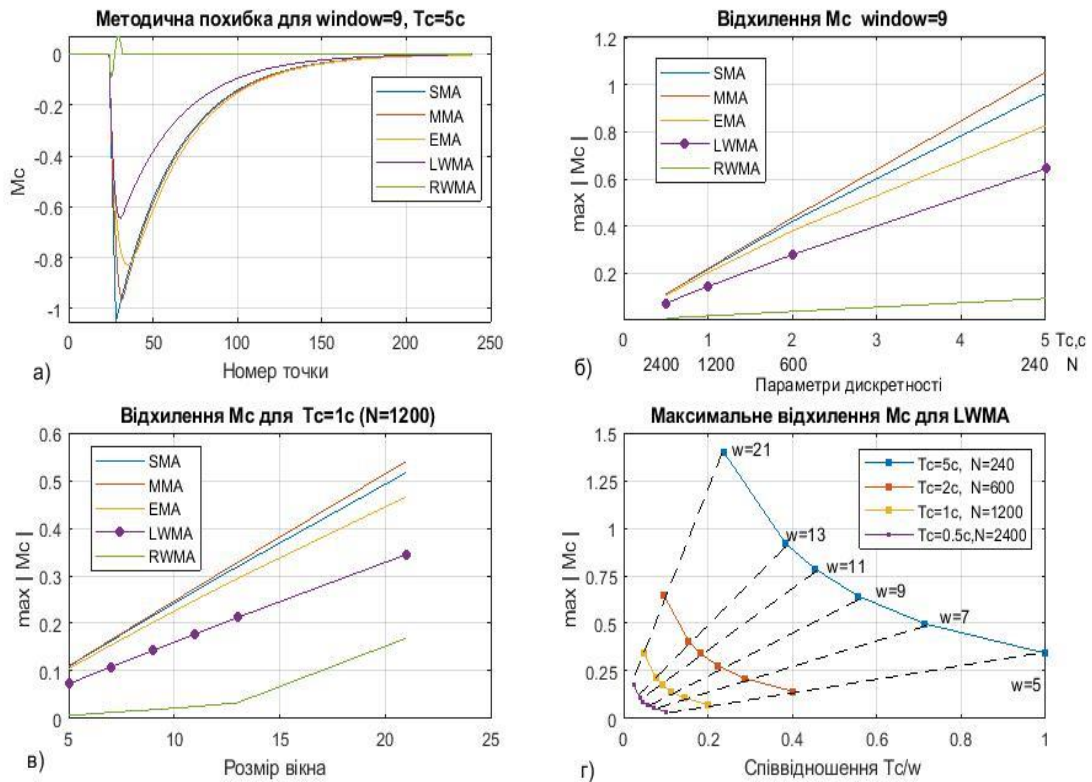


Рисунок 4 - Оцінка алгоритмів згладжування за критеріями RC та TV

Таким чином, для *on-line* режиму згладжування в алгоритмах *SMA*, *MMA*, *EMA* можна застосувати вікно розміром до $w=11$, для *LWMA* – до $w=13$, а для *RWMA*- до $w=21$ і більше (рис.3,г). На рис.3,г застосований, як аргумент відношення T_c/w , що локалізувало графік $\max |MC| = f(T_c, w)$ на площині і спростило його аналіз.

Доля випадкової складової при відхиленні сигналу на виході фільтра від базової лінії (критерій *RC*) подана на рис.4,а. Видно, що шумова складова знижується з ростом розміру вікна згладжування, але ця тенденція супроводжується ростом методичної похибки. Комплексна інтегральна оцінка роботи алгоритмів згладжування забезпечується критеріями *BNR* і *MC*. Значення показників *BNR* і *MC* в залежності від розмірів вікна наведені на рис.5,а та рис.5,б і відповідають трьом серіям дослідів з різними рівнями

дисперсії шуму в досліджуваних розгінних характеристиках модельного об'єкта. Аналіз результатів моделювання при низькому та середньому рівні зашумлення (дослід 1 та 2) свідчить, що найкраще згладження реалізується алгоритмом *LWMA*, оскільки рівень шумів знижується у 2,4 рази при цьому абсолютне відхилення від базової лінії складає відповідно $MC=-0,34\%$ (дослід 1, $w=11$) та $MC=-0,26\%$ (дослід 2, $w=13$), що є прийнятним для практики. Наступними за ефективністю згладжування йдуть алгоритми *SMA* та *EMA*, в яких максимальний параметра $BNR=2,3$, а $MC=-0,36\%$. Непогані фільтруючі властивості демонструє і алгоритм *MMA* з $BNR \approx 2$ та $MC \approx -0,35\%$. Очевидно, що не бажано застосувати алгоритм *RWMA*, оскільки рівень подавлення перешкод (для $w=5-13$) не перевищує 1,34 рази, хоча при цьому має місце низький рівень значення параметра *MC*.

Для досліджу 3 з високим рівнем шумів спостерігається така градація: за показником BNR для вікна $w=13$ - SMA , $EMA-3,1$; $LWMA-2,9$;

$MMA-2,4$; $RWMA-1,38$. При цьому за рахунок систематичної похибки зростає зміщення від базової лінії, але воно не перевищує 0,5%.

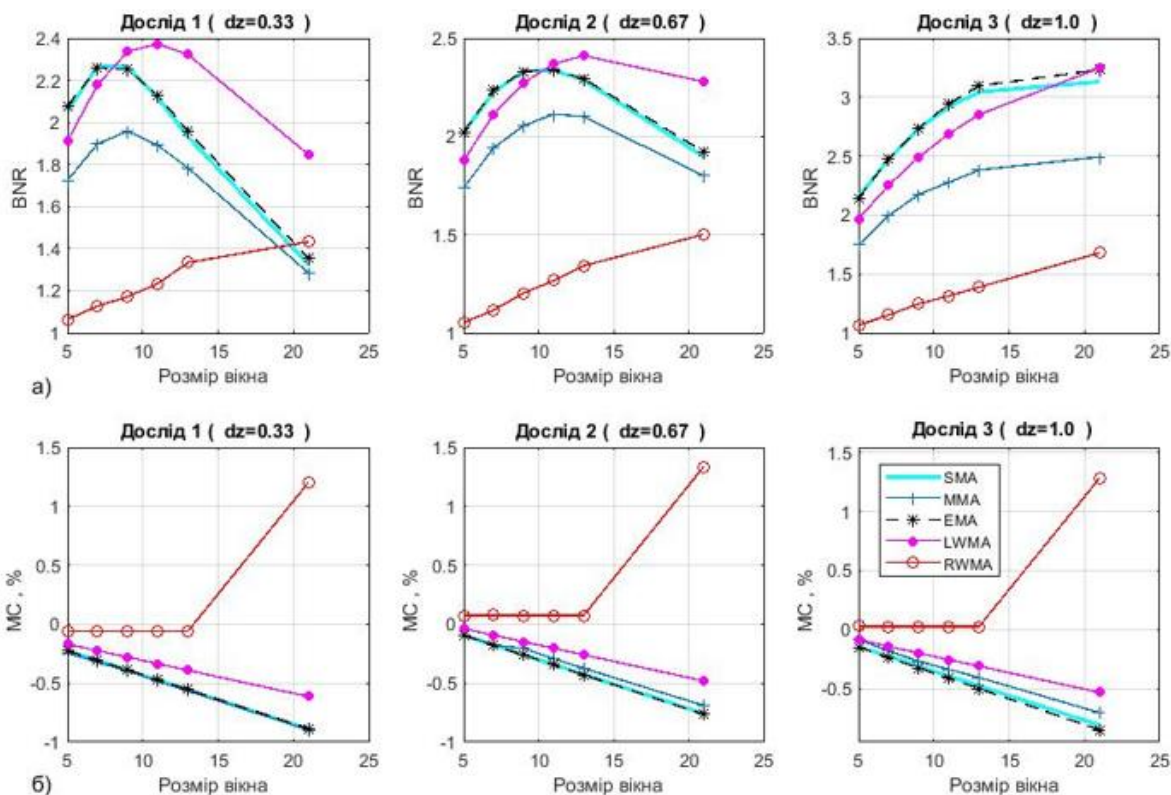


Рисунок 5 - Інтегральні оцінки BNR і MC для трьох дослідів

Якщо оцінювати обчислювальну складність алгоритмів (рис.4,б), то слід відмітити найвищий рівень складності для алгоритму MMA , всі інші алгоритми за відносним показником TV складають від 3% до 6%. Алгоритм медіанної фільтрації (MMA) для елементів вікна передбачає спочатку їх сортування з подальшим відбором середнього елемента, що суттєво ускладнює алгоритм оброблення даних.

Всі інші алгоритми ковзного середнього передбачають процедуру множення елементів вікна на ваговий коефіцієнт з подальшим знаходженням суми. За рахунок початкової підготовки вагових коефіцієнтів швидкодія алгоритмів (SMA , $LWMA$, EMA , $RWMA$) дещо відрізняється між собою, хоча у всіх застосовується базова функція цифрового фільтра $filter()$.

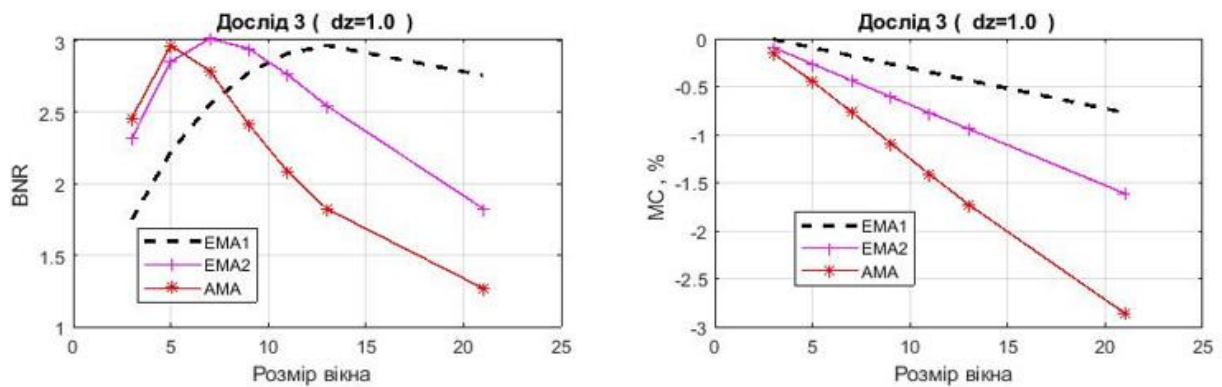


Рисунок 6 - Дослідження модифікацій алгоритму *EMA*

Дослідження, які представлені рис. 6, мали за мету визначення порівняльних характеристик різних модифікацій алгоритму середнього експоненціального згладжування *EMA*: *EMA1*- звичайне згладжування; *EMA2*- згладжування другого порядку; *AMA*- адаптивне згладжування з параметрами $f=2$, $s=w$, $m1=21$. Доцільність використання модифікацій алгоритму

перевірялась на перехідній характеристиці з високим рівнем перешкод. Порівняння за показниками *BNR* та *MC* не підтвердило доцільність їх застосування на модельованих характеристиках динаміки об'єкта, оскільки при $BNR \approx 3$ спостерігається ріст відставання сигналу від базової лінії

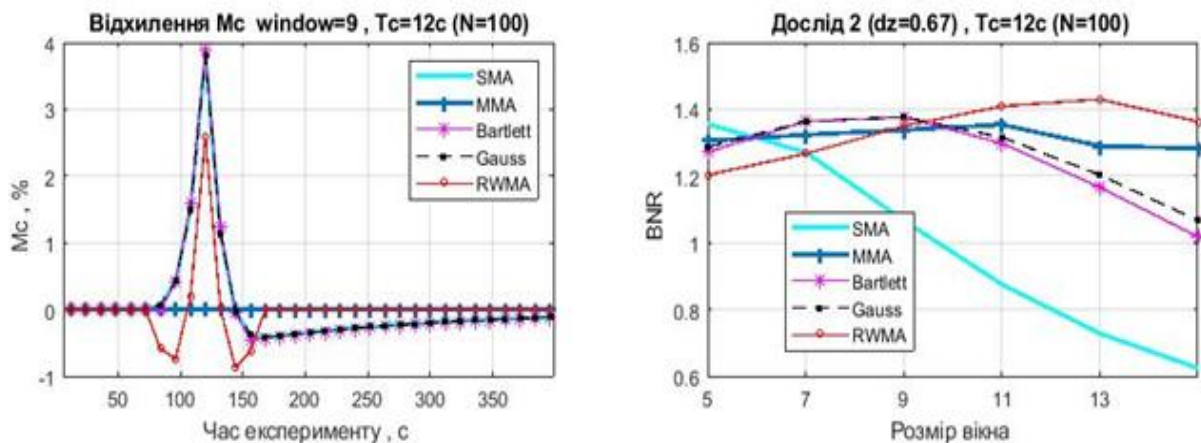


Рисунок 7- Оцінка роботи *off-line* алгоритмів

Оскільки об'єм вибірки, яка фіксується за результатами активного експерименту в контролері обмежена (30-100 точок), виконані дослідження *off-line* алгоритмів на предмет їх ефективності при згладжуванні. Якщо оцінити систематичну похибку M_c при застосуванні розглянутих алгоритмів (рис.7), то слід підкреслити, що всі алгоритми ковзного зваженого середнього (SMA, WMA з вікном 'Bartlett', 'Gauss' та Савіцького-Голея) мають достатньо високу похибку, максимальне

значення якої лежить в межах 2,5 до 4%. У медіанного фільтра відсутня методична похибка, що пов'язано з монотонним зростанням розгінної характеристики. Показник *BNR* для оптимального розміру вікна $w=9$ (для SMA- $w=5$) складає 1,35-1,37.

При зростанні часу квантування (наприклад, $T_c = 24c$) та відповідно зниження довжини експериментальної вибірки до $N=50$ інтегральний показник *BNR* зменшується для всіх фільтрів практично до одиниці, крім *MMA*,

що свідчить про відсутність зниження рівня шумів при згладжуванні.

Таким чином, практичне застосування для *off-line* обробки на обмеженому масиві даних має алгоритм медіанної фільтрації *MMA*.

Висновки

В результаті аналізу ефективності алгоритмів згладжування в режимі реального часу за вибраною системою показників можна зробити наступні висновки.

1. Фільтри *SMA*, *LWMA* та *EMA* забезпечують найкращі показники зниження рівня шумів близько в 2,3-2,4 рази при низькому та середньому рівні перешкод та 2,8-3,0 рази при значному рівні зашумлення, при цьому відносна абсолютна похибка не перевищує 0,35% при розмірах вікна (9-13) та 0,5 % при значному рівні шумів, а обчислювальна складність алгоритмів є одного порядку.

2. Алгоритм *MMA* має показник *BNR* близько 2 (що дещо нижче порівняно з *SMA*, *LWMA*, *EMA*), тому може бути рекомендований до використання, не зважаючи на суттєво вищу його обчислювальну складність майже у 20 разів по відношенню перерахованих вище алгоритмів.

3. Повторне застосування (наприклад *EMA*) фільтрів або їх комбінування з метою підвищення рівня фільтрації малоефективне і при цьому зростає обчислювальна складність вдвоє.

4. Алгоритм фільтрації *RWMA* та адаптивний *EMA* недоцільно застосовувати в режимі реального часу.

Для вторинної *off-line* обробки можна застосувати медіанний фільтр, що дасть змогу додатково знизити рівень шумів до 25% за показником *BNR* без внесення додаткової систематичної похибки.

Таким чином, алгоритми фільтрації *SMA*, *LWMA*, *EMA* та *MMA* слід використовувати при експериментальних дослідженнях динамічних властивостей об'єктів керування і доцільно ввести їх до бібліотеки алгоритмів *PLC*. При значному рівні імпульсних перешкод можна рекомендувати медіанний фільтр *MMA*. Напрямки подальших досліджень можуть бути пов'язані з розробкою рекомендацій по використанню алгоритмів Калмана, Фур'є і вейвлет-перетворення та адаптивних фільтрів

при значному рівні перешкод накладених на розгінну характеристику.

Література

1. Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. San Diego, California: California Technical Publishing. 1999. P. 297.

2. Digital signal processing : a practical approach / Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis. Wokingham, England ; Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1993. 760 p.

3. Brown G. Robert, Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. – N.Y.: Dover Phoenix Editions, 2004. 480 p.

4. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Anal. Chem. 1964. 36 p. 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047.

5. Astola J., Kuosmanen P. Fundamentals of digital filtering. Boca Raton (USA): CRC Press LLC. 1997. 276 p.

6. Нелинейная фильтрация сигналов./С.К.Абрамов, В.И. Кортунов, В.В. Лукин.-Учеб.пособие.- Харьков:Нац.аэрокосм.ун-т «Харьк. авиац.ин-т», 2007. 78 с.

7. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // J. Basic Eng. 1960. 82. P. 35–45. doi:10.1115/1.3662552.

8. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 838с.

9. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.

10. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. Матем. 1941. 5. С. 3–14.

11. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, New York: Wiley, 1949. 176 p.

12. Уидроу Б., Стирнз С.Д. Адаптивная обработка сигналов./Пер. с англ. под ред. Шахгильдяна В.В. М.: Радио и связь, 1989. 440с.

13. Sayed A.H. Fundamentals of adaptive filtering. – NJ, Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2003.- 1168 p

14. Diniz P.S.R. Adaptive filtering algorithms and practical implementation. Third edition. – New

York, Springer Science + Business Media, 2008. 627 p.

15. Perry J. Kaufman Smarter Trading: Improving Performance in Changing Markets — McGraw-Hill, Inc., 1995, 257 p. — ISBN 0-07-034002-1

16. Каламбет Ю.А., Козьмин Ю.П., Самохин А.С. Фильтрация шумов. Сравнительный анализ методов// Аналитика. № 5/2017(36), с. 88-101.

17. Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schaffer, and John R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999. 870 p.

References

1. Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. San Diego, California: California Technical Publishing, 1999. P. 297.

2. Digital signal processing : a practical approach / Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis. Wokingham, England ; Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1993. 760 p.

3. Brown G. Robert, Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series. – N.Y.: Dover Phoenix Editions, 2004. 480 p.

4. Savitzky A., Golay M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Anal. Chem. 1964. 36 p. 1627–1639. doi:10.1021/ac60214a047.

5. Astola J., Kuosmanen P. Fundamentals of digital filtering. Boca Raton (USA): CRC Press LLC, 1997. 276 p.

6. Nelineynaya filtratsiya signalov./ S.K. Abramov, V.I. Kortunov, V.V. Lukin.-

Ucheb. posobie. - Harkov: Nats. aerokosm. un-t «Hark. aviats. in-t», 2007. 78 s.

7. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // J. Basic Eng. 1960. 82. P. 35–45. doi:10.1115/1.3662552.

8. Rabiner L., Gould B. Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov. M.: Mir, 1978. 838s.

9. Malla S. Veyvlyeti v obrabotke signalov. M.: Mir, 2005. 671 s. .

10. Kolmogorov A.N. Interpolirovaniye i ekstrapolirovaniye statsionarnykh sluchaynykh posledovatel'nostey // Izv. AN SSSR. Ser. Matem. 1941. 5. S. 3–14.

11. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series, New York: Wiley, 1949. 176 p.

12. Uidrou B., Stirnz S.D. Adaptivnaya obrabotka signalov./ Per. s angl. pod red. Shahgildyana V.V. M.: Radio i svyaz, 1989. 440s.

13. Sayed A.H. Fundamentals of adaptive filtering. – NJ, Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2003.- 1168 p

14. Diniz P.S.R. Adaptive filtering algorithms and practical implementation. Third edition. – New York, Springer Science + Business Media, 2008. 627 p.

15. Perry J. Kaufman Smarter Trading: Improving Performance in Changing Markets — McGraw-Hill, Inc., 1995, 257 p. — ISBN 0-07-034002-1

16. Kalambet Yu.A., Kozmin Yu.P., Samohin A.C. Filtratsiya shumov. Sravnitel'nyy analiz metodov// Analitika. # 5/2017(36), s. 88-101.

17. Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schaffer, and John R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999. 870 p.

УДК 658.56 : 536.66

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-82-89

ДИВЕРСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПРОВОДІВ В УМОВАХ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА ПРИНЦИПАМИ ЄС

С.О. Максим'юк, О.М. Карнаш

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506611,

e-mail: sergmax@gmail.com

В роботі проведено моделювання мережі газопостачання в середовищі графічного інтерфейсу Matlab – Simulink, що враховує зміну параметрів цієї мережі при переміні якісних характеристик енергоресурсі, а саме – калорійності природного газу. Створена модель показала знижені обсяги споживання природного газу споживачами мережі у випадку покращення якості енергоресурсу. Перехід розрахунків за природний газ з об'ємних до енергетичних одиниць нормативно підтримується міжнародними та державними законодавчими документами, комплексне висвітлення яких наведено в роботі. Такий перехід розрахунків повинен супроводжуватися розробкою системи засобів з визначення питомої теплоти згоряння енергоресурсу в потоковому режимі. В роботі запропоновано використати цю метрологічну систему засобів оцінки якісних показників енергоресурсу для цілей додаткової діагностичної ознаки технічного стану газопроводу. Відстеження діапазонів зміни калорійності природного газу може слугувати підставою для оцінки зміни технічного стану безпосередньо газопроводу. Схема такого зв'язку технічного стану трубопроводу з якісними показниками газу, що по ньому протікає, наведено в цій роботі. Також для підтвердження кореляційного характеру зв'язку між якістю природного газу та технічним станом газопроводу в роботі наведено результати експериментального дослідження можливості визначення дефектів трубопроводу через вимірювання зміни якісних показників енергоресурсу. Результати цього дослідження показують, що для газопроводу з корозійними пошкодженнями характерна значна зміна калорійності природного газу що по ньому протікає (для досліджуваної ділянки «Тустань – Ділієво» вона склала 10 %).

Ключові слова: діагностика технічного стану газопроводу, моделювання газової мережі

В работе проведено моделирование сети газоснабжения в среде графического интерфейса Matlab - Simulink, учитывающий изменение параметров сети при перемене качественных характеристик энергоресурсе, а именно - калорийности природного газа. Созданная модель показала снижены объемы потребления природного газа потребителями сети в случае улучшения качества энергоресурса. Переход расчетов за природный газ с объемных к энергетическим единицам нормативно поддерживается международными и государственными законодательными документами, комплексное освещение которых приведены в работе. Такой переход расчетов должен сопровождаться разработкой системы средств по определению удельной теплоты сгорания энергоресурса в потоковом режиме. В работе предложено использовать эту метрологическую систему средств оценки качественных показателей энергоресурса для целей дополнительной диагностической признака технического состояния газопровода. Отслеживание диапазонов изменения калорийности природного газа может служить основанием для оценки изменения технического состояния непосредственно газопровода. Схема такой связи технического состояния трубопровода с качественными показателями газа, что по нему протекает, приведены в этой работе. Также для подтверждения корреляционного характера связи между качеством природного газа и техническим состоянием газопровода в работе приведены результаты экспериментального исследования возможности определения дефектов трубопровода через измерения изменения качественных показателей энергоресурса. Результаты этого исследования показывают, что для газопровода с коррозионными повреждениями характерна значительная изменение калорийности природного газа что по нему протекает (для исследуемого участка «Тустань - Дилиев» она составила 10%).

Ключевые слова: диагностика технического состояния газопровода, моделирование газовой сети

The simulation of the gas supply network in the environment of the graphical interface Matlab - Simulink is carried out in the work, which takes into account the change of parameters of this network at change of qualitative characteristics of energy resource, namely - calorific value of natural gas. The created model showed reduced volumes of natural gas consumption by network consumers in case of improvement of energy quality. The transition of payments for natural gas from volumetric to energy units is normatively supported by international and state legislative documents, the comprehensive coverage of which is given in the paper. This transition of calculations should be accompanied by the development of a system of tools for determining the specific heat of combustion of energy in the flow mode. In the paper it is offered to use this metrological system of means of an estimation of qualitative indicators of an energy resource for the purposes of an additional diagnostic sign of a technical condition of the gas pipeline. Tracking the ranges of changes in the calorific value of natural gas can serve as a basis for assessing changes in the technical condition of the pipeline itself. A diagram of this connection between the technical condition of the pipeline and the quality of the gas flowing through it is given in this paper. Also, to confirm the correlation between the quality of natural gas and the technical condition of the pipeline, the paper presents the results of an experimental study of the possibility of determining the defects of the pipeline by measuring changes in energy quality. The results of this study show that a gas pipeline with corrosion damage is characterized by a significant change in the calorific value of natural gas flowing through it (for the study area "Tustan - Diliyevo" it was 10%).

Key words: diagnostics of technical condition of gas pipeline, modeling of gas network

Виклад основного матеріалу

За останнє десятиліття енергетичний сектор України зазнав значного стрибку в розвитку до норм та стандартів ЄС. Каталізатором такого стрибку стало членство України в Енергетичному Співтоваристві (ЕнС) з 2011 року. Враховуючи, що метою ЕнС є створення єдиного енергетичного ринку [1], з цього часу почалися інтеграційні процеси реформування українського законодавства, так як спільні ринкові відносини не можливі без врегульованих стандартів та норм.

Цілі ЕнС виконуються через дотримання країнами-члени низки законодавчих документів про енергетичний ринок ЄС, відомих як третій енергетичний пакет. Цей пакет набув чинності у вересні 2009 р. та охоплює наступні п'ять областей [2]:

- відокремлення енергопостачання та виробництва від експлуатації мереж передачі,
- функціонування внутрішнього енергетичного ринку держав з незалежними регуляторами
- Функціонування агентств з питань співпраці енергетичних регуляторів для допомогти різним національним регуляторним органам співпрацювати та забезпечити безперервне функціонування внутрішнього енергетичного ринку
- транскордонне співробітництво для забезпечення оптимального управління мережами ЄС;

- та відкриті та справедливі роздрібні ринки (право вибору або заміни постачальника без додаткової плати, отримання інформації про споживання енергії та швидке та дешево вирішення суперечок).

Виконання цих цілей забезпечується трьома регламентами та двома директивами ЄС:

1. Регламент ЄС №713/2009, що засновує Агентство з питань співробітництва регуляторів у сфері енергетики;

2. Регламент ЄС №714/2009 про умови доступу до мереж трансграничних обмінів електроенергією;

3. Регламент ЄС №715/2009 про умови доступу до мереж транспортування природного газу;

4. Директива 2009/72/ЄС щодо загальних правил для внутрішнього ринку електроенергії;

5. Директива 2009/73/ЄС щодо загальних правил для внутрішнього ринку природного газу.

Ці документи мають різний статус гармонізації країн-учасниць ЄС (у тому числі й країн з асоційованим членством). Директиви потребують процесу імплементації в кожній країні-учасниці ЄС через форми та методи, які країна обирає самостійно керуючись національним законодавством[3]. Тобто для України визначальним є не самі директиви, а акти національного законодавства, що імплемнтують ці директиви. В той же час, на відміну від директив, регламенти не потребують додаткових актів на рівні національного

законодавства, а адресовані усім країнам-учасникам Європейського Союзу, що робить їх дію схожими на національне законодавство.

Імплементация директив третього енергопакету в секторі природного газу на національному рівні законодавства почалася з введенням в дію ДСТУ ISO 15112:2009 «Природний газ. Визначення енергії» та інших нормативних документів (до прикладу Постанови НКРЕ та КМ №2498 від 30.09.2015 р. «Про затвердження типового договору розподілу природного газу» та інш.) і прийняття двох базових Законів України «Про ринок електричної енергії» та «Про ринок природного газу». Вони створили підґрунтя для інтеграції стандартів і норм ЄС в енергетичні ринки України.

В 2019 році в ЄС набув чинності вже наступний енергопакет законодавства «Чиста енергія для всіх європейців». Його ключовими напрямками є: відновлювальна енергетика (досягнути частки у розмірі 32% для ВДЕ в енергетичному міксі ЄС до 2030 року), енергоефективність (посилити енергоефективність щонайменше на 32,5% до 2030 року), клімат (досягнення статусу кліматично-нейтральної Європи до 2050 року, тобто такої, що не впливає на зміну клімату), дизайн ринку електроенергії (адаптованого до нових реалій) та координація дій щодо досягнення цілей Енергетичного союзу [4]. З такою новою енергетичною політикою ЄС два регламенти третього енергопакету переглянуті вже в іншому ракурсі, Директива про електроенергетику (2009/72 / ЄС) залишатиметься чинною лише до кінця 2020 року. Проте для ринків природного газу все ще застосовується третій енергетичний пакет (Директива 2009/73/ЄС). Тому прийнятті Україною законодавчі акти в газовому секторі гармонізованими із сучасною політикою ЄС, а робота в напрямку реформування цього напрямку в нашій країні актуальна.

Згадана вище Директива 2009/73/ЄС [5] передбачає:

- забезпечення права споживачів на отримання інформації про спожиту ними енергію;
- створення умов для забезпечення спільних ринкових умов для спрощення транскордонної торгівлі газом;

- гарантії експлуатаційної сумісності систем вимірювання, врахування використання відповідних стандартів та найкращих практик, а також важливості розвитку спільного ринку газу.

- розгляд природного газу, як енергетичного товару.

Тобто для дієздатності повноцінного українського ринку газу обов'язковою умовою є перегляд сталих методів та способів метрологічної оцінки газу в процесі торгівлі між споживачами та операторами ГТС. Основним напрямком нового такого підходу має стати розгляд природного газу, як енергетичного товару. Тобто не лише оцінювати параметри об'єму цього ресурсу, а й враховувати його якісні показники. Це дасть можливість запровадити на ринку природного газу України розрахунок за спожитий чи переданий газ в енергетичних одиницях.

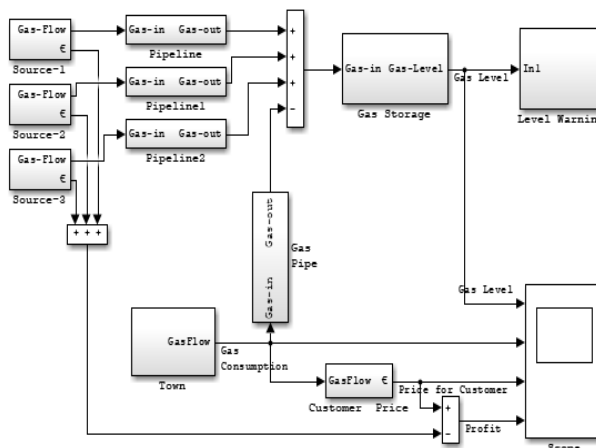
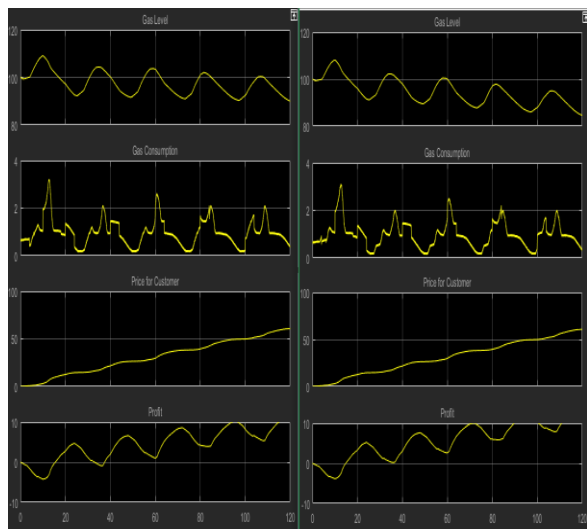


Рисунок 1 – Використана модель мережі газопостачання в середовищі графічного інтерфейсу Matlab – Simulink

Згідно Паспортів фізико-хімічних показників природного газу по областях [6], за 2019 рік максимальне зафіксоване середнє значення калорійності природного газу на території України склало 8386 ккал, мінімальне – 8015 ккал. Різниця між середньозваженими показниками калорійності природного газу за річний період складає 371 ккал, це 4,5 % від середньозваженого показника по Україні. Проведено моделювання роботи газової мережі на основі моделі [7], що включає джерела газу,

газові сховища, трубопроводи та споживачів (рисунок 1).

Модель прораховано для випадку мережі зі звичайними параметрами та випадку, коли якісні показники природного газу (теплотворна здатність газу) знижені на 4,5 %. Отримані результати включають рівень газу у сховищах, споживання клієнта, модель ціноутворення для клієнта та прибуток для оператора мережі (рисунок 2).



а) Результати моделювання мережі зі звичайними якісними показниками природного газу
б) Результати моделювання мережі для випадку зниження якісних показників природного газу на 5 %

Рисунок 2 – Графічні результати моделювання мережі постачання природного газу для двох випадків якісних показників природного газу

Порівнюючи графіки навантаження спостерігається їх ідентичність у двох випадках, так відсутня кореляція між навантаженням споживачів та калорійністю газу. Така ж ситуація спостерігається і для випадку графіку вартості послуг. Це пояснюється тим, що наразі в Україні введено ринок природного газу, проте вартість послуги з постачання природного газу на цьому ринку не залежить від якості продукту. Це викликає підвищення рівня споживання населенням природного газу у випадку зниження якості енергоресурсу. Така ситуація пояснює зміни залежності у двох інших графіках рисунку 2. Підвищення попиту на природний газ для випадку (б) знижує рівень

запасів газу в газосховищах (рисунок 2). Також погіршення якості впливає на ріст прибутку газопостачальних організацій по причині росту об'єму енергоресурсу, що реалізується. Проте, слід зазначити, що використана модель не враховує додаткових витрат оператора мережі газопостачання спричинених погіршенням стану обладнання через вплив газу нижчої якості (до прикладу підвищенням ймовірності корозії трубопроводів через вищий вміст вологи в газу).

В раніше проведеному нами дослідженні [8] виявлено різницю значень теплоти згоряння природного газу між даними газотранспортної та газорозподільчої компаній - в 48,8 % точках виміру значення нижчої теплоти згоряння природного газу від газотранспортної організації перевищує фактичне значення. Тому для переходу розрахунків за природний газ з об'ємних до енергетичних показників доказано потребу у використанні додаткових засобів визначення питомої теплоти згоряння енергоресурсу в потоковому режимі.

Місцями розміщення таких засобів стануть точки розгалуження мережі – ГРП та ГРС, звідки природний газ надходить безпосередньо до споживачів. Система таких засобів створить матрицю нових інформаційних параметрів роботи мережі, а саме – набори значень теплоти згоряння природного газу в потоковому режимі для реперних точок передачі енергоресурсу, де розміщені прилади експрес-контролю якості газу. В попередніх дослідженнях нами запропоновано використовувати ці набори даних безпосередньо для цілей оцінки природного газу, як енергетичного ресурсу в процесі визначення його якості. В цій науковій роботі запропоновано використовувати цей набір якісних показників газу з метою додаткової діагностичної ознаки технічного стану газопроводів.

Діагностика вирішує питання визначення фактичного стану газопроводу та обладнання, що слугує для забезпечення його роботи, що в подальшому супроводжується ремонтом виявлених дефектів з ціллю забезпечення належного функціонування мережі мінімум на 5 років [9, 10]. Затримка діагностики з наступним виконанням ремонтних робіт підвищує ймовірність появи відмов та виникнення непередбачуваних аварійних ситуацій [11].

Технічний стан розподільчих газопроводів і споруд на них є основним показником, який характеризує безпечну і надійну їх експлуатацію, тому особливо важливим є визначення технічного стану розподільчих газопроводів, строк амортизації яких закінчився, і які включені в план капітального ремонту, а також тих, на яких були витоки газу, розриви зварних з'єднань, наскрізні корозійні пошкодження, а також тих, які експлуатуються з тривалою перервою роботи електрозахисних установок [12].

Технічний стан всіх газопроводів, що проходять землею (не включаючи підводні) слід оцінювати за такими основними характеристиками [12]:

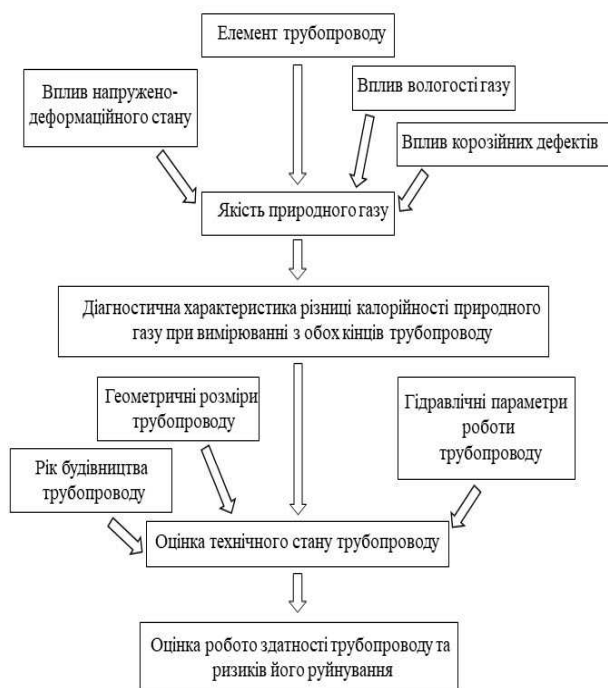


Рисунок 3 – Схема залежності якісних показників природного газу та технічного стану газопроводу

Сталеві газопроводи: герметичність газопроводів; стан металу труб і якість зварних з'єднань; стан захисного ізоляційного покриття; технічний стан надземних газопроводів; стан будівельних конструкцій (підпори, кріплення, компенсатори й т.ін.); стан пофарбування та стан термоізоляції газопроводів зрідженого газу; корозійний стан; стан електрохімічного захисту.

- Поліетиленові газопроводи: стан ізолювального покриття сталевих вставок і з'єднань поліетиленових труб зі сталевими; герметичність газопроводів; механічні пошкодження труб і їх стикових з'єднань (проколи, зім'яття та ін.); розриви зварних стиків труб; тріщини (поперечні і повздовжні) в трубах; нещільність в роз'ємних з'єднаннях поліетиленових труб зі сталевими.

- При оцінці підземних газопроводів слід урахувати: геологічне розташування газопроводів (стан ґрунту, в якому знаходиться газопровід, глибина залягання), а також розташування газопроводів відносно інших інженерних мереж та споруд.

Одними з характеристик технічного стану, які впливають на якість природного газу є корозійні дефекти. Згідно [13], специфіка продуктів, що транспортуються газопроводом, дає можливість визначити наявність внутрішньої корозії труби. Відмітимо, що йдеться перш за все про внутрішню корозію трубопроводу, так як вона найбільшим чином впливає на якість енергоресурсу, що по ньому протікає. Зовнішні корозійні дефекти також впливатимуть на калорійність газу в трубопроводі. Такий вплив спричинить розвиток в матеріалі труби корозійно-втомного дефекту за умови виникнення тріщини, глибиною співрозмірною з товщиною трубопроводу.

Тобто спостерігається взаємозалежність між технічним станом газопроводу та якістю природного газу, що протікає по ньому. На рисунку 3 наведено розроблена схема зв'язку якісних характеристик природного газу з параметрами технічного стану газопроводу.

Проведено експериментальне дослідження, що доказує такий вплив. На газопроводі «Густань – Ділієво» в Івано-Франківській області було здійснено промислові дослідження з визначенням зміни тиску та вимірювання теплоти згорання в контрольних точках з використанням хроматографа стандартним методом. Довжина вказаної ділянки складає 8320 м, діаметр – 159 мм. На газопроводі на надземних переходах між ГРП №090300975 та ГРП №09030076 було встановлено три типових манометри. Схема проведення дослідження наведена на рисунку 4.

На рисунку 4 наведений спосіб вимірювання на одній з точок мережі.



Рисунок 4 – Спосіб вимірювання параметрів мережі

Аналіз одержаних результатів показав, що тиск природного газу в газопроводі практично незмінний, а значення теплоти згорання, особливо в ділянці між замірами №2 і №3 значно (на 10%) відрізняються в сторону зниження енергетичних характеристик природного газу.

Подальше дослідження ділянки газопроводу між манометрами №2 і №3, в тому числі шурфування, показали наявність корозійних пошкоджень в ньому, що і є причиною зниження теплоти згорання природного газу.

Результати проведених досліджень дають підстави стверджувати, що зміна (зниження) енергетичних характеристик природного газу при одержанні газу від одного постачальника може служити додатковою діагностичною ознакою технічного стану газопроводу. Тому актуальним в подальших дослідженнях стане розробка методу визначення типів пошкоджень та їх градація (оцінка впливу) на основі зібраних даних якості природного газу.

Висновки

Отже, Директиви ЄС диктують умови для реформування газового сектору з позиціонування природного газу як енергоресурсу. В роботі проведено моделювання випадку врахування якості природного газу при розрахунках за цей енергоресурс, що показало знижені обсяги

споживання газу для цієї моделі. Підхід до функціонування мережі в умовах врахування енергії газу розвине метрологічну систему засобів оцінки якісних показників енергоресурсу та створить нові набори даних з інформаційними параметрами умов роботи мережі. В роботі запропоновано використати цю систему інформаційних даних для цілей додаткової діагностичної ознаки технічного стану газопроводу. Розроблено схему зв'язку технічного стану трубопроводу з якісними показниками газу, що по ньому протікає. Наведено результати дослідження можливості визначення дефектів трубопроводу через дослідження зміни якісних показників енергоресурсу.

Література

1. Energy Community Facts in Brief [Електронний ресурс] // Energy Community Secretariat – Режим доступу до ресурсу: https://www.energy-community.org/dam/jcr:737d594d-e541-4c0e-975b-b7fc937cfad1/EnC_Factsheet_022020.pdf
2. Third energy package [Електронний ресурс] // European Commission. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://ec.europa.eu/energy/topics/markets-and-consumers/market-legislation/third-energy-package_en?redir=1.
3. Імплементация энергетических хартий (третьего энергопакета) стран ЕС в энергетике Украины: проблемы та перспективи. // Управління в нафтогазовому комплексі. – 2017. – С. 17.
4. Clean energy for all Europeans package [Електронний ресурс] // European Commission. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en
5. Directive 2009/73/EC of the European parliament and of the council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC [Електронний ресурс] // European Commission. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0073>.
6. Якість газу [Електронний ресурс] // АТ "Укртрансгаз". – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://utg.ua/utg/business-info/yakist-gazu.html>.

7. Майкл Вундер (2020). Споживання газу (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9425-gas-consumption>), Центральний обмін файлами MATLAB. Отримано 10 вересня 2020 р.

8. Максим'юк С. О. Аналіз викликів у системному підході управління динамічними процесами мереж газотранспортної системи / С. О. Максим'юк, І. І. Височанський, О. М. Карпаш. // Нафтогазова енергетика. – 2018. – С. 25–31.

9. Довідник працівника газотранспортного підприємства / В. В. Розгонюк, А.А. Руднік, В.М. Коломєєв та ін. – Київ: РОСТОК, 2001. – 1090 с.

10. Розгонюк В. В. Трубопровідний транспорт природного газу. – Київ: Кий, 2008. – 304 с.

11. Обслуговування і ремонт газопроводів / Грудз В. Я., Тимків Д. Ф., Михалків В. Б., Костів В. В. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 711 с.

12. Наказ Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України 09.06.98 N 124 "Правила обстежень, оцінки технічного стану, паспортизації та проведення планово-запобіжних ремонтів газопроводів і споруд на них" [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. – 1998. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0723-98#Text>.

13. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб.: у 3 т. /Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин [за ред. В. В. Панасюка]. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2012. – 433 с.

References

1. Energy Community Facts in Brief [Електронний ресурс] // Energy Community Secretariat – Режим доступу до ресурсу: https://www.energy-community.org/dam/jcr:737d594d-e541-4c0e-975b-b7fc937cfad1/EnC_Factsheet_022020.pdf

2. Third energy package [Електронний ресурс] // European Commission. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://ec.europa.eu/energy/topics/markets-and-consumers/market-legislation/third-energy-package_en?redir=1.

3. Implementacija energhetichnykh khartij (tretjogho energhopaketu) krajini JeS v energhetyci Ukrajinu: problemy ta perspektyvy // Upravlinnja v naftogazovomu kompleksi. – 2017. – S. 17.

4. Clean energy for all Europeans package [Електронний ресурс] // European Commission. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en

5. Directive 2009/73/EC of the European parliament and of the council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC [Електронний ресурс] // European Commission. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0073>.

6. Jakistj ghazu [Elektronny jresurs] // AT "Ukrtransghaz". – 2014. – Rezhym dostupu do resursu: <http://utg.ua/utg/business-info/yakistj-gazu.html>.

7. Majkl Vunder (2020). Spozhyvannja ghazu (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9425-gas-consumption>), Centraljnyj obmin fajlamy MATLAB. Otrymano 10 veresnja 2020 r.

8. Maksym'juk S. O. Analiz vyklykiv u systemnomu pidkhodi upravlinnja dynamichnymy procesamy merezh ghazotransportnoji systemy / S. O. Maksym'juk, I. I. Vysochanskyj, O. M. Karpash. // Naftogazova energhetyka. – 2018. – S. 25–31.

9. Dovidnyk pracivnyka ghazotransportnogo pidpryjemstva / V. V. Rozghonjuk, A.A. Rudnik, V.M. Kolomjevtain. – Kyjiv: ROSTOK, 2001. – 1090 s.

10. Rozghonjuk V. V. Truboprovodnyj transport pryrodnogho ghazu. – Kyjiv: Kyj, 2008. – 304 s.

11. Obslughovuvannja i remont ghazoprovodiv / Ghrudz V. Ja., Tymkiv D. F., Mykhalkiv V. B., Kostiv V. V. – Ivano-Frankivsjk: Lileja-NV, 2009. – 711 s.

12. Nakaz Derzhavnogho komitetu budivnytva, arkhitektury ta zhytlovoji polityky Ukrainy 09.06.98 N 124 "Pravyła obstezhenj, ocinky tekhnichnogho stanu, pasportyzaciji ta provedennja planovo-zapobizhnykh remontiv ghazoprovodiv i sporud na nykh" [Elektronnyjresurs] // Verkhovna Rada Ukrainy. – 1998. – Rezhym dostupu do resursu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0723-98#Text>.

13. Korozijno-vodneva deghradacija naftovykh i ghazovykh truboprovodiv ta jiji zapobighannja: nauk.-tekhn. posib.: u 3 t. / Je. I. Kryzhanivskyj, Gh. M. Nykyforchyn [za red. V. V. Panasjuka]. – T. 3: Deghradacija ghazoprovodiv ta jiji zapobighannja. – Ivano-Frankivsk: vyd-vo Ivano-Frankivskogho nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu nafty i ghazu, 2012. – 433 s.

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 004.89

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-90-101

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

М. І. Горбійчук, О. Т. Лазорів, А. М. Лазорів

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

Розроблений метод оптимального керування процесом компримування природного газу компресорною станцією, яка оснащена газоперекачувальними агрегатами з газотурбінним приводом. Розглядається паралельна схема з'єднання газоперекачувальних агрегатів, які працюють на загальний колектор. Як критерій оптимальності вибрана вартість паливного газу з врахуванням потужності викидів оксиду азоту в атмосферу. При цьому враховані обмеження на технологічні параметри і планове завдання на транспортування природного газу. Сформована задача розпадається на дві підзадачі – вибір оптимальної кількості паралельно працюючих агрегатів у кожній із підгруп і визначення оптимального режиму роботи кожного агрегату в групі.

Формалізація задачі оптимального керування роботою ГПА враховує невизначеність, яка притаманна процесу компримування природного газу. З цією метою використаний апарат нечіткої алгебри, що дало змогу врахувати неточності, які виникають як в результаті вимірювання технологічних параметрів, так і в результаті оброблення отриманих даних про технологічний процес. Система оптимального керування інтегрується програмно у верхній рівень (диспетчера) і є складовою частиною загальної системи керування роботою ГПА і має ієрархічну структуру. На нижньому рівні розміщені вимірювальні пристрої технологічних параметрів, які є джерелом інформації для верхнього рівня де відбувається розв'язання оптимізаційних задач. Розроблені методи лягли в основу алгоритмічного і програмного забезпечення комп'ютерної системи оптимального керування роботою окремого агрегату компресорної станції, яка може бути інтегрована в існуючу автоматизовану систему.

Ключові слова: *компресорна станція, газоперекачувальний агрегат, критерій оптимальності, вартість паливного газу, потужність викидів, оксид азоту, оптимальне керування.*

Разработанный метод оптимального управления процессом компримирования природного газа компрессорной станцией, которая оснащена газоперекачивающими агрегатами с газотурбинным приводом. Рассматривается параллельная схема соединения газоперекачивающих агрегатов, которые работают на общий коллектор. Как критерий оптимальности выбрана стоимость топлива с учетом мощности выбросов оксида азота в атмосферу. При этом учтены ограничения на технологические параметры и плановое задание на транспортировку природного газа. Сформированная задача распадается на две подзадачи – выбор оптимального количества параллельно работающих агрегатов в каждой из подгрупп и определения оптимального режима работы каждого агрегата в группе. Формализация задачи оптимального управления работой ГПА учитывает неопределенность, которая присущая процессу компримирования природного газа. С этой целью использованный аппарат нечеткой алгебры, что дало возможность учесть неточности, которые возникают как в результате измерения технологических параметров, так и в результате обработки полученных данных о технологическом процессе. Система оптимального управления интегрируется программно в верхний уровень (диспетчера) и является составной частью общей системы управления работой ГПА и имеет иерархическую структуру. На нижнем уровне размещены измерительные устройства технологических параметров, которые являются источником информации для верхнего уровня где происходит решение оптимизационных задач.

Разработанные методы легли в основу алгоритмического и программного обеспечения компьютерной системы оптимального управления работой отдельного агрегата компрессорной станции, которая может быть интегрирована в существующую автоматизированную систему.

***Ключевые слова:** компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, критерий оптимальности, стоимость топ ливного газа, мощность выбросов, оксид азота, оптимальное управление.*

Method of the optimal control of the natural gas compression process by a compressor station, which is equipped with gas pumping units with a gas turbine drive, has been developed. The parallel scheme of connection of gas pumping units working on the general collector is considered. The cost of fuel gas taking into account the power of nitrogen oxide emissions into the atmosphere is chosen as the criterion of optimality. This takes into account the restrictions on technological parameters and the planned task for the transportation of natural gas. The formed problem is divided into two subtasks - the choice of the optimal number of parallel units in each of the subgroups and determining the optimal mode of operation of each unit in the group. Formalization of optimal control problem of GPA operation takes into account the uncertainty inherent in the process of natural gas compression. For this purpose, the apparatus of fuzzy algebra was used, which made it possible to take into account the inaccuracies that arise both as a result of measuring technological parameters and as a result of processing the obtained data on the technological process. The optimal control system is integrated into the upper level (dispatcher) and is an integral part of the overall control system of the GPA and has a hierarchical structure. At the lower level there are measuring devices of technological parameters, which are a source of information for the upper level where the solution of optimization problems takes place.

The developed methods formed the basis of the algorithmic and software of the computer system for optimal control of a separate unit of the compressor station, which can be integrated into the existing automated system.

***Keywords:** compressor station, gas pumping unit, optimality criterion, fuel gas cost, emission capacity, nitric oxide, optimal control.*

Вступ

На сучасному етапі експлуатації газотранспортної системи (ГТС) України одними із важливих задач є економія ресурсів, які витрачаються на виробничо-технологічні потреби і зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Цього можна досягти як модернізацією існуючого парку газоперекачувальних агрегатів, так і впровадженням сучасних автоматизованих систем керування процесом транспортування природного газу.

Так, планом модернізації ГТС, розробленого «Укртрансгазом» [1], передбачено реконструкцію чотирьох компресорних станцій: «Яготин», «Диканька», «Ромни» та дотискувальної компресорної станції на підземному сховищі газу «КЦ 4 Більче-Волиця». У реконструкцію компресійних станцій в 2018-2027 роках планують вкласти понад 7 млрд грн.

Інший шлях, менш затратний, це впровадження сучасних автоматизованих систем керування процесом транспортування природного газу, які повинні вирішувати не тільки задачі захисту, контролю та стабілізації технологічних параметрів, але й оптимального керування роботою компресорних станцій.

Таким чином, метою роботи є розроблення методів і алгоритмічного забезпечення комп'ютерної системи компримування природного газу за критерієм, що забезпечує економію паливного газу з врахуванням шкідливих викидів в навколишнє середовище в умовах невизначеності, які виникають в результаті вимірювання технологічних параметрів та неточностей при обробці інформації про технологічний процес.

Аналіз публікацій

На теперішній час особлива увага приділяється ресурсозберігаючим технологіям у газовій промисловості, про що свідчать публікації багатьох авторів.

Так, у роботі [2] розглянута задача зменшення енерговитрат на компримування природного газу за умови, що ступінь підвищення тиску, яку забезпечує компресорна станція є незмінною, а визначається множина значень числа оборотів кожного ротора ГПА при заданому обсязі на транспортування газу.

Оптимальний режим автори визначають за умови, що всі паралельно працюючі агрегати завантажені рівномірно без врахування їх технічних станів.

У роботі [3] з використанням нечітких моделей вирішується задача знаходження такого режиму керування, який забезпечує стабільний тиск на виході компресорної станції. Автори вказують, що для реалізації сформованої задачі необхідно визначити функції належності, які залежать від цілого ряду факторів – ефективність управління, витрата паливного газу, пропускна здатність трубопроводу, відповідні тиски газу на вході і виході нагнітача природного газу. Такі функції належності є багатовимірними функціями і їх визначення на основі експериментальних даних вимагає значних затрат часу і можливе лише при певних допущеннях, які складно перевірити на практиці.

На основі детермінованих моделей, які отримані з використанням зведених характеристик нагнітача, у роботі [4] розв'язується задача перерозподілу потоків природного газу між паралельно працюючими нагнітачами з метою мінімізації витрат паливного газу.

Постановка задачі включає умову забезпечення планового завдання на транспортування газу при заданих тисках на вході і виході нагнітача та при відомій вхідній температурі газу. Забезпечення певної витрати газу через нагнітач здійснюється шляхом зміни обертів вала турбіни низького тиску.

Наведені в роботі газодинамічні характеристики та критерій оптимальності є нелінійними функціями. Тому така задача розв'язана методом нелінійного програмування.

Оскільки використані зведені характеристики і розглядаються залежності, які витікають із політропного процесу, то отримані результати лише в певному наближенні відповідають реальному режимові роботи нагнітача. У роботі не оцінена ступінь наближення отриманих результатів до існуючих режимів роботи ГПА. Крім того не врахований технічний стан конкретного ГПА, який впливає на ефективність роботи кожного ГПА.

Зроблений аналіз літературних джерел показує, що на сьогоднішній день накопичений значний досвід стосовно математичного моделювання і оптимізації режимів роботи компресорних станцій. Але розв'язання таких задач ґрунтується у більшості випадків на використанні детермінованих моделей, що

вимагає точного знання їх параметрів і граничних умов [5]. Проте процесу компримування природного газу притаманна невизначеність, яка проявляється в зміні газодинамічних характеристиках потоків та агрегатів; змінюються метрологічні характеристики вимірювальних приладів та відбувається природне зношення вузлів та агрегатів компресорних станцій.

Врахування фактору невизначеності, а також технічного стану як окремих вузлів, так і в цілому ГПА є важливою науковою задачею, яка потребує свого подальшого вирішення.

Структурна схема комп'ютерної системи керування роботою газоперекачувальних агрегатів

Для транспортування газу магістральними трубопроводами використовують газоперекачувальні агрегати (ГПА), які розміщують на компресорних станціях. ГПА мають у своєму складі відцентрові нагнітачі природного газу (ВЦН) з електричним або газотурбінним приводом. АТ «Укртрансгаз» експлуатує 702 агрегати з них 448 з газотурбінним приводом, що складає 63,8 % від загального їхнього числа. Витрати АТ «Укртрансгаз» природного газу для виробничо-технологічних потреб у 2018 році склали 1,9 млрд. куб. м. [1], більша частина якого спалюється в камерах згоряння ГПА з метою забезпечення роботи газотурбінного приводу. Ця доля газу носить назву паливний газ.

Одним із перспективних напрямків зменшення витрат паливного газу є експлуатація ГПА в оптимальному режимі.

Існуючі системи автоматичного керування процесом компримування природного газу виконують дві важливі функції – забезпечують антипомпажний захист ВЦН і підтримують заданий технологічний режим роботи ГПА.

На рис. 1 зображена структурна схема оптимального керування роботою ГПА, яка складається із двох блоків – існуючої системи автоматичного керування ГПА та системи оптимального керування роботою ГПА.

Система автоматичного керування складається із таких блоків (рис.1): комплект давачів, контролери САК ГПА, пристрої реєстрації (ПРІ) та оброблення інформації (ПОІ). Основними функціями САК ГПА є [6]

регулювання обертів ротора ВЦН, антипомпажний і аварійний захист ГПА, керування окремими механізмами ГПА, відображення і реєстрація поточної інформації про стан ГПА.

Регулювання обертів ротора ВЦН здійснюється подачею паливного газу в камеру згорання ГПА.

за 20 мс [6]. Інші функції САК ГПА такої високої швидкодії не вимагають.

У залежності від виробника і поставлених задач програмне забезпечення як контролерів, так і промислових комп'ютерів виконується на різних мовах програмування з використанням цілого ряду програмних продуктів.

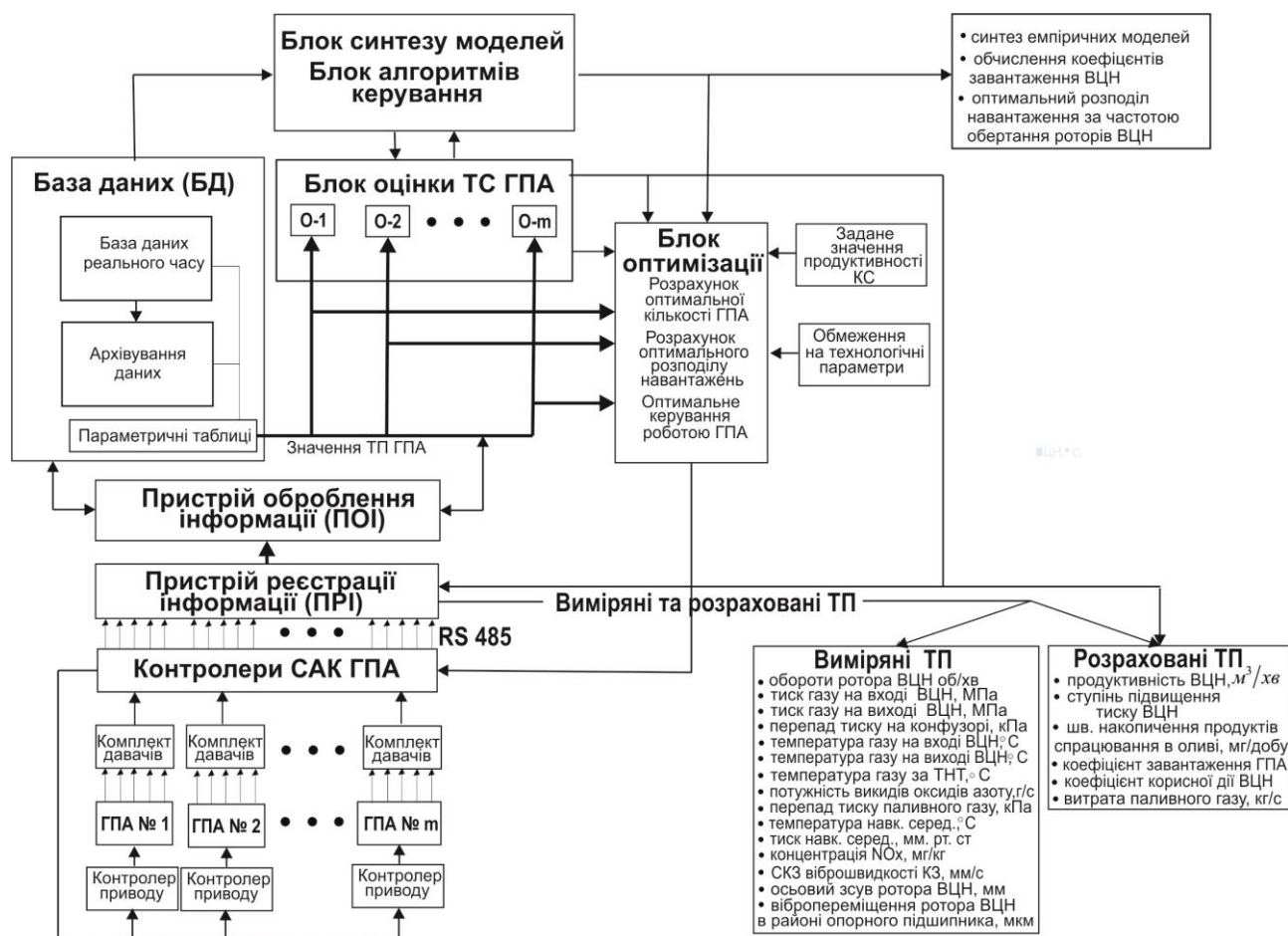


Рисунок 1 – Структурна схема оптимального керування роботою ГПА

За допомогою антипомпажного захисту (регулювання) підтримується мінімально допустимий запас по помпажу, що дає змогу отримати максимальний коефіцієнт корисної дії для даного режиму роботи ГПА.

Аналіз функціонування САК ГПА показує, що такі функції як антипомпажний і аварійний захист ГПА та регулювання частоти обертання ротора ВЦН вимагають високої швидкодії САК. Такт вирішення задачі не повинен бути більшим

Система оптимального керування інтегрується програмно у верхній рівень (диспетчера) і є складовою частиною загальної системи керування роботою ГПА (рис.1) і має ієрархічну структуру.

Інформація із нижнього рівня про поточний стан об'єкта керування (ГПА) використовується цеховою автоматикою для підтримання заданого режиму функціонування ГПА. Ця ж інформація може відобразитись на екрані дисплея оператора, а також зберігається в базі

даних (БД), яка має у своєму складі базу даних реального часу і підсистему архівування даних (рис. 1).

Дані, які занесені у БД, структуризовані у вигляді параметричних таблиць. Звідси вони попадають до блоку оцінки технічних станів ГПА.

Оцінюються технічні стани камери згоряння, масляної системи, упорно-опорних, упорних підшипників та проточної частини ВЦН [7]. Для кожного вузла агрегату визначені ознаки, спостереження за якими ведеться на протязі певного проміжку часу. Такі ознаки утворюють множину ознак, яка у теорії розпізнавання образів носить назву множини образів [8]. З використанням нейромережових технологій множина образів розбивається на класи. Кожному класу присвоюється певний рейтинг r_{ij} , де i – номер вузла; j – номер ГПА. Тоді рейтинг j – го ГПА обчислюється за такою формулою:

$$R_j = \sum_{i=1}^n r_{ij},$$

де n – кількість вузлів ГПА, для яких оцінюється їхній технічний стан.

За знайденими значеннями R_j визначають оцінку технічного стану ГПА

$$k_j = \frac{R_j}{\sum_{j=1}^m R_j}, \quad (1)$$

де m – кількість ГПА встановлених на компресорній станції.

Оцінка технічного стану ГПА здійснюється програмно за формулою (1) за допомогою обчислювачів $O-1$, $O-2$, ..., $O-m$ (рис. 1) і визначає ступень завантаження нагнітача в оптимізаційній задачі.

У зв'язку із зменшенням обсягів транспортування природного газу магістральними трубопроводами України компресорні станції мають надлишкову потужність. Тому виникає задача оптимального розподілу навантаження між паралельно працюючими ГПА.

Компресорні станції, де встановлені ГПА з газотурбінним приводом, є значними забруднювачами довкілля. Особливо

небезпечними є викиди оксидів азоту [9]. Тому критерій оптимальності враховує не тільки вартість паливного газу, але й величину екологічного штрафу на викиди оксиду азоту. Отже, «Блок алгоритмів керування» (рис. 1) розв'язує таку задачу [10, 11]:

$$\min : R(\bar{N}) = c \sum_{i=1}^L N_i G_i + c_f \sum_{i=1}^L N_i E_{p,i}, \quad (2)$$

де c – вартість спожитого паливного газу, $грн/кг$; N_i – кількість агрегатів в кожній із L груп; G_i – споживання паливного газу i – тим ГПА в групі, що складається із N_i нагнітачів, $кг/с$; $E_{p,i}$ – потужність викидів оксидів азоту i – тим ГПА, $кг/с$; c_f – величина екологічного податку, $грн/кг$.

Критерій оптимальності (1) повинен мінімізуватись при обмеженні, які визначені завданням на транспортування природного газу для даної КС

$$\sum_{i=1}^L q_i k_i N_i = Q_0, \quad (3)$$

де q_i – продуктивність i – того нагнітача в групі; k_i – узагальнений коефіцієнт технічного стану i – того нагнітача в групі; Q_0 – планове завдання компресорній станції на перекачку газу віднесене до одиниці часу. Значення Q_0 визначається блоком (рис. 1) «Задане значення продуктивності КС».

У кожній групі агрегатів є певне число M_i ГПА, що і зумовлює такі обмеження:

$$N_i \leq M_i, \quad i = \overline{1, L}. \quad (4)$$

Крім того повинні виконуватись такі очевидні обмеження:

$$N_i \geq 0, \quad i = \overline{1, L}. \quad (5)$$

Обмеження (3) – (5) формує блок (рис. 1) «Обмеження на технологічні параметри».

Величини $E_{p,i}$ і q_i , які фігурують у виразах (2) і (3), є функціями технологічних параметрів. Залежності (2) і (3) мають досить складну функціональну залежність, аналітичні вирази для яких на сьогоднішній день невідомі. Тому для їхнього опису використані емпіричні моделі («Блок синтезу моделей») (рис. 1). Для побудови емпіричних моделей використаний

метод, який ґрунтується на теорії генетичних алгоритмів. У результаті отримують модель оптимальної складності в заданому класі моделей [10]. Як правило, вибирають модель у вигляді полінома певної степені. На ГПА, як об'єкти керування, діють зовнішні впливи, що проявляється в неточності вимірювання технологічних параметрів. Крім того такі технологічні параметри як продуктивність нагнітачів, витрата паливного газу вимірюються опосередковано. Потужності викидів оксидів азоту фіксують з іншим кроком дискретності у порівнянні з іншими технологічними параметрами. Все це дає підстави вважати G_i , а також технологічні параметри, які зумовлюють значення величини $E_{p,i}$ нечіткими величинами.

Функція $E_{p,i}$ залежить від таких технологічних параметрів [12] як тиск P_{ac} і температура T_{ac} на виході осевого компресора, температура на вході турбіни високого тиску T_{ht} та витрата паливного газу G .

Залежність $E_{p,i}$ як функція технологічних параметрів синтезована у вигляді полінома

$$E_p(\bar{a}, \bar{x}) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \prod_{j=1}^m x_j^{\varphi_{ji}}, \quad (6)$$

де a_i - коефіцієнти полінома, які мають розмірність потужності викидів оксиду азоту; x_j - величини, які приведені до безрозмірного вигляду за формулою

$$x_j = \frac{X_j - X_{j,\min}}{X_{j,\max} - X_{j,\min}} \quad (7)$$

x_j - технологічні параметри у безрозмірній формі, що зумовлюють значення величини $E_{p,i}$; X_j - j -тий технологічний параметр в розмірних одиницях; $X_1 = P_{ac}$, $X_2 = T_{ac}$, $X_3 = T_{ht}$, $X_4 = G$; $\sum_{j=1}^m \varphi_{ji} \leq n_\varphi$; m - кількість аргументів функціональної залежності (6) ($m = 4$).

Степені полінома φ_{ji} , $j = 0, M-1$, $i = 1, m$ утворюють матрицю Φ розміром $M \times n$ з сумою рядків, що не перевершує n_φ .

Кількість членів полінома (6) можна визначити за такою формулою: $M = \frac{(m+n)!}{m!n!}$.

Зроблено допущення [10], що нечіткі величини x_j , які є аргументами функціональної залежності $E_{p,i}$, мають трикутні функції належності $\mu(x_k)$.

де

Після переходу до безрозмірних за формулою (7) величин критерій оптимальності (2) набуде такого вигляду:

$$\min : R(\bar{N}) = \sum_{i=1}^L (cN_i \pi_{G,i} x_{G,i} + c_f N_i E_{p,i}) + c \sum_{i=1}^L N_i G_{i,\min} \quad (8)$$

де $\pi_{G,i} = G_{i,\max} - G_{i,\min}$; $x_{G,i}$ - обчислюється за формулою (7) при $X_4 = G$.

Функція належності $\mu(x_j)$ це рівнобедрений трикутник, висота якого дорівнює одиниці, а основа має ширину Δ_j .

Оскільки функція належності $\mu(x_j)$ описується кусково-неперервними функціями, то вона є незручною для практичного використання. Тому в роботі [13] залежність $\mu(x_k)$ запропоновано апроксимувати гаусовою функцією належності.

Якщо взяти $\mu(x_j) = \frac{1}{2}$, де $x_j = x_{j,\min} + \frac{\Delta_j}{2}$, $x_{j,\min}$ - мінімальне значення k -го технологічного параметру, то в результаті апроксимації отримаємо таку гаусову функцію:

$$\hat{\mu}(x_j) = \exp\left(-\frac{(x_j - x_j^{(0)})^2}{2\sigma_j^2}\right), \quad (9)$$

де $\mu(x_j^{(0)}) = 1$; $x_j^{(0)}$ - модальне значення нечіткої величини x_j ; $\sigma_j^2 = k_\sigma \Delta_j^2$; σ_j - коефіцієнт розмитості нечіткої величини x_j ; $k_\sigma = \frac{1}{32 \ln 2}$.

Критерій оптимальності (8) подамо як суму двох величин R_1 і $c \sum_{i=1}^L N_i G_{i,\min}$, де

$$R_1 = \sum_{i=1}^L (cN_i \pi_{G,i} x_{G,i} + c_f N_i E_{p,i}). \quad (10)$$

Оскільки перший доданок у виразі (10) є адитивною функцією величин $x_{G,i}$, $E_{p,i}$, і які мають гаусову функцію належності [10], то R_1 також матиме гаусову функцію належності [14]

$$\mu(R_1) = \exp\left(-\frac{(R_1 - R_{1,0})^2}{2\sigma_R^2}\right). \quad (11)$$

Виходячи з того, що технологічні параметри x_j , $j=1, \dots, 4$ є нечіткими величинами з функцією належності (9), у роботі [10] доказано, що

$$R_{1,0} = \sum_{i=1}^L (cN_i \pi_{G,i} x_{G,i}^{(0)} + c_f N_i m_{E,i}), \quad (12)$$

$$m_{E,i} = \sum_{j=0}^{M-1} a_j \prod_{k=1}^m (x_{0,k}^{(i)})^{\phi_{jk}}, \quad (13)$$

де $x_{0,k}^{(i)}$ - модальні значення технологічних параметрів, які подані у безрозмірній формі.

$$\sigma_R^2 = k \sum_{i=1}^L \left((cN_i \pi_{G,i})^2 \Delta_{G,i}^2 + (c_f N_i)^2 \Lambda_i \right), \quad (14)$$

де $x_{G,i}^{(0)}$ - модальне значення нечіткої величини $x_{G,i}$;

$$\Lambda_i = \sum_{j=0}^{M-1} a_j^2 \left(\sum_{r=1}^m \Delta_{r,i}^2 \phi_{jr} (x_{0,r}^{(i)})^{\phi_{jr}-1} \prod_{\substack{q=1, \\ q \neq i}}^m (x_{0,q}^{(i)})^{\phi_{jq}} \right).$$

Нехай заданий γ - зріз нечіткої множини, що визначається функцією належності (11). Тоді

$$\mu(R_1) = \gamma.$$

З врахуванням (11) і співвідношень (12) – (14) будемо мати

$$\min: R(\bar{N}) = c \sum_{i=1}^L N_i \left(\pi_{m,i} x_{0,i}^{(m)} + \frac{c_f}{c} \sum_{j=0}^{M-1} a_j \prod_{k=1}^m (x_{0,k}^{(i)})^{\phi_{jk}} + G_{i,min} \right) + \sigma_R \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}}. \quad (15)$$

«Блок оптимізації» (рис. 1) за критерієм (15) з врахуванням обмежень (3) – (5) розраховує оптимальну кількість агрегатів, яка забезпечує

заданий обсяг Q_0 транспортування газу компресорною станцією.

Задача оптимізації (15) з обмеженнями (3) – (5) є задачею дискретного нелінійного програмування і її розв'язок можна знайти за допомогою методу меж і гілок [15].

Після того як визначена оптимальна кількість агрегатів, постає задача визначення оптимального режиму роботи кожного ГПА. Ця задача розв'язується «Блоком оптимальності» (рис. 1).

Ставиться задача – для кожної групи агрегатів, кількість яких визначена за критерієм оптимальності (15) з врахуванням обмежень (3) – (5), визначити таке число обертів n_i , $i = \overline{1, m}$, щоб затрати на експлуатацію кожного газоперекачувального агрегату були б мінімальними.

Отже, «Блок оптимізації» (рис.1) мінімізує таку величину:

$$R(\bar{n}) = \sum_{i=1}^m (cG_i(n_i) + c_f E_{p,i}(n_i)). \quad (16)$$

При цьому повинні виконуватися такі обмеження на технологічні параметри [13]:

$$T_{out}^{(i)} \leq T_{out,max}^{(i)}, \quad (17)$$

$$T_{tur}^{(i)} \leq T_{tur,max}^{(i)}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (18)$$

де $T_{out}^{(i)}$ - температура газу на виході із нагнітача; $T_{tur}^{(i)}$ - температура продуктів згоряння на виході i – тої турбіни низького тиску.

Для запобігання явищ помпажу і перевантаження нагнітача обмежують нижнє $n_{i,min}$ та верхнє $n_{i,max}$ значення частот обертання ротора ВЦН

$$n_{i,min} \leq n_i \leq n_{i,max}. \quad (19)$$

Встановлено [16], що витрата паливного газу G_i , потужність викидів $E_{p,i}$ оксидів азоту, температура газу $T_{out}^{(i)}$ на виході із нагнітача та температура продуктів згоряння $T_{tur}^{(i)}$ на виході i – тої турбіни низького тиску є функціями режимних параметрів

$$G_i = f_G^{(i)}(n_i, P_{in}, T_{in}, \varepsilon, P_c, T_c), \quad (20)$$

$$E_{p,i} = f_{E,i}(n_i, P_{ac,i}, T_{ac,i}, T_{ht,i}), \quad (21)$$

$$T_{out}^{(i)} = f_{out}^{(i)}(n_i, P_{in}, T_{in}, \varepsilon, P_c, T_c), \quad (22)$$

$$T_{tur}^{(i)} = f_{tur}^{(i)}(n_i, P_{in}, \varepsilon, P_c, T_c). \quad (23)$$

У виразах (20) – (23) прийняті такі позначення: P_{in}, T_{in} - тиск і температура газу на вході відцентрового нагнітача; P_c, T_c - тиск і температура навколишнього середовища; $P_{ac,i}, T_{ac,i}$ - тиск і температура газу на виході i -го осьового компресора; $T_{ht,i}$ - температура на виході турбіни високого тиску.

Ступінь підвищення тиску ε визначають за такою формулою [17]: $\varepsilon = \frac{P_{a,out}}{P_{a,in}}$, де $P_{a,in}, P_{a,out}$ - абсолютні тиски на вході і виході нагнітача.

Оскільки відцентрові $T_{out}^{(i)}$ нагнітачі працюють паралельно на загальний колектор, то тиск P_{in} і температура T_{in} на вході в нагнітач, тиск P_{out} на виході із нагнітача, тиск P_c і температура T_c навколишнього середовища для групи нагнітачів приймаються однаковими.

Функціональні залежності (20) – (23) «Блоком синтезу моделей» (рис. 1) апроксимуються поліноміальною залежністю, яка подібна до (6). З цією метою використаний метод, який ґрунтується на ідеях генетичних алгоритмів [17].

Для визначеного режиму n_i роботи відцентрового нагнітача технологічні параметри P_{in}, T_{in}, P_c, T_c та ε , які є аргументами функціональних залежностей (22) і (23) приймуть конкретні значення. Тоді залежності (22) і (23) будуть функціями лише однієї змінної

$$T_{out}^{(i)} = \theta_{out}^{(i)}(n_i), \quad (24)$$

$$T_{tur}^{(i)} = \theta_{tur}^{(i)}(n_i). \quad (25)$$

Для значень $T_{out,max}^{(i)}$ і $T_{tur,max}^{(i)}$, які визначені обмеженнями (16) і (17), співвідношення (24) і (25) будуть такими:

$$T_{out,max}^{(i)} = \theta_{out}^{(i)}(n_i),$$

$$T_{tur,max}^{(i)} = \theta_{tur}^{(i)}(n_i), \quad i = \overline{1, m}.$$

Розв'язування отриманих рівнянь відносно n_i дає такі значення: $n_{out,max}^{(i)}$ і $n_{tur,max}^{(i)}$. Тоді верхня межа для числа оборотів ротора нагнітача в обмеженні (19) визначиться такою умовою:

$$\tilde{n}_{i,max} = \min: \{n_{out,max}^{(i)}, n_{tur,max}^{(i)}, n_{i,max}\}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (26)$$

Отже, «Блок обмеження на технологічні параметри» (рис. 1) видозмінює умову (19). У результаті отримуємо

$$n_{i,min} \leq n_i \leq \tilde{n}_{i,max}, \quad i = \overline{1, m} \quad (27)$$

Виконання умови (27) є гарантією того, що будуть виконані обмеження (17) і (18).

«Блоком обмеження на технологічні параметри» (рис. 1) формується додаткова умова, яка обумовлює забезпечення заданого балансу перекачування природного газу

$$\sum_{i=1}^m k_i q_i(n_i) = q_0, \quad (28)$$

де $q_0 = \frac{Q_0}{m}$ – середня продуктивність ВЦН, яка зумовлена завданням Q_0 на перекачування газу.

Коефіцієнт k_i завантаження i -го нагнітача в групі паралельно працюючих m нагнітачів визначає «Блок оцінки ТС ГПА» (рис.1) за формулою, яка подібна до (1).

Продуктивність q_i i -го нагнітача є функцією технологічних параметрів [16] таких як $P_{in}, T_{in}, \varepsilon, P_c$, і T_c , які для визначеного режиму роботи ГПА приймають певні конкретні значення. Тому в обмеженні (28) $q_i = q_i(n_i)$.

Із-за цілого ряду причин коефіцієнти поліноміальних моделей типу (6) «Блоком синтезу моделей» (рис. 1) обчислюються з певною неточністю. До таких причин слід віднести - похибки методів опосередкованого вимірювання витрат паливного газу та продуктивності нагнітачів за перепадом тисків, похибки інтерполяції при визначенні

атмосферного тиску і потужності викидів оксидів азоту. Необхідність інтерполяції зумовлена різнометровими кроками дискретності P_{in} , T_{in} , T_{out} і T_c , з одної сторони, та атмосферного тиску P_c і потужності викидів E_p , з іншої сторони. Наприклад, вимірювання продуктивності нагнітачів за перепадом тисків на конфузори може спричинити похибки вимірювань до 20 % [18]. Крім того процес компримування природного газу знаходиться під дією різноманітних зовнішніх впливів, що спотворює результати вимірювань технологічних параметрів. Все це дає підстави вважати коефіцієнти емпіричних моделей нечіткими величинами.

Результати спостережень за потужностями викидів оксидів азоту в навколишнє середовище і функціональна залежність $q_i = f_{q,i}(n_j, P_{in}, T_{in}, \varepsilon, P_c, T_c)$, $i = \overline{1, m}$ апроксимуються поліномами подібних до (6)

$$E_{p,j}(\bar{a}_E^{(j)}, \bar{x}_E) = \sum_{i=0}^{M-1} a_{E,i}^{(j)} \prod_{k=1}^{r_1} x_{E,k}^{q_{ki}}, \quad (29)$$

$$q_j(\bar{a}_q, \bar{x}_q) = \sum_{i=0}^{M-1} a_{q,i}^{(j)} \prod_{k=1}^{r_2} x_{q,k}^{q_{ki}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (30)$$

де \bar{x}_E і \bar{x}_q – вектори технологічних параметрів, компоненти яких проведені до безрозмірних одиниць за формулою (7); для емпіричної моделі (29): $X_1 = n_j$, $X_2 = P_{ac,j}$, $X_3 = T_{ac,j}$ і $X_4 = T_{ht,j}$; для емпіричної моделі (30): $X_1 = n_j$, $X_2 = P_{in}$, $X_3 = T_{in}$, $X_4 = \varepsilon$, $X_5 = P_c$ і $X_6 = T_c$; r_1 і r_2 – розмірності векторів \bar{x}_E і \bar{x}_q .

Синтез емпіричних моделей (29) і (30) здійснюється «Блоком синтезу моделей» (рис. 1) за допомогою методу [17], який ґрунтується на теорії генетичних алгоритмів. У результаті отримують емпіричну модель оптимальної складності, в якій число коефіцієнтів моделі відмінних від нуля менше M . Інші коефіцієнти емпіричних моделей приймають нульові значення.

Кожний режим роботи i -того нагнітача характеризується визначеним набором технологічних параметрів. Значення кожного із цих технологічних параметрів, крім частоти обертання ротора нагнітача, які приведені до

безрозмірних одиниць, підставимо у вирази синтезованих емпіричних моделей (29) і (30). У результаті отримаємо поліноми

$$\tilde{E}_{p,j}(x_1, \bar{A}_E^{(j)}) = \sum_{k=0}^{n_{E,j}} A_{E,k}^{(j)} x_1^k, \quad (31)$$

$$\tilde{q}_j(x_1, \bar{A}_q^{(j)}) = \sum_{k=0}^{n_{q,j}} A_{q,k}^{(j)} x_1^k, \quad j = \overline{1, m}, \quad (32)$$

де $n_{E,j} \leq r_1$ і $n_{q,j} \leq r_2$.

Допускається, що коефіцієнти поліномів моделей (31) і (32) є нечіткими величинами з трикутною функцією належності, яка апроксимована гаусовою функцією подібної до (9). Для коефіцієнтів полінома (31) і (32)

$$\mu(A_{E,k}^{(j)}) = \exp\left(-\frac{(A_{E,k}^{(j)} - A_{E_0,k}^{(j)})^2}{2(\sigma_{E,k}^{(j)})^2}\right), \quad (33)$$

$$\mu(A_{q,k}^{(j)}) = \exp\left(-\frac{(A_{q,k}^{(j)} - A_{q_0,k}^{(j)})^2}{2(\sigma_{q,k}^{(j)})^2}\right), \quad j = \overline{1, m}, \quad (34)$$

де $A_{E_0,k}^{(j)}$, $A_{q_0,k}^{(j)}$ – модальні значення функцій належності (33) і (34).

Оскільки трикутні функції належності нечітких величин $A_{E,k}^{(j)}$ і $A_{q,k}^{(j)}$ апроксимовані гаусовою функцією, то $(\sigma_{E,k}^{(j)})^2 = k_\sigma (\Delta_{E,k}^{(j)})^2$ і $(\sigma_{q,k}^{(j)})^2 = k_\sigma (\Delta_{q,k}^{(j)})^2$.

Величину інтервалів невизначеності $\Delta_{E,k}^{(j)}$ і $\Delta_{q,k}^{(j)}$ нечітких величин $A_{E,k}^{(j)}$ і $A_{q,k}^{(j)}$ визначимо у такий спосіб: $\Delta_{E,k}^{(j)} = \delta_{E,k}^{(j)} A_{E_0,k}^{(j)}$ і $\Delta_{q,k}^{(j)} = \delta_{q,k}^{(j)} A_{q_0,k}^{(j)}$, де $\{\delta_{E,k}^{(j)}, \delta_{q,k}^{(j)}\} \in (0; 1]$.

Витрата паливного газу вимірюється з похибкою, що не перевищує 2 % [19]. Тому апроксимація залежності (20) поліномом

$$G_j(\bar{a}_G, \bar{x}_G) = \sum_{i=0}^{M-1} a_{G,i}^{(j)} \prod_{k=1}^{r_2} x_{G,k}^{q_{ki}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (35)$$

допускає, що коефіцієнти $a_{G,i}^{(j)}$ полінома (35) – чіткі числа.

На основі зроблених допущень «Блок алгоритмів керування» (рис. 1) формує задачу оптимального керування групою паралельно включених ГПА з метою визначення таких оборотів ротора кожного нагнітача, щоб критерій оптимальності

$$R(\bar{x}^{(1)}) = c \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=0}^{n_{G,j}} A_{G,k}^{(j)} x_{1,j}^k + r_c \sum_{k=0}^{n_{E,j}} A_{E_0,k}^{(j)} x_{1,j}^k + K_E \left(\sum_{k=0}^{n_{E,j}} \left(\delta_{E,k}^{(j)} A_{E_0,k}^{(j)} \right)^2 x_{1,j}^{2k} \right)^{1/2} \right) \quad (36)$$

набув мінімального значення при таких обмеженнях:

$$\sum_{j=1}^m k_j \left(\sum_{k=0}^{n_{q,j}} A_{q_0,k}^{(j)} x_{1,j}^k + K_q \left(\sum_{k=0}^{n_{q,j}} \left(\delta_{q,k}^{(j)} A_{q_0,k}^{(j)} \right)^2 x_{1,j}^{2k} \right)^{1/2} \right) = q_0, \quad (37)$$

$$0 \leq x_{1,j} \leq \beta_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (38)$$

де $x_{1,j}$ – число оборотів ротора j – нагнітача в

безрозмірних одиницях; $K_q = k_\sigma \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}}$;

$0 < \delta_{q,k}^{(j)} \leq 1$; $A_{q_0,k}^{(j)}$ – модальні значення

коефіцієнтів полінома;; $\beta_j = \frac{\tilde{n}_{j,max} - n_{j,min}}{\Delta_n^{(j)}}$,

$j = \overline{1, m}$; $\Delta_n^{(j)} = n_{j,max} - n_{j,min}$.

Сформована задача (36) – (38) оптимального керування роботою паралельно працюючих ГПА розв’язується «Блоком оптимізації». Це задача нелінійного програмування і для знаходження її розв’язку можна застосувати, наприклад, алгоритм внутрішніх точок [20] реалізований у програмному продукті MatLab (вбудована функція fmincon).

Результатом реалізації алгоритму розв’язування задачі (36) – (38) є оптимальні значення числа оборотів ротора нагнітача у безрозмірних одиницях. Перехід до розмірних одиниць здійснюється за формулою

$$n_j = \Delta_{n,j} x_{1,j} + n_{j,min}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Отримані значення n_j засилаються до субблоку «Оптимальне керування роботою ГПА» («Блок оптимізації») (рис.1). Звідси вони поступають до «Контролерів ГПА», де

реалізуються як вставки регуляторів, які за допомогою контролера приводу змінюють подачу паливного газу в камери згоряння «ГПА № 1», «ГПА № 2», ..., «ГПА № m» (рис. 1).

Висновки

Запропонована система оптимального керування роботою ГПА вирішує дві задачі – оптимальний розподіл планової кількості природного газу між паралельно працюючими агрегатами та визначення оптимального числа оборотів ротора нагнітача. Як критерій оптимальності вибраний вартість паливного газу з врахуванням потужності викидів оксиду азоту в навколишнє середовище, що є основною відмінності роботи від робіт, де розглядалися подібні задачі.

Особливістю роботи є і те, що при формалізації задач оптимального керування роботою ГПА врахована невизначеність, яка притаманна процесу компримування природного газу. З цією метою використаний апарат нечіткої алгебри, що дало змогу врахувати неточності, які виникають як в результаті вимірювання технологічних параметрів, так і в результаті оброблення отриманих даних про технологічний процес.

Література

1. Офіційний сайт АТ «Укртрансгазу». Режим доступу: <http://utg.ua/utg/about-company/utg-today.html>
2. Тухбатуллин Ф. Г., Короленок А. М., Колотилов Ю. В. Реализация эффективной работы компрессорной станции с соблюдением принципов промышленной безопасности техногенных объектов // Территория «Нефтегаз». 2015. № 6. С.110 – 112.
3. Альхайек Р., Удовенко С. Г., Шамраев А. А. Оптимизация режимов автоматического управления компрессорными станциями магистральных газопроводов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматизации. 2011. С.29 – 35.
4. Лещенко І. Ч. Постановка задач оптимізації режимів роботи цехів компресорних станцій магістральних газопроводів // Проблеми загальної енергетики. 2006. №13. С. 67 – 70.
5. Об одной стратегии оптимизации режимов работы газотранспортных систем. А. Д. Тевяшев, О. А. Тевяшева, В. С. Смирнова,

В. А. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. №15 с. 94-98.

6. Кривонос А., Харитонов А., Гуличев В. Система управления газоперекачивающими агрегатами // СТА. 2/97. С. 66-68.

7. Горбійчук М. І., Лазорів А. М., Луцок І. І. Алгоритми оптимального керування процесом компримування природного газу // Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. 2011. № 2(15). С. 48-56.

8. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов; пер. с англ. М.: 1978. 411 с.

9. Мірзоева О. Ю. Аналіз існуючих методів моделей технічних засобів контролю викидів шкідливих речовин з камери згорання // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2017 (104). Частина 1. С. 100 – 105.

10. Горбійчук М. І., Біла О. Т. Оптимальний розподіл паралельно працюючих агрегатів з врахуванням екологічних податків в умовах невизначеності // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2019. № 1 (46). С. 35 – 45.

11. Алгоритмічне та програмне забезпечення комп'ютерної системи вибору оптимальної кількості паралельно працюючих нагнітачів природного газу / М.І.Горбійчук, О. Т. Біла, Б. В. Пашковський, Н. Т. Лазорів // Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. №1(42). С. 47-56.

12. Митрофанов В. А. Закономерности образования вредных веществ и повешение экологичности ГТД; автореф. дисс. канд. техн. наук. СПб 2000. 18 с.

13. Gorbiychuk M., Pashkovskiy V., Moysenko O., Sabat N. Solution of the optimization problem of the control over operation of gas pumping units under fuzzy conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control system. 2017. Vol. 5, No 2(89). Pp. 65 – 71.

14. Раскин Л. Г., Серая О. В. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения; монография. Харьков: Парус, 2008. 352 с.

15. Сигал И. Х., Иванова А. П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. М.: Физматлит, 2002. 240 с.

16. Gorbiychuk M. I., Bila O. T., Slabinoha M. O., Humeniuk T. V. Optimization Natural Gas Pumping Units Operation by the Economic Criterion in the Conditions of Uncertainty // 7th International Conference on Modeling, Development and Strategic Management of Economic System (MDSMES 2019). P. 47 – 52.

17. Gorbiychuk Mikhail I., Medvedchuk Vera M., Lazoriv Alla N. Analysis of Parallel Algorithm of Empirical Models Synthesis on Principles of Genetic Algorithms Journal of Automation and Information Sciences. – vol. 48, is. 2. – P. 54 -73.

18. Ільченко Б. С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів: монографія. Х.: Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. ХНАМГ, 2011. – 228 с.

19. Компрессорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів: СОУ 60.3-30019801-011:2004. [Чинний від. 22.12.2004]. К.: ДК Укртрансгаз. 117 с.

20. Byrd, R.H., Gilbert J. C., Nocedal J. A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming // Mathematical Programming. Vol 89, No. 1. Pp. 149–185. 2000.

References

1. Oficijny`j sajt AT «Ukrtransgaz». Rezhy`m dostupu: <http://utg.ua/utg/about-company/utg-today.html>

2. Tuxbatully`n F. G., Korolenok A. M., Koloty`lov Yu. V. Realy`zacy`ya efekty`vnoj raboty kompressornoj stancy`y` s soblyudeny`em pry`ncy`pov promyshlennoj bezopasnosty` technogennyx ob`yektov // Terry`tory`ya «Neftegaz». 2015. # 6. S.110 – 112.

3. Al`xajek R., Udovenko S.G., Shamraev A.A. Opty`my`zacy`ya rezhy`mov avtomaty`cheskogo upravleny`ya kompressorny`m stancy`yamy` magy`stral`nyx gazoprovodov // Avtomaty`zuy`rovannyye sy`stemy upravleny`ya y` pry`bory avtomaty`ky`. 2011. S. 29 – 35.

4. Leshhenko I. Ch. Postanovka zadachi opty`mizaciyi rezhy`miv roboty` cexiv kompresorny`x stancij magistral`ny`x gazoprovodiv // Problemy` zagal`noyi energety`ky`. 2006. #13. S. 67 – 70.

5. Ob odnoj strategy`y` opty`my`zacy`y` rezhy`mov raboty gazotransportnyx sy`stem. A. D. Tevyashev, O. A. Tevyasheva, V. S.

Smy`nova, V. A. Frolov // Vostochno-Evropejsky`j zhurnal peredovykh technology`j. 2010. #15 s. 94-98.

6. Kry`vonosov A., Xary`tonov A., Guly`chev V. Sy`stema upravleny`ya gazoperekachy`vayushhy`my` agregatamy` // STA. 2/97. S. 66-68.

7. Gorbijchuk M. I., Lazoriv A. M., Lucyuk I. I. Algori`tmny` opty`mal`nogo keruvannya procesom kompry`muvannya pry`rodnogo gazu // Naftogazova enogrety`ka. Vseukrayins`ky`j naukovy`-texnichny`j zhurnal. 2011. # 2(15). S. 48–56.

8. Tu Dzh., Gonsales R. Pry`ncy`py raspoznavany`ya obrazov; per. s angl. M.: 1978. 411 s.

9. Mirzoyeva O. Yu. Analiz isnuuyuchy`x metodiv modelej texnichny`x zasobiv kontrolyu vy`ky`div shkidly`vy`x rechovy`n z kamery` zgorannya // Visny`k KrNU imeni My`xajla Ostrograds`kogo. Vy`pusk 3/2017 (104). Chasty`na 1. S. 100 – 105.

10. Gorbijchuk M. I., Bila O. T. Opty`mal`ny`j rozpodil paralel`no pracyuyuchy`x agregativ z vraxuvannyam ekologichny`x podatkov v umovax nevy`znachenosti // Naukovy`j visny`k Ivano-Frankivs`kogo nacional`nogo texnichnogo universy`tetu nafty` i gazu. 2019. # 1 (46). S. 35 – 45.

11. Algori`tmichne ta programne zabezpechennya komp'yuternoyi sy`stemy` vy`boru opty`mal`noyi kil`kosti paralel`no pracyuyuchy`x nagnitachiv pry`rodnogo gazu / M.I.Gorbijchuk, O. T. Bila, B. V. Pashkovs`ky`j, N. T. Lazoriv // Metody` ta pry`lady` kontrolyu yakosti. Ivano-Frankivs`k: IFNTUNG, 2019. #1(42). S. 47-56.

12. My`trofanov V. A. Zakonomernosty` obrazovany`ya vrednykh veshhestv y` povesheny`e ekology`chnosty` GTD: avtoref. dy`ss. kand. texn. nauk. SPb 2000. 18 s.

13. Gorbijchuk M., Pashkovskiy B., Moysenko O., Sabat N. Solution of the optimization problem of the control over operation of gas pumping units under fuzzy conditions // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information technology. Industry control system. 2017. Vol. 5, No 2(89). Rr. 65 – 71.

14. Rasky`n L. G., Seraya O. V. Nechetkaya matematy`ka. Osnovy teory`y`. Pry`lozheny`ya; monografy`ya. Xar`kov: Parus, 2008. 352 s.

15. Sy`gal Y`. X., Y`vanova A. P. Vvedeny`e v pry`kladnoe dy`skretnoe programmy`rovany`e: modely` y` vychy`sly`tel`nye algori`tmy. M.: Fy`zmatly`t, 2002. 240 s.

16. Gorbijchuk M. I., Bila O. T., Slabinoha M. O., Humeniuk T. V. Optimization Natural Gas Pumping Units Operation by the Economic Criterion in the Conditions of Uncertainty // 7th International Conference on Modeling, Development and Strategic Management of Economic System (MDSMES 2019). R. 47 – 52.

17. Gorbijchuk Mikhail I., Medvedchuk Vera M., Lazoriv Alla N. Analysis of Parallel Algorithm of Empirical Models Synthesis on Principles of Genetic Algorithms Journal of Automation and Information Sciences. – vol. 48, is. 2. – P. 54 -73.

18. Il`chenko B. S. Diagnostuvannya funkcional`no-texnichnogo stanu gazoperekachuval`ny`x aregativ: monografiya. X.: Xark. nac. akad. mis`k. gosp-va. XNAMG, 2011. – 228 s.

19. Kompresorni stanciyi. Kontrol` teplotexnichny`x ta ekologichny`x xaraktery`sty`k gazoperekachuval`ny`x agregativ: SOU 60.3-30019801-011:2004. [Chy`nny`j vid. 22.12.2004]. K.: DK Ukrtransgaz. 117 s.

20. Byrd, R.H., Gilbert J. C., Nocedal J. A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming // Mathematical Programming. Vol 89, No. 1. Rp. 149–185. 2000.

УДК 681.3.06

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108

АЛГОРИТМ НАЛАШТУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В. М. Гарасимів

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: viraharasymiv78@gmail.com

У статті запропоновано алгоритм налаштування пропорційного, інтегрального та диференціального коефіцієнтів ПІД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки, яка базується на логічно-лінгвістичних моделях представлення знань та є ефективним засобом створення інтелектуальних систем керування складними динамічними об'єктами промисловості в умовах невизначеності.

Завдяки проведеному порівняльному аналізу використання алгоритму налаштування основних коефіцієнтів з використанням нечіткої логіки для ПІД-регулятора та алгоритму налаштування коефіцієнтів методом спроб та помилок встановлено, що використання нечіткої логіки покращує якість перехідного процесу, а саме зменшує перерегулювання та швидкість збіжності. Також перевагою використання нечіткої логіки є те, що коефіцієнти ПІД-регулятора можуть змінювати свої значення у відповідності зі зміною умов функціонування об'єкта керування, що покращує адаптивні властивості автоматичної системи керування.

Розроблено структуру автоматичної системи керування на базі нечіткого ПІД-регулятора, основними компонентами якої є нечіткий ПІД-регулятор та передавальна функція об'єкта керування. Нечіткий ПІД-регулятор складається з таких основних компонентів: блок фазифікації, бази правил та блоку дефазифікації. Така структура автоматичної системи керування не потребує спеціальних засобів ідентифікації параметрів газотурбінного двигуна та її реалізація за допомогою сучасних мікроконтролерів є досить простою та доступною.

Експериментальна перевірка розробленого алгоритму налаштування коефіцієнтів нечіткого ПІД-регулятора здійснювалась на основі характеристик газотурбінного двигуна ДГ90Л2 потужністю 16МВт газоперекачувального агрегату ГПА-Ц1-16С/76-1.44, який встановлено на КС-3 відцентрового нагнітача природного газу 16 ГЦ2-395/53-76С у Долинському лінійному виробничому управлінні магістральними газопроводами.

Ключові слова: алгоритм; ПІД-регулятор; нечітка логіка; перехідний процес; перерегулювання; швидкість збіжності; об'єкт керування; автоматична система керування; ідентифікація; газотурбінний двигун.

В статті пропозован алгоритм настройки пропорционального, интегрального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора с использованием методов нечеткой логики, основанной на логически-лингвистических моделях представления знаний и является эффективным средством создания интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами промышленности в условиях неопределенности.

Благодаря проведенного сравнительного анализа использования алгоритма настройки основных коэффициентов с использованием нечеткой логики для ПИД-регулятора и алгоритма настройки коэффициентов методом проб и ошибок установлено, что использование нечеткой логики улучшает качество переходного процесса, а именно уменьшает перерегулирование и скорость сходимости. Также преимуществом использования нечеткой логики является то, что коэффициенты ПИД-регулятора могут изменять свои значения в соответствии с изменением условий функционирования объекта управления, улучшает адаптивные свойства автоматической системы управления.

Разработана структура автоматической системы управления на базе нечеткого ПИД-регулятора, основными компонентами которой являются нечеткий ПИД-регулятор и передаточная функция объекта управления. Нечеткий ПИД-регулятор состоит из следующих основных компонентов: блок фазификации, базы правил и блока дефазификации. Такая структура автоматической системы управления не требует специальных средств идентификации параметров газотурбинного двигателя и его реализация с помощью современных микроконтроллеров является довольно простой и доступной.

Экспериментальная проверка разработанного алгоритма настройки коэффициентов нечеткого ПИД-регулятора осуществлялась на основе характеристик газотурбинного двигателя ДГ90Л2 мощностью 16МВт

газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц1-16С/76-1.44, который установлен на КС-3 центробежного нагнетателя природного газа 16 ГЦ2-395/53-76С в Долинском линейном производственном управлении магистральными газопроводами.

Ключевые слова: алгоритм; ПИД-регулятор, нечеткая логика; переходный процесс, перерегулирование, скорость сходимости, объект управления; автоматическая система управления; идентификация; газотурбинный двигатель.

The fuzzy PID tuning algorithm of proportional, integral, and derivative terms based on the fuzzy logic has been developed in the article. The fuzzy logic focuses on logic-linguistic models of representation of knowledges and it is the effective technology for creation of intellectual control systems of complex dynamic objects in the incomplete conditions.

It has been researched that the fuzzy tuning algorithm of the basic coefficients for the PID controller compared with the tuning algorithm based on the trial and error method, improved the quality of the of the transient process, namely reduces the overshoot and the settling time. Another advantage of the fuzzy PID tuning algorithm is that the PID controller coefficients can change their values in accordance with changing conditions of operation control object, which improves the adaptive properties of the automatic control system.

The structure of the automatic control system based on the fuzzy PID controller has been developed, the main components of which are the fuzzy PID controller and the transfer function of the control object. The fuzzy PID controller consists of the following main components: the fuzzyfication unit, the rule base and the defuzzyfication unit. This structure of the automatic control system does not require special means of identifying the parameters of the turboshaft engine and its implementation using modern microcontrollers is quite simple and affordable.

The fuzzy PID tuning algorithm has been tested with using the parameters of the turboshaft engine ДГ90Л2 with power 16MW of the compressor 16 ГЦ2-395/53-76С of Dolyzna linear production administration of gas transmittal pipelines.

Keywords: algorithm, PID controller, fuzzy logic, transient process, overshoot, settling time, control object, automatic control system, identifying, turboshaft engine.

ПІД (пропорційно-інтегрально-диференційний) регулятор являється основним інструментом автоматизації виробництва завдяки простоті проектування, невеликій вартості та високій ефективності використання. Класичний ПІД-регулятор [1] складається із трьох основних коефіцієнтів: пропорційний K_p , інтегральний K_i та диференціальний K_d коефіцієнти, які є основою для ефективного налаштування регулятора:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

де $u(t)$ - керуючий сигнал;

$e(t)$ - похибка керування між заданим та отриманим виходом;

T_i - стала інтегрування;

T_d - стала диференціювання.

Оскільки класичний ПІД-регулятор являється лінійною коректуючою ланкою, він не може бути ефективним при керуванні об'єктами з істотно вираженою нелінійністю та невідомими параметрами. Тому в останні роки

інтенсивно розвиваються нелінійні модифікації ПІД-регуляторів на базі нейромережових та нечітких технологій.

Аналіз літературних джерел

Для ефективного використання ПІД-регулятор повинен бути коректно налаштованим на динаміку процесу керування. Якщо підібрати стандартні значення коефіцієнтів налаштування регулятора, то отримати бажаний результат складно, часто перехідна характеристика стає нестабільною, а характеристики якості керування незадовільними.

У роботі [2] автором запропонований простий метод спроб і помилок, який полягає в тому, що налаштування коефіцієнтів регулятора виконується під час роботи самого регулятора чи об'єкта керування (ОК). Спочатку значення коефіцієнтів K_i та K_d рівні нулю, а значення коефіцієнта K_p збільшується поки перехідна характеристика не досягне коливальної поведінки. Тоді регулюється значення коефіцієнта K_i для зупинки коливань та коефіцієнта K_d для отримання швидкого

відгуку. В залежності від того, яка поведінка системи з підібраними коефіцієнтами, залишаємо отримані значення коефіцієнтів чи знову повторяємо експеримент. Даний метод є можливим для використання, проте підібрати коефіцієнти такими, щоб отримати оптимальний результат керування є досить складно і у більшості випадків неможливим.

Метод Зіглера-Нікольса є більш поширеним методом налаштування коефіцієнтів регулятора. Слід зауважити, що даний метод не підходить для будь-якого ОК, отримані результати не є самі оптимальні. Проте, даний метод є досить простим і використовується для базового налаштування регулятора для більшості ОК [3].

Основна частина

Як ОК вибираємо газотурбінний двигун ДГ90Л2 потужністю 16МВт газоперекачувального агрегату ГПА-Ц1-16С/76-1.44, який встановлено на КС-3 у Долинському лінійному виробничому управлінні магістральними газопроводами. Характеристики двигуна наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 Характеристики газотурбінного двигуна

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Максимальна частота обертання n_{max}	об/с	2000
Номінальна частота обертання, n	об/с	1420
Мінімальна частота обертання, n_{min}	об/с	200
Масова витрата палива при номінальній частоті обертання, G_t	кг/с	0,009
Постійна часу двигуна, T_d	с	1,45
Транспортне запізнення, τ	с	0,04
Напруга на електродвигуні насосу, V_n	В	10
Максимальна витрата палива через насос, G_N	кг/с	0,02
Постійна часу насосу, $T_{нд}$	с	0,2

Для синтезу ПД-регулятора запишемо передавальну функцію ОК:

$$W_{OK}(s) = K_{II} \cdot W_{нд}(s) \cdot W_d(s), \quad (2)$$

де K_{II} - коефіцієнт підсилення,

$W_{нд}(s)$ - передавальна функція насоса-дозатора,

$W_d(s)$ - передавальна функція газотурбінного двигуна.

Коефіцієнт підсилення K_{II} визначається за формулою:

$$K_{II} = \frac{V_n}{n_{max}} = \frac{10}{2000} = 0,005. \quad (3)$$

Передавальну функцію насоса-дозатора запишемо у такому вигляді:

$$W_{нд}(s) = \frac{K_{нд}}{T_{нд}s + 1}, \quad (4)$$

$$\text{де } K_{нд} = \frac{G_N}{V_n} = \frac{0,02}{10} = 0,002.$$

Тоді

$$W_{нд}(s) = \frac{0,002}{0,2s + 1}. \quad (5)$$

Передавальну функцію газотурбінного двигуна запишемо у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [4-5]:

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad (6)$$

$$\text{де } K_d = \frac{n}{G_t} = \frac{1420}{0,009} = 157777.$$

Тоді

$$W_d(s) = \frac{157777}{1,45s + 1}. \quad (7)$$

Підставивши залежності (3), (5) та (7) у формулу (2) отримали передавальну функцію ОК:

$$W_{ок}(s) = 0,005 \cdot \frac{0,002 \cdot 157777}{0,2s+1} \cdot \frac{1,587}{1,45s+1} \approx \frac{1,587}{0,29s^2 + 1,65s + 1} \quad (8)$$

Від значень величин K_p , K_i та K_d або K_p , T_i та T_d залежить форма і вид кривої, що відповідає перехідному процесу. Знаходження алгоритму налаштування регулятора є досить складною процедурою, тому використаємо алгоритм запропонований автором *Zhrn-Yu Zhao* у статті “*Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers*” [6].

Постійну інтегрування визначаємо таким чином:

налаштування ПІД-регулятора визначимо згідно рекомендацій [6]:

$$K_p = (K_{p_{max}} - K_{p_{min}})K'_p + K_{p_{min}} \quad (10)$$

$$K_d = (K_{d_{max}} - K_{d_{min}})K'_d + K_{d_{min}} \quad (11)$$

де $K_{p_{max}}$ та $K_{p_{min}}$ - максимальне та мінімальне значення коефіцієнта K_p ;

$K_{d_{max}}$ та $K_{d_{min}}$ - максимальне та мінімальне значення коефіцієнта K_d .

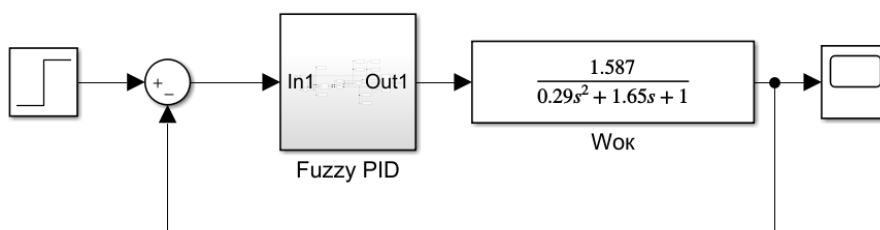


Рисунок 1 – Структура автоматичної системи керування на базі

$$T_i = \alpha T_d \quad (9)$$

де α - коефіцієнт, отриманий експериментально [7]. Звідси інтегральна складова визначається

таким чином:

$$K_{p_{min}} = 0.32K_u, K_{p_{max}} = 0.6K_u,$$

$$K_{d_{min}} = 0.08K_u T_u, K_{d_{max}} = 0.15K_u T_u.$$

де K_u та T_u - це відповідно коефіцієнт та період критичних коливань.

Для синтезу нечіткого ПІД-регулятора

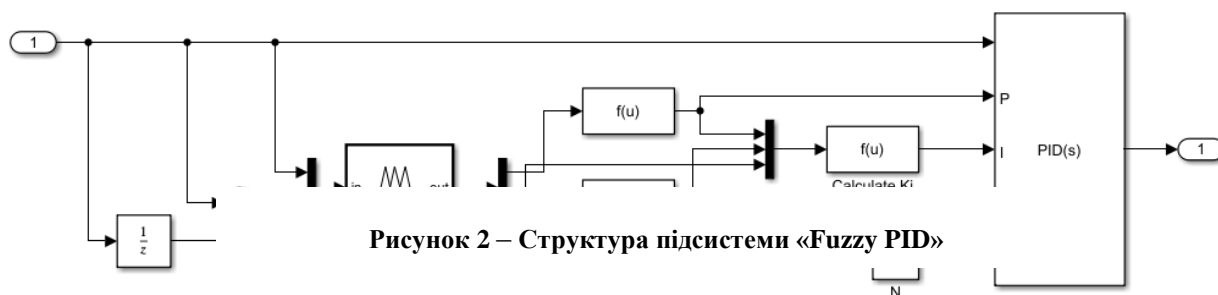


Рисунок 2 – Структура підсистеми «Fuzzy PID»

$$K_i = K_p / (\alpha T_d) = K_p^2 / (\alpha K_d).$$

Введемо коефіцієнти K_p' та K_d' , які визначатимемо за допомогою нечіткої бази правил, яка складена експертами. Коефіцієнти

використовуємо блоки стандартної бібліотеки

Simulink (рис. 1). Блок «Fuzzy PID» представляє собою підсистему, яка показана на рисунку 2. Нечіткий ПІД-регулятор має входні змінні – похибка керування $e(t)$ та різниця між її

першим та наступним значенням $\Delta e(t)$ та вихідну змінну – керуючий сигнал $u(t)$.

Нечіткий ПД-регулятор складається з таких основних компонентів: блок фазифікації, бази правил та блоку дефазифікації. Таким чином, під час його проектування необхідно вибрати його вхідні та вихідні змінні, визначити їх лівістичний опис та скласти нечіткі логічні правила для опису закону керування.

Вхідними змінними нечіткого ПД-регулятора є значення поточної похибки керування $e(t)$ та її різниці від свого попереднього значення $\Delta e(t)$. Для опису вхідних змінних використано сім термів: *PB* – позитивно великий, *PM* – позитивно середній, *PS* – позитивно малий, *ZO* – нульовий, *NS* – негативно малий, *NM* – негативно середній, *NB* – негативно великий (рис. 3). Функції належності мають трикутну, S- та Z-подібну форми. Такі форми функцій належності прості, що зменшує затрати часу під час розрахунків.

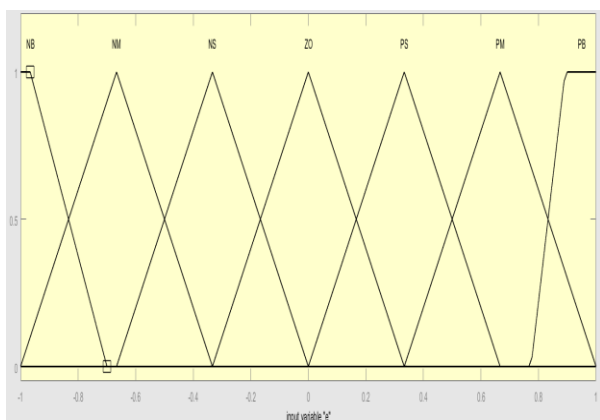


Рисунок 3 – Функції належності вхідних змінних $e(t)$ та $\Delta e(t)$

Вихідними змінними є коефіцієнти K_p' , K_d' та α . Змінні K_p' та K_d' описуються двома термами Big та Small (рис.4), функції належності яких можна записати так:

$$\mu_{Small}(x) = -\frac{1}{4} \ln x \quad \text{або} \quad x_{Small}(\mu) = e^{-4\mu},$$

$$\mu_{Big}(x) = -\frac{1}{4} \ln(1-x) \quad \text{або} \quad x_{Big}(\mu) = 1 - e^{-4\mu}.$$

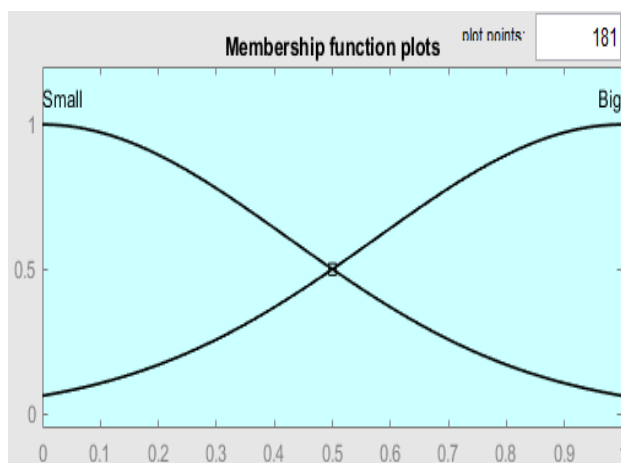


Рисунок 4 – Функції належності вихідних змінних K_p' та K_d'

Змінна α описується чотирма термами: *S* – малий, *MS* – середньо малий, *M* – середній, *B* – великий.

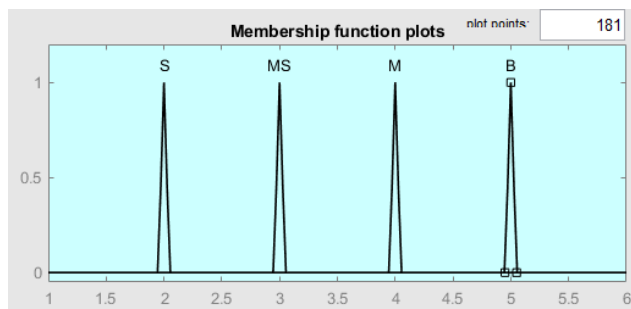


Рисунок 5 – Функції належності вихідних змінної α

Нечітка база правил, яка була сформована на основі думки експертів [6], представлена на в таблицях 2-4.

Значення вихідних змінних K_p' , K_d' та α було визначено за алгоритмом Мамдані [8]. В результаті значення коефіцієнтів налаштування ПД-регулятора визначалися за такими формулами:

$$K_p = (K_{p_{max}} - K_{p_{min}})K_p' + K_{p_{min}}, \quad (12)$$

$$K_d = (K_{d_{max}} - K_{d_{min}})K_d' + K_{d_{min}}, \quad (13)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d). \quad (14)$$

Таблиця 2 Нечітка база правил для визначення величини K_p'

		$\Delta e(t)$							
$e(t)$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
	NB	B	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S	
	NS	S	S	B	B	B	S	S	
	ZO	S	S	S	B	S	S	S	
	PS	S	S	B	B	B	S	S	
	PM	S	B	B	B	B	B	S	
	PB	B	B	B	B	B	B	B	

Таблиця 3 Нечітка база правил для визначення величини K_d'

		$\Delta e(t)$						
$e(t)$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

Таблиця 4 Нечітка база правил для визначення величини α

		$\Delta e(t)$						
$e(t)$		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

На рисунку 6 наведені результати досліджень в програмному середовищі Matlab класичного ПД-регулятора та нечіткого ПД-регулятора. Використання нечіткого ПД-регулятора є ефективнішим у порівнянні з стандартним ПД-регулятором, так як нечіткий ПД-регулятор забезпечує кращі показники якості процесу керування: швидкість збіжності та перерегулювання.

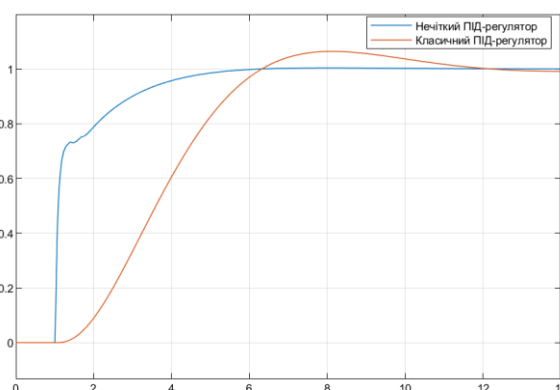


Рисунок 5 – Перехідна характеристика ОК при використанні класичного та нечіткого ПД-регулятора

Висновки

Для оптимізації роботи ПД-регулятора для ОК, який працює в умовах невизначеності та піддається випадковим впливам, запропоновано алгоритм налаштування основних коефіцієнтів ПД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки.

Показано, що запропонована автоматична система керування на базі нечіткого ПД-регулятора забезпечує кращі показники якості перехідного процесу, ніж автоматична система керування із використанням класичного ПД-регулятора.

Література

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Санкт-Петербург : изд-во Профессия, 2003. 752 с.
2. Лорія М.Г., Поркуян О.В., Ананьєв М.В., Целіщев О.Б. Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем управління технологічними об'єктами : монографія. Сєвєродонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. 192 с.
3. Іванов А.О. Теорія автоматичного керування : підручник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. 250 с.
4. Гимадиев А.Г., Крючков А.Н., Быстров Н.Д., Ермилов М.А. Исследование переходных и частотных характеристик типовых звеньев

SAR : метод. Указання. Самара : изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 52 с.

5. Гарасимів В. М., Гарасимів Т. Г., Мойсенко О. В. Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу на основі нечіткої логіки. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1 (40). С. 70–78.

6. Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transaction on Sysyem, Man and Cybernetics*, 1993. Vol. 23. N 5. P. 1392-1398.

7. Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М. Синтез нечеткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы Matlab : методическое пособие. Самара : изд-во самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2016. 59 с.

References

1. Besekerskiy V.A., Popov O.P. Teoriya system avtomatychnoho upravlinnya. Sankt-Peterburh: yzd-vo Profesiya, 2003. 752 s.

2. Loriya M.H., Porkuyan O.V., Anan'yev M.V., Tselishchev O.B. Optimal'ni Nastroyuvannya rehulyatoriv promyslovykh system upravlinnya tekhnolohichnymy ob'yektamy: monohrafiya.

Syevyerodonets'k: vyd-vo SNU im. V. Dalya, 2019. 192 s.

3. Ivanov A.O. Teoriya avtomatychnoho keruvannya: pidruchnyk. Dnipropetrovs'k: Natsional'nyy hirnichniy universytet, 2003. 250 s.

4. Himadiev A.H., Kryuchkov A.N., Bystrov N.D., Yermilov M.A. Doslidzhennya perekhidnykh i chastotnykh kharakterystyk typovykh lanok SAR: metod. Vkazivky. Samara: vyd-vo Samar. derzh. aerokosm. un-tu, 2013. 52 s

5. Harasymiv V. M., Harasymiv T. H., Moyseneko O. V. Systema otsinyuvannya tekhnichnoho stanu protochnoyi chasty dvostupenevykh nahnitacha pryrodnoho hazu na osnove nechitkoyi lohiky. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2018. № 1 (40). S. 70-78.

6. Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transaction on Sysyem, Man and Cybernetics*, 1993. Vol. 23. N 5. P. 1392-1398.

7. Kuznetsov A.V., Makar'yants H.M. Syntez nechitkoho rehulyatora za dopomohoyu paketu prykladnykh prohram systemy Matlab: metodychnyy posibnyk. Samara: vyd-vo samar. derzh. aerokosm. un-tu, 2016. 59 s.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 004.051

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-109-118

РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІТИЧНИХ МЕРЕЖ

**В.А. Ровінський¹, О.В. Євчук²*

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

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

Пропонується спосіб синтезу числових моделей для нелінійних систем збільшеної складності за відомими їх вхідними та вихідними сигналами, знятими синхронно, на основі аналітичних мереж. Функціонування запропонованих аналітичних мереж ґрунтується на використанні модифікованого генетичного алгоритму та бібліотеки блоків незмінної функціональності. Запропоновано структуру генотипу та алгоритми мутацій для представлення структури і параметрів аналітичної мережі. Крім того, розглянуті способи моделювання складних нелінійних систем за допомогою рядів Вольтерра, Вінера-Гаммерштейна, адаптивних фільтрів, нелінійної моделі авторегресивного ковзного середнього з екзогенними входами, нейромереж та генетичних алгоритмів, і визначені основні проблеми, що виникають при користуванні цими моделями. Показаний практичний приклад можливості застосування аналітичної мережі на прикладі ресинтезу синтезатора звукових сигналів. Розглянута типова схема такого синтезатора. Розглянута можлива схема ресинтезованої системи на базі аналітичної мережі, що функціонально є максимально подібною до необхідної. Показана можливість автоматичної побудови числової моделі реакції механічної системи на вхідні збурення за відомими вхідними і вихідними сигналами, записаними синхронно. Розглянуті основні складності ресинтезу складних систем для звуковідтворення – показаний вплив психоакустичних явищ на сприйняття результатів синтезу і потреба забезпечення високої точності відтворення для одержання адекватних результатів. Запропонована структура типових блоків аналітичної мережі, які повинні включати в себе типові перетворення цифрової обробки сигналів, арифметичні та логічні операції, блоки кореляції та компаратори, гістерезисні компоненти та додатково типові імовірні стандартні блоки системи, яка ресинтезується.

Ключові слова: *аналітичні мережа; генетичний алгоритм; нейромережа; електронна система.*

Предлагается способ синтеза численных моделей для нелинейных систем увеличенной сложности на основе аналитических сетей по известным их входным и выходным сигналами, снятыми синхронно. Функционирование предложенных аналитических сетей основывается на использовании модифицированного генетического алгоритма и библиотеки блоков неизменной функциональности. Предложена структура генотипа и алгоритмы мутаций для представления структуры и параметров аналитической сети. Кроме того, рассмотрены способы моделирования сложных нелинейных систем с помощью рядов Вольтерра, Винера-Гаммерштейна, адаптивных фильтров, нелинейной модели авторегрессивного скользящего среднего с экзогенными входами, нейросетей и генетических алгоритмов, и определены основные проблемы, возникающие при использовании этими моделями. Показан практический пример возможности применения аналитической сети на примере ресинтеза синтезатора звуковых сигналов. Рассмотрена типовая схема такого синтезатора. Рассмотрена возможная схема ресинтезированной системы на базе аналитической сети, функционально максимально подобной требуемой. Показана возможность автоматического построения числовой модели реакции нелинейной механической системы на входные возмущения по известным входным и выходным сигналами, записанным синхронно. Рассмотрены основные сложности ресинтеза сложных систем для звуковоспроизведения - показано влияние психоакустических явлений на восприятие результатов синтеза и потребность обеспечения высокой точности воспроизведения для получения адекватных результатов. Предложена структура типичных блоков аналитической сети,

которые должны включать в себя типичные преобразования цифровой обработки сигналов, арифметические и логические операции, блоки корреляции и сравнения, гистерезисные компоненты и дополнительно, типичные возможные стандартные блоки системы, которая подвергается ресинтезу.

Ключевые слова: аналитическая; сеть, генетический алгоритм, нейросеть, электронная система.

A method for the synthesis of numerical models based on analytical networks for nonlinear systems of increased complexity using their known input and output signals taken synchronously is proposed. The functioning of the proposed analytical networks is based on the use of a modified genetic algorithm and a library of blocks of constant functionality. Genotype structure and mutation algorithms are proposed for describing an analytical network. In addition, methods for modeling complex non-linear systems using the Volterra, Wiener-Hammerstein series, adaptive filters, non-linear model of an autoregressive moving average with exogenous inputs, neural networks and genetic algorithms are considered, and the main problems that arise when using these models are identified. A practical example of the possibility of using the analytical network is shown on the example of the resynthesis of a sound synthesizer. A typical diagram of such a synthesizer is described. A possible scheme of a re-synthesized system based on an analytical network that is functionally as similar as possible to desired system is considered. The possibility of automatically constructing a numerical model of the reaction of a nonlinear mechanical system to input disturbances using known input and output signals recorded synchronously is shown. The main difficulties of the resynthesis of complex systems for sound reproduction are considered - the influence of psychoacoustic phenomena on the perception of synthesis results and the need to ensure high fidelity for obtaining adequate results are shown. The structure of typical blocks of the analytical network is proposed, which should include typical conversions used in digital signal processing, arithmetic and logical operations, correlation and comparison blocks, hysteresis components, and in addition, typical possible standard blocks of a system that undergoes resynthesis.

Keywords: analytical network, genetic algorithm, neural network, electronic system.

Аналіз останніх публікацій. Для ідентифікації нелінійних систем використовують різні форми блочно-структурованих нелінійних моделей. [6] [7] Модель Гаммерштейна складається із статичного нелінійного елемента, за яким слідує лінійний динамічний елемент. [8] Модель Вінера має протилежну до цієї комбінацію, тобто лінійний елемент знаходиться перед елементом із статичною нелінійною характеристикою [9]. Модель Вінера-Гаммерштейна складається із статичного нелінійного елемента, розміщеного між двома динамічними лінійними елементами. Модель Урисона [10] [11] відрізняється від інших блочних моделей тим, що вона не складається з послідовних лінійних і нелінійних блоків, але описує як динамічні, так і статичні нелінійності у вигляді ядра оператора [12]. Всі ці моделі можуть бути представлені як різновид рядів Вольтерра, але в цьому випадку ядра Вольтерра приймають особливий вигляд в кожному випадку. Ідентифікація системи полягає у використанні методів кореляції та оцінки параметрів нелінійних функцій. Методи кореляції використовують певні властивості систем, що потребують ідентифікації, що означає, що у разі, коли використовуються

спеціальні вхідні дані (нерідко «білий» шум), окремі елементи можуть бути ідентифіковані тільки по одному за раз. Це призводить до потреби управління обмеженнями до вхідних даних, і окремі блоки, які ідентифікуються, можуть бути пов'язані з компонентами в досліджуваній системі.

Коли система нелінійна і динамічна, представлення може бути отримане, використовуючи поняття з багатоструктурних форм реалізації та результатів диференціальної геометрії, що переходять в нелінійний різницевий вираз:

$$y(k) = \frac{F_1[y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u), \varepsilon(t-1), \dots, \varepsilon(t-n_e)]}{F_2[y(t-1), \dots, y(t-n_d), u(t-1), \dots, u(t-n_d), \varepsilon(t-1), \dots, \varepsilon(t-n_d)]} = \frac{\sum_{j=1}^{num} \theta_{nj} \phi_{nj}(t)}{\sum_{j=1}^{den} \theta_{dj} \phi_{dj}(t)} \quad (1)$$

де $F[\cdot]$ – нелінійна функція, $y(t)$ – вихідний сигнал, $u(t)$ – вхідний сигнал, $t \in 0, 1, 2, \dots$ - часовий крок, n_* – затримка, θ_* – вектор параметрів, ϕ_* – може бути довільною нелінійною функцією. Оскільки вираз (1) нелінійний з точки зору параметрів,

стандартний алгоритм найменших квадратів не може використовуватися безпосередньо.

Розширяючи рівняння (1) як поліноми і вводячи заміни:

$$\tilde{y}(t) = F_1(\cdot) - y(t)[F_2(\cdot) - \theta_{d1}\phi_{d1}(t)] = \sum_{j=1}^{num} \theta_{nj}\phi_{nj}(t) - \sum_{j=1}^{nden} \theta_{dj}\phi_{dj}(t) = \phi^T(t)\theta \quad (2)$$

де:

$$\tilde{y}(t) = y(t)\theta_{d1}\phi_{d1}(t),$$

$$\theta = [\theta_{n1}, \dots, \theta_{num}, \theta_{d2}, \dots, \theta_{nden}]^T$$

$$\phi(t) = [\phi_{n1}(t), \dots, \phi_{num}(t), -y(t)\phi_{d2}(t), \dots, -y(t)\phi_{nden}(t)]^T$$

Якщо дано $\theta_{d1} = \phi_{d1}(t) = 1$, то рівняння (2) можна переписати наступним чином:

$$y(t) = \phi^T(t)\theta = \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) + \varepsilon(t)$$

де $\hat{\theta}(t)$ – оцінка істинного параметру θ на часовому кроці t .

Ряди Вольтерра, блок-структуровані моделі та багато нейромережових архітектур можуть бути розглянуті як підмножини моделі NARMAX. Більшість ранніх робіт ґрунтувалася на поліноміальних розширеннях моделі NARMAX. Це досі методи, які широко використовуються, але існують й інші більш складні методи, засновані на вейвлет- та інших сучасних частотно-часових перетвореннях, які були розроблені для опису систем із значною нелінійністю і дуже складних лінійних систем. Велика частка складних нелінійних систем може бути представлена моделлю NARMAX, включаючи і системи з екзотичною поведінкою, таких як хаос, біфуркації тощо. [2]

Виявлення структури є найбільш фундаментальною частиною NARMAX. Однак у моделі часто важливі лише кілька складових, а іншими в тому чи іншому вигляді можна знехтувати, без суттєвої втрати описової властивості. Тому виявлення структури системи, що має на меті вибрати один за одним правильні складові, є критично важливим. Для налаштування параметрів цих складових можна використати алгоритми на основі методу найменших квадратів [2] та його похідних. Ці алгоритми також можуть бути адаптовані для

розпізнавання шаблонів та вибору ознак і надають альтернативу аналізу основних компонентів, але з тією перевагою, що їх функції розкриваються як такі, які легко пов'язані з початковою проблемою.

Подібна задача може розв'язувалась за допомогою технологій ройових алгоритмів [3], прихованих марківських моделей [4], нейромереж [5], клітинних автоматів [6] та генетичних алгоритмів [7]. Проте наявні публікації (наприклад [2]) стосуються переважно налагоджування параметрів/коефіцієнтів існуючих апаратних засобів, без модифікації існуючої структури системи.

Генетичні алгоритми також можуть бути використані для вирішення описаної проблеми. Формалізована задача повинна бути таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді вектора «генів», де кожен ген може бути бітом, числом або складним об'єктом. У типових реалізаціях генетичного алгоритму передбачається, що генотип має фіксовану довжину. Далі, певним чином створюється значна кількість генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням «функції пристосованості», в результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення, яке визначає, наскільки добре фенотип, що ним описується, вирішує поставлене завдання.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Останні результати в описі поведінки нелінійних систем засновані на аналізі їх параметрів і властивостей за допомогою нейронних мереж. До останнього часу була одержана значна кількість позитивних результатів, пов'язана із застосуванням нейромереж, і така реалізація нелінійних систем продовжує поглиблено вивчатися. Головна проблема полягає в тому, що нейромережові методи можна застосовувати лише до дуже особливих форм моделей нелінійних систем і в кожному своєму випадку, в більшості ця форма моделі повинна бути відома до ідентифікації. Таким чином, втрачається сама сутність автоматизованого підходу до ідентифікації систем, коли є можливим створити модель системи в режимі «чорної скриньки». І навіть в цьому випадку, основною складністю

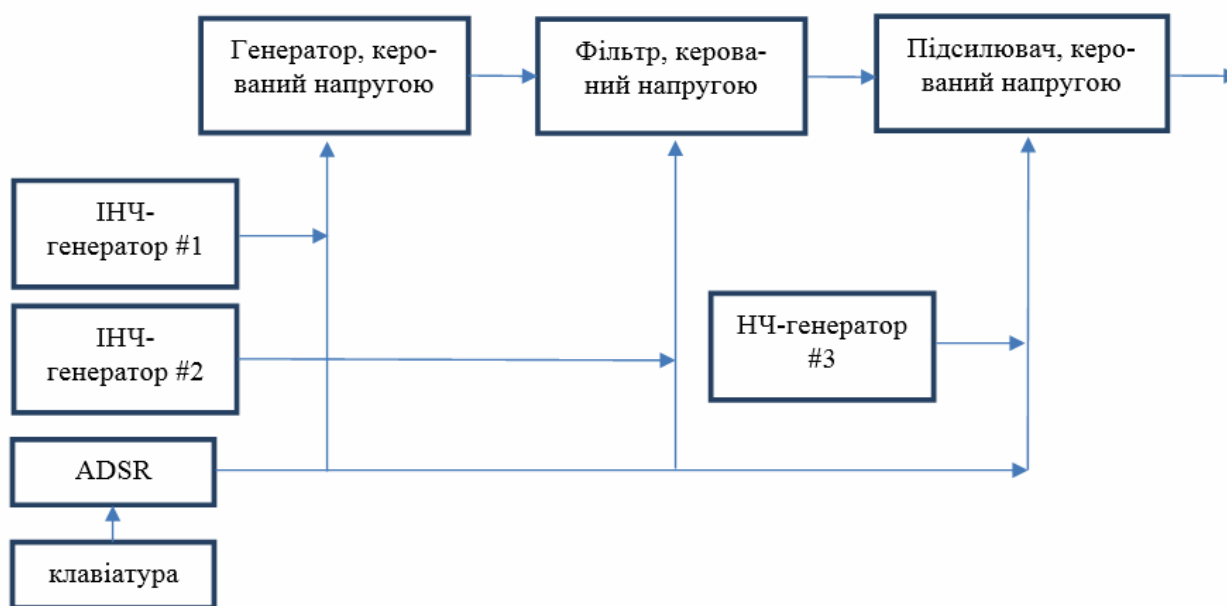


Рисунок 1 – Типова структурна схема одного каналу аналогового синтезатора

вищеописаних методів ресинтезу є необхідність мати уявлення про будову і особливості системи, яка повинна бути відтворена. Виходячи з цього, типова задача ресинтезу систем, вимагає значних обчислювальних ресурсів, у більшості випадків несумісних із практичною можливістю використання таких методів. Тому невирішеною задачею є потреба в суттєвому скороченні машинних обчислювальних ресурсів при використанні таких методів, і потребою формування нового, гібридного метода, придатного для практичного використання. Еволюційні алгоритми можуть бути використані для вирішення такої проблеми.

Мета і завдання досліджень. Метою цієї роботи є розроблення нового гібридного цифрового методу ресинтезу складних нелінійних систем. Під поняттям «аналітична мережа» будемо розглядати колекцію наперед визначених блоків з відомою функціональністю. Завданням автоматичного алгоритму буде пошук невідомої структури системи і її налаштування за заданими значеннями вхідних і вихідних величин.

Основні результати. В якості досліджуваного об'єкту використаний типовий приклад системи цифрової або аналогової обробки сигналів – синтезатор звукових сигналів – апарат для генерації електричного сигналу

заданого тембру і частоти у відповідь на натискання деяких клавіш управління. Приклад структурної схеми аналогового синтезатора наведено на рис.1.

Синтезатор складається з деяких типових блоків. Клавіатура слугує як джерело управляючої інформації. У відповідь на натискання клавіші електронна система синтезатора повинна генерувати електричний сигнал, що описує звук заданого тембру. Керований напругою генератор (у найпростішому випадку один, однак може бути 2, 3 і навіть 4) формує коливання заданої звукової частоти і заданої форми – пілкоподібний, прямокутний, гармонічний, ШІМ, тощо. Вони можуть бути частково розстроєними один відносно іншого за допомогою сигналу зміщення, що надає природності звучання синтезованого звуку. До складу генератора входить також генератор шуму, який дозволяє імітувати шумові складові музичних звуків. Сумарний сигнал, одержаний від генераторів, надходить на вхід фільтра керованого напругою, який забезпечує зміну спектру по частоті. З виходу фільтра сигнал надходить на вхід підсилювача керованого напругою, який формує обвідну сигналу. Керування фільтром та підсилювачем здійснюється за допомогою генераторів (ADSR), які працюють як одинівбратори, формуючи

напругу у відповідь на натискання клавіші на клавіатурі. Форма їх вихідного сигналу визначає час атаки, спадання, утримування та затування після відпускання клавіші. Додатково інфранизькочастотні генератори здійснюють періодичну модуляцію частоти та амплітуди сигналів

Завдання розробки слід формалізувати таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді деякого генного вектора, де кожен ген може бути бітом, числом або складним об'єктом. У стандартних реалізаціях еволюційного алгоритму передбачається, що генотип має однакову і незмінну довжину. Далі, використовуючи певний алгоритм створюється значна кількість генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням фітнес-функції, внаслідок чого, з кожним генотипом співставляється деяке значення, яке визначає, наскільки якісно алгоритм, що ним описується, вирішує поставлене завдання.

З отриманої кількості результатів з врахуванням значення пристосованості вибираються кращі варіанти, до яких застосовуються спеціальні операції, в більшості випадків - схрещування і мутації, результатом чого є отримання нових варіантів. Після чого для них обчислюється значення пристосованості, і потім проводиться відбір рішень, які мають необхідні переваги перед попередніми в наступне покоління.

Цей набір дій повторюється циклічно, і таким чином моделюється еволюційний процес, що триває кілька життєвих часових відрізків, при яких генерується декілька поколінь, аж до поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму. Такими критеріями зупинки, як правило, можуть бути:

- вичерпання часу, відпущеного на еволюцію
- знаходження оптимального, або квазі-оптимального рішення
- закінчення числа поколінь, відпущених на еволюцію
- завершення часу, для поліпшення попереднього результату

Основною проблемою в роботі еволюційних алгоритмів є створення ефективного критерію відбору. Механізм відбору повинен забезпечувати достатню

швидкодію та точність селекції поколінь на основі заданих параметрів.

Використання генетичних алгоритмів в поєднанні із змішаним алгоритмом картезіанського генетичного програмування (Mixed Typed Cartesian Genetic Programming) для генерування структури графа розглядалося, наприклад, в [8], однак оскільки початкова структура графа формувалась випадковим чином, загальний час експерименту для 5000 поколінь при виконанні на розподіленому обчислювальному кластері складав 5 годин. Автори пропонують підвищувати швидкодію шляхом ретельного налаштування параметрів алгоритму. Інший шлях, що пропонується в даній роботі, полягає у використанні інформації про типову структуру системи, де окремі блоки є фіксованими і потребують лише налаштування параметрів, а окремі підмережі є повністю варіативними, тобто для них налаштовуються типи блоків, параметри та зв'язки між ними.

Для автоматичного ресинтезу даного пристрою пропонуються структурні блоки АМ, які можуть містити, за потреби, в своєму складі наступні функціональні вузли:

- генератор коливань (білий шум, керована пилка, керований прямокутник, синус, таблиця програмованих значень);
- математичні операції (+, -, *, /);
- булеві операції (\wedge , \vee , \neg , \oplus);
- фільтри високих та низьких частот Баттерворта, на основі алгоритму нескінченної імпульсної характеристики;
- блок пам'яті для запам'ятовування 1 сек цифрової інформації з можливістю зсуву та довільної вибірки даних;
- компаратор значень;
- корелятор;
- безінерційний нелінійний елемент з можливістю реалізації поліноміальних нелінійностей;
- гістерезисний елемент;
- пряме і зворотне швидке косинусне перетворення;
- звукові ефекти типу хорус (фезер, флейнджер тощо).

Набір вузлів може бути розширений, враховуючи специфіку систем, що потребують ресинтезу.

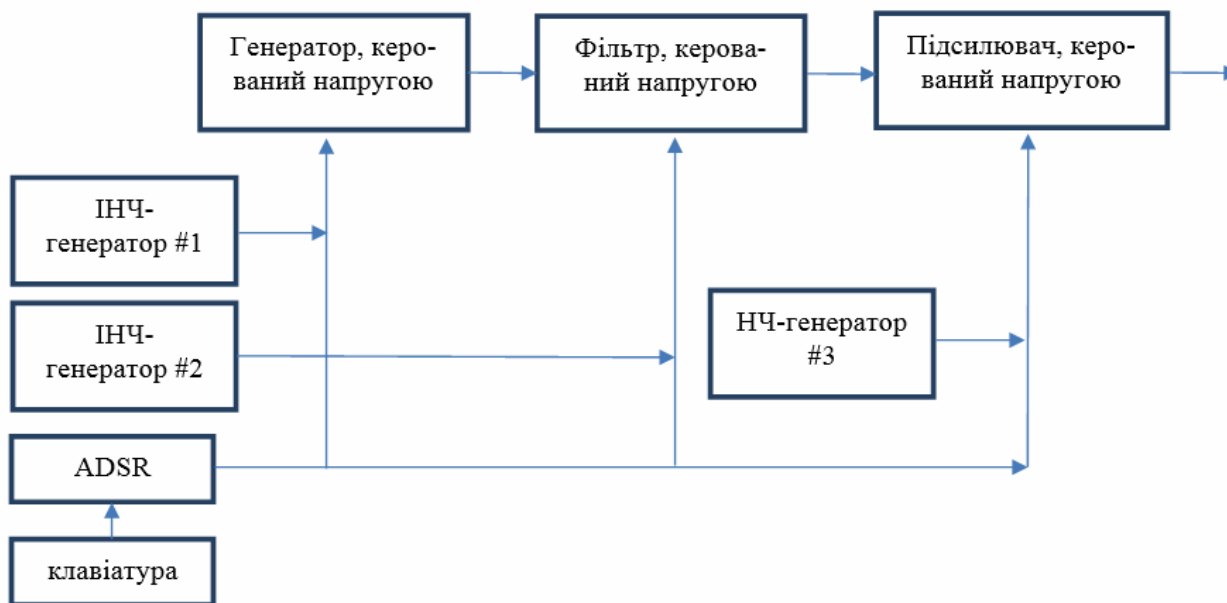


Рисунок 2 – Типова структурна схема ресинтезу одного каналу аналогового синтезатора

Загальна схема ресинтезу системи може мати вигляд, показаний на рис. 2.

Сірим позначені фіксовані блоки, які не можуть змінюватись в процесі генезису. Тут: keyboard – вхідна клавіатура яка є початковим джерелом збудження. ADSR – блок формування сигналів атаки, встановлення, затримки і затухання. Ці сигнали формуються в залежності від того як і з якою швидкістю натиснуті клавіші на клавіатурі, і в залежності від характеру звуку. LFO – блок генератора інфразвукової частоти, який використовується для формування вібрацій звукового сигналу. Filt – керований фільтр, частота зрізу якого і значення резонансу можуть бути змінені. OSC – керований генератор сигналів звукової частоти. Amp – керований підсилювач сигналу. Для таких блоків можуть підбиратись коефіцієнти, проте функціональне призначення блоку не змінюється, тобто, наприклад, генератор залишається генератором, але форма і спектр генерованого сигналу змінюються. Така схема визначає скелетну будову ресинтезованої системи, навколо якого відбувається мінливий підбір структури додаткових підсистем, які реалізують нюанси функціонування, які неможливі у реалізації тільки «скелетною» схемою. Таким чином в процесі адаптивного підбору відбувається фактично автоматичне

вдосконалення початкової скелетної схеми і налаштування її параметрів.

Структура хромосоми для еволюційного алгоритму, відповідно до викладеного, повинна включати як інформацію про структуру системи (типи блоків та зв'язки між ними), так і інформацію про параметри окремих блоків.

Параметри в загальному випадку є дійсними числами. Класичні генетичні алгоритми передбачали формування бітових векторів двійкових представлень цілочислених параметрів, при цьому мутації реалізуються як випадкові заміни бітів, а рекомбінація – як перестановка фрагментів бітових векторів. Подібний метод можна використати і для дійсних параметрів (тобто використовувати двійкові представлення чисел із плаваючою комою), однак це значно погіршує контрольованість процесу мутації (наприклад, зміна одного біту у порядку числа може призвести до непропорційно значних змін параметрів і виходу їх за допустимі межі, а рекомбінація може призводити до "перемішування" бітів різних параметрів, розташованих поруч у хромосомі). Більш ефективно в якості неподільної генетичної одиниці розглядати значення окремого параметру, а мутацію реалізувати як додавання випадкової величини з керованим законом розподілу (наприклад, для нормально

розподіленої величини швидкість мутації буде контролюватися параметром дисперсії закону розподілу). Також доцільно використовувати нормовані значення параметрів, щоб швидкість мутацій кожного із параметрів була приблизно однаковою. Таким чином, процедуру мутації можна описати наступним чином:

$$\bar{C}_M = \bar{C} + \bar{R},$$

де

$$C = \{c_{0,1}; c_{0,2}; \dots c_{0,N_0}; c_{1,0}; c_{1,1}; \dots c_{1,N_1}; \dots c_{m,0}; c_{m,1}; \dots c_{m,N_m}\}$$

- хромосома, утворена із параметрів блоків з номерами 0, 1, ..., m;

N_j – кількість параметрів j-го блоку;

\bar{R} - вектор значень випадкової величини із заданим законом розподілу;

$c_{i,j}$ – i-й параметр j-го блоку, нормований на допустимий діапазон зміни:

$$c = \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

де V – значення параметру, V_{\min} , V_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне значення діапазону допустимої зміни параметру.

Для кодування структури можна використати представлення графу зв'язків на основі матриці інцидентності, матриці суміжності або списку суміжності. Оскільки передбачається, що в більшості випадків матриця інцидентності буде розрідженою (кожен блок може бути з'єднаний по входам максимально із такою кількістю блоків, скільки у нього параметрів, і керує як правило лише одним вихідним блоком або невеликою їх кількістю), доцільно використати матрицю або список суміжностей. У матриці суміжностей рядки і стовпці відповідають вершинам графу, а значення відповідного елемента кодує наявність зв'язку між двома вершинами. Для вирішуваної задачі доцільно за наявності зв'язку призначати елементам не кількість зв'язків між вершинами, як у звичайній матриці суміжності, а значення, що кодують номер параметра, у який входить зв'язок. Тоді кожен рядок матриці буде містити інформацію про те, до яких входів підключений вихід блоку, номер якого дорівнює номеру рядка, а кожен стовпець – інформацію про те, від яких блоків отримуються значення вхідних параметрів. Слід зазначити що така матриця не

буде симетричною, однак дозволяє зберігати інформацію в тому числі про зворотні зв'язки у структурі пристрою. Також важливо, що нумерація входів повинна відлічуватись від 1, оскільки 0 використовується для позначення відсутності зв'язку.

Для прикладу, схема зв'язків між блоками на рис. 3 може бути представлена наступною матрицею:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

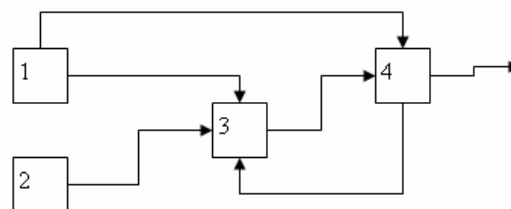


Рисунок 3 – Приклад схеми зв'язків між блоками

Хромосома в такому разі може бути утворена шляхом перетворення такої матриці у вектор-рядок.

Процедура мутації, що призводить до перебудови зв'язків, може бути реалізована шляхом обміну місцями елементів матриці у межах окремих стовпців: обмін ненульових елементів у межах стовпця призводить до зміни порядку подачі сигналів на різні параметри одного блоку, а обмін нульового і ненульового елемента – до зміни джерела сигналу для деякого параметра з одного блоку на інший.

Наприклад, у наведеному вище прикладі можна виконати наступні мутації:

- обмін елементів $M_{0,2}$ та $M_{1,2}$ – призводить до того, що блок 1 буде керувати параметром 2, а блок 2 – параметром 1 блоку 3 (до обміну блок 1 керував параметром 1, а блок 2 – параметром 2);

- обмін елементів $M_{1,3}$ та $M_{2,3}$ – призводить до того, що другий параметр блоку 4 буде керуватися блоком 2, а не блоком 3

Також повинна бути можливість зміни типу блоку в межах існуючої структури. Відповідна

хромосома може містити послідовність числових значень, кожне із яких кодує тип блоку, а процедура мутації передбачатиме випадкову заміну одного типу на інший допустимий тип. Враховуючи необхідність збереження "скелетної" структури пристрою, деякі елементи хромосоми повинні бути фіксованими – тобто тип відповідного блоку не повинен змінюватися, а лише підбиратись його параметри.

Слід зазначити що якщо кількість вхідних параметрів у нового і старого блоку після мутації не співпадає, це призведе також і до зміни структури зв'язків. В свою чергу, зміна структури зв'язків призведе до зміни вектору параметрів. Підсумовуючи вищеописане, можна сформулювати наступні правила:

1) генотип повинен містити три хромосоми, які кодують відповідно типи блоків, структуру зв'язків між блоками та набір параметрів блоків;

2) для кожної із трьох хромосом передбачена окрема процедура мутації;

3) мутації повинні виконуватись узгоджено для збереження інваріанту допустимості отриманої структури, а саме: на першому кроці виконується мутація типів, на другому – мутація структури із врахуванням обмежень, що накладаються в результаті мутації типів, на третьому – мутація параметрів, з попередньою перебудовою вектору параметрів відповідно до змін у структурі.

Процес підбору включає в себе адаптивне формування структури підмереж відомих вузлів навколо скелетної схеми, заданої початково вручну, у випадку, коли частково відома структура пристрою, який необхідно ресинтезувати. Процес циклічно проходить декілька фаз, кількість яких відповідає кількості заданих сигналів. Після додавання нового апаратного блоку X з типом, що можливо можуть застосовуватись поруч із блоками базової схеми, проводиться повне налаштування всіх параметрів для всіх блоків системи, для досягнення максимального співпадіння вихідного сигналу із еталонним. Якщо сигнали не достатньо співпадають, змінюється тип блоку X на інший і проводиться повторне налаштування одержаної системи. Після недосагнення заданого значення співпадіння на корпусі навчальної вибірки одного типу,

приймається рішення про додавання нового блоку в підмережу. Далі процес повторюється, аж до максимального досягнення співпадіння одержаних сигналів з еталонними на всій вибірці. В наступній фазі – спробі синтезу наступного сигналу іншого типу, спочатку змінюються всі параметри синтезованої системи, і в разі, якщо заданими апаратними засобами неможливо відтворити заданий сигнал – починається додавання нових системних вузлів. При цьому старі системні блоки фіксуються і залишаються незмінними в наступному циклі ресинтезу.

Для функції відбору пропонується використати двофазний алгоритм для грубої і точної оцінок одержаного результату. В початковій, наближеній фазі, генерований сигнал порівнюється з еталонним за допомогою мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (МЧКК).

Мел-частотний кепстр - це короткочасний спектр потужності звукового сигналу, що ґрунтується на лінійному косинусному перетворенні логарифмічного спектру потужності, що представлений на нелінійній частотній мел-шкалі.

Мел-частотні кепстральні коефіцієнти - це коефіцієнти, які разом складають мел-частотний кепстр. Різниця між кепстром і мел-частотним кепстром полягає в тому, що в МЧК діапазони частот однаково розташовані на мел-шкалі, яка описує особливості чутливості людської слухової системи більш повно, ніж лінійно розташовані частотні діапазони, що використовуються в нормальному кепстрі [9].

Друга фаза порівняння базована на аналізі різниці спектральних характеристик, одержаних в діапазоні 50Гц – 10кГц. Даний діапазон вибраний як найбільш суттєвий з точки зору різниці тембрів. Така фаза потребує більшу кількість операцій, ніж МЧКК, тому використовується тільки на етапі фінального точного підстроювання регуляторів (управляючих коефіцієнтів) системи.

Реалізація алгоритму роботи аналітичної мережі здійснюється за допомогою управляючого блоку, який здійснює вибір блоків аналітичної мережі та налаштування всіх коефіцієнтів системи. Реалізація такої системи може бути здійснена повністю програмно за допомогою комп'ютера, або за допомогою

масиву цифрових сигнальних процесорів, що реалізують аналітичну мережу, та процесора загального призначення в якості управляючого блоку.

Висновки. В якості засобу цифрового моделювання складних нелінійних систем запропоновано використати аналітичні мережі, що показано на прикладі ресинтезу одного каналу аналогового синтезатора звукових сигналів. В загальному це забезпечить покращену точність при ресинтезі звукових генеративних схем, оскільки під час такого ресинтезу відбувається не тільки підбір параметрів схем, але й динамічне вдосконалення самої схеми генерації. В результаті використання такого підходу можна створювати нові числові моделі для існуючих механічних процесів, представлених синхронним записом вхідних і вихідних параметрів представлених у вигляді великих таблиць.

Література

1. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285,1980
2. Rugh W.J. "Nonlinear System Theory – The Volterra Wiener Approach". Johns Hopkins University Press,1981
3. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285,1980
4. Haber R., Keviczky L "Nonlinear System Identification-Input Output Modeling Approach". Vols I & II, Kluwer,1980
5. M.Poluektov and A.Polar. Modelling non-linear control systems using the discrete urysohn operator. 2018. Submitted arXiv:1802.01700.
6. A.Polar.
<http://ezcodesample.com/urysohn/urysohn.html>
7. M.Poluektov and A.Polar. Urysohn Adaptive Filter. 2019.
8. Haykin S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation". McMillan,1999
9. Warwick K, Irwin G.W., Hunt K.J. "Neural Networks for Control and Systems". Peter Peregrinus, 1992
- 10.Lennart., Ljung (1999). System identification : theory for the user (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. ISBN 978-0136566953. OCLC 38884169.

11.Schön, Thomas B.; Lindsten, Fredrik; Dahlin, Johan; Wågberg, Johan; Naesseth, Christian A.; Svensson, Andreas; Dai, Liang (2015). "Sequential Monte Carlo Methods for System Identification**This work was supported by the projects Learning of complex dynamical systems (Contract number: 637-2014-466) and Probabilistic modeling of dynamical systems (Contract number: 621-2013-5524), both funded by the Swedish Research Council". IFAC-PapersOnLine. 48 (28): 775–786. arXiv:1503.06058. doi:10.1016/j.ifacol.2015.12.224.

12.M. Abdalmoaty, 'Learning Stochastic Nonlinear Dynamical Systems Using Non-stationary Linear Predictors', Licentiate dissertation, Stockholm, Sweden, 2017. Urn:nbn:se:kth:diva-218100

13.Abdalmoaty, Mohamed Rasheed; Hjalmarsson, Håkan (2017). "Simulated Pseudo Maximum Likelihood Identification of Nonlinear Models". IFAC-PapersOnLine. 50 (1): 14058–14063. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1841.

14.Abdalmoaty, Mohamed (2019). "Identification of Stochastic Nonlinear Dynamical Models Using Estimating Functions".

15.Abdalmoaty, Mohamed Rasheed-Hilmy; Hjalmarsson, Håkan (2019). "Linear prediction error methods for stochastic nonlinear models". Automatica. 105: 49–63. doi:10.1016/j.automatica.2019.03.006.

16.Ровінський В.А., Євчук О.В., Стрілецький Ю.Й. Використання цифрових хвильових фільтрів у задачах технічної вібродіагностики. Метрологія та прилади. – 2011. - №6(32). – С.67-70

17.Ровінський В.А., Євчук О.В., Стрілецький Ю.Й. Особливості реалізації нелінійних опорів в системах цифрової обробки сигналів. Методи та прилади контролю якості. - 2011. - №27. - С. 91-95

18.A. Vladimirescu.The Spice Book. Wiley, New York, 1994

References

1. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285,1980
2. Rugh W.J. "Nonlinear System Theory – The Volterra Wiener Approach". Johns Hopkins University Press,1981

3. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285, 1980
4. Haber R., Keviczky L "Nonlinear System Identification-Input Output Modeling Approach". Vols I & II, Kluwer, 1980
5. M.Poluektov and A.Polar. Modelling non-linear control systems using the discrete urysohn operator. 2018. Submitted arXiv:1802.01700.
6. A.Polar.
<http://ezcodesample.com/urysohn/urysohn.html>
7. M.Poluektov and A.Polar. Urysohn Adaptive Filter. 2019.
8. Haykin S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation". McMillan, 1999
9. Warwick K, Irwin G.W., Hunt K.J. "Neural Networks for Control and Systems". Peter Peregrinus, 1992
10. Lennart., Ljung (1999). System identification : theory for the user (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. ISBN 978-0136566953. OCLC 38884169.
11. Schön, Thomas B.; Lindsten, Fredrik; Dahlin, Johan; Wågberg, Johan; Naesseth, Christian A.; Svensson, Andreas; Dai, Liang (2015). "Sequential Monte Carlo Methods for System Identification**This work was supported by the projects Learning of complex dynamical systems (Contract number: 637-2014-466) and Probabilistic modeling of dynamical systems (Contract number: 621-2013-5524), both funded by the Swedish Research Council". IFAC-PapersOnLine. 48 (28): 775–786. arXiv:1503.06058. doi:10.1016/j.ifacol.2015.12.224.
12. M. Abdalmoaty, 'Learning Stochastic Nonlinear Dynamical Systems Using Non-stationary Linear Predictors, Licentiate dissertation, Stockholm, Sweden, 2017. Urn:nbn:se:kth:diva-218100
13. Abdalmoaty, Mohamed Rasheed; Hjalmarsson, Håkan (2017). "Simulated Pseudo Maximum Likelihood Identification of Nonlinear Models". IFAC-PapersOnLine. 50 (1): 14058–14063. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1841.
14. Abdalmoaty, Mohamed (2019). "Identification of Stochastic Nonlinear Dynamical Models Using Estimating Functions".
15. Abdalmoaty, Mohamed Rasheed-Hilmy; Hjalmarsson, Håkan (2019). "Linear prediction error methods for stochastic nonlinear models". Automatica. 105: 49–63. doi:10.1016/j.automatica.2019.03.006.
16. Rovinskyi V.A., Yevchuk O.V., Striletskyi Yu.I. Vykorystannia tsyfrovoykh khvylovykh filtriv u zadachakh tekhnichnoi vibrodiahnostyky. Metrolohiia ta prylady. – 2011. - №6(32). – S.67-70
17. Rovinskyi V.A., Yevchuk O.V., Striletskyi Yu.I. Osoblyvosti realizatsii neliniinykh oporiv v systemakh tsyfrovoy obrobky syhnaliv. Metody ta prylady kontroliu yakosti. - 2011. - №27. - S. 91-95
18. Vladimirescu. The Spice Book. Wiley, New York, 1994

УДК 004.7:004.942
DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-119-124

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ВІД ДОВЖИНИ СЕГМЕНТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ CC-LINK

С.М. Бабчук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Івано-Франківськ, Карпатська 15, 76019, s.babchuk@nuing.edu.ua*

Анотація. *В даний час між виробника мипродукції в різних сферах постійно йде боротьба за ринки збуту. Основними факторами, які дозволяють перемогти в цій боротьбі є забезпечення виробництва якісної продукції з нижчою собівартістю ніж у конкурента. Інструментом, який дозволить досягнути вище вказаних переваг є впровадження сучасних технологій в системах управління технологічними процесами. Одним з актуальних і перспективних напрямків модернізації та створення нових систем автоматизації технологічними процесами є побудова таких систем на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж. Спеціалізована комп'ютерна мережа CC-Link була розроблена компанією MitsubishiElectricCorporation в 1996 році. І з того часу вона постійно вдосконалюється і розвивається. Мережа CC-Link пройшла сертифікацію відповідності до міжнародних стандартів IEC61158/IEC61784, ISO15745-5, SEMI E54.12, державних стандартів Китаю та Південної Кореї. В асоціацію партнерів CC-Link входить 3793 компанії по всьому світу, а в раді директорів даної асоціації всесвітньо відомі компанії MitsubishiElectricCorporation, CiscoSystemsInc, 3M Company, NEC Corporation, SchneiderElectricJapanHoldingsLtd. До технічних переваг на користь використання спеціалізованої комп'ютерної мережі CC-LINK в системах автоматизації управління технологічними процесами можна віднести те, що це високошвидкісна (до 10 Мбіт/с на відстані до 100 м), відкрита та детермінована промислова мережа, яка має засоби підвищення надійності мережі. В результаті проведених досліджень розроблено математичну модель залежності швидкості передавання даних від довжини сегменту спеціалізованої комп'ютерної мережі CC-Link. Похибка обчислення значення швидкості передавання даних в мережі CC-Link за допомогою розробленої моделі не перевищує 0,04%. Розроблену математичну модель можна в подальшому використовувати при проектуванні нових систем на базі мережі CC-Link.*

Ключові слова: *CC-Link, fieldbus, спеціалізована комп'ютерна мережа, математична модель, залежність швидкості передавання даних від довжини сегменту.*

Аннотация. *В настоящее время между производителями продукции в различных сферах постоянно идет борьба за рынки сбыта. Основными факторами, которые позволяют победить в этой борьбе являются обеспечение производства качественной продукции с себестоимостью ниже чем у конкурента. Инструментом, который позволит достичь выше указанных преимуществ является внедрение современных технологий в системах управления технологическими процессами. Одним из актуальных и перспективных направлений модернизации и создания новых систем автоматизации технологическими процессами является построение таких систем на базе специализированных компьютерных сетей. Специализированная компьютерная сеть CC-Link была разработана компанией Mitsubishi Electric Corporation в 1996 году. И с тех пор она постоянно совершенствуется и развивается. Сеть CC-Link прошла сертификацию соответствия международным стандартам IEC61158 / IEC61784, ISO15745-5, SEMI E54.12, государственным стандартам Китая и Южной Кореи. В ассоциацию партнеров CC-Link входят 3793 компании по всему миру, а в совете директоров данной ассоциации в семирно известные компании Mitsubishi Electric Corporation, Cisco Systems Inc, 3M Company, NEC Corporation, Schneider Electric Japan Holdings Ltd. К техниче ским преимуществам в пользу использования специализированной компьютерной сети CC-LINK в системах автоматизации управления технологическими процессами можно отнести то, что это высокоскоростная (до 10 Мбит/с на расстоянии до 100 м), открытая и детерминирована промышленная сеть, которая имеет средства повышения надежности сети. В результате проведения исследований разработана математическая модель зависимости скорости передачи данных от длины сегмента специализированной компьютерной сети CC-Link. Погрешность вычисления значения скорости передачи данных в сети CC-Link с*

помістю розробленої моделі не перевищує 0,04%. Розроблену математическу модель можна в подальшому використати при проектуванні нових систем на базі мережі CC-Link.

Ключевые слова: CC-Link, fieldbus, спеціалізована комп'ютерна мережа, математическа модель, залежність швидкості передачі даних від довжини сегмента.

Abstract. Currently, between producers in various fields is constantly fighting for markets. The main factors that allow us to win this fight are to ensure the production of quality products at a lower cost than the competitor. The tool that will achieve the above advantages is the introduction of modern technologies in process control systems. One of the current and promising areas of modernization and creation of new automation systems by technological processes is the construction of such systems on the basis of specialized computer networks. CC-Link, a specialized computer network, was developed by Mitsubishi Electric Corporation in 1996. And since then it is constantly improving and evolving. CC-Link network has been certified in accordance with international standards IEC61158 / IEC61784, ISO15745-5, SEMI E54.12, state standards of China and South Korea. The CC-Link partner association includes 3,793 companies worldwide, and the board of directors of this association includes the world-famous companies Mitsubishi Electric Corporation, Cisco Systems Inc, 3M Company, NEC Corporation, Schneider Electric Japan Holdings Ltd. The technical advantages in favor of the use of a specialized computer network CC-LINK in process control automation systems include the fact that it is a high-speed (up to 10 Mbps at a distance of up to 100 m), open and deterministic industrial network, which has the means to increase network reliability. As a result of the conducted researches the mathematical model of change of speed of data transfer from length of a segment of the specialized computer network CC-Link is developed. The error in calculating the value of the data rate in the CC-Link network using the developed model does not exceed 0.04%. The developed mathematical model can be further used in the design of new systems based on the CC-Link network.

Keywords: CC-Link, fieldbus, specialized computer network, mathematical model, dependence of data rate on segment length.

Вступ

В даний час між виробниками продукції в різних сферах постійно йде боротьба за ринки збуту. Основними факторами, які дозволяють перемогти в цій боротьбі є забезпечення виробництва якісної продукції з нижчою собівартістю ніж у конкурента. Інструментом, який дозволить досягнути вище вказаних переваг є впровадження сучасних технологій в системах управління технологічними процесами.

Як правило, людський фактор є основною причиною помилок, аварій і простоїв виробництва. Для досягнення виробництва якісної продукції з мінімальними затратами необхідно звести до мінімуму вплив людського фактора на результати такого виробництва. При використанні в автоматизованих систем управління процес виробництва відбувається автоматично за наперед розробленим алгоритмом, який забезпечує оптимальне виробництво з мінімальними витратами ресурсів [1].

Повноцінна автоматизована система управління технологічним процесом виконує наступні функції [1]:

- збір інформації з усіх датчиків і первинних перетворювачів та відображення отриманих даних в зручному для сприйняття вигляді на моніторі оператора;

- контроль стану устаткування (крім включеного/виключеного стану, може відображатися робота окремих механізмів системи);

- інформування про передаварійні та аварійні ситуації;

- управління технологічними об'єктами в залежності від показників швидкості на вході та необхідних кількісних і якісних характеристик кінцевого продукту. Відпрацювання того алгоритму, який є оптимальним для даного процесу в поточний момент часу;

- формування та направлення інформації про продукцію в службу підприємства (комерційний відділ, бухгалтерію);

- запис даних з будь-якої ідискретністю і деталізацією. Легкий доступ до архіву уповноважених осіб;

- візуалізація технологічного процесу і передача даних на віддалені робочі місця і мобільні пристрої уповноважених осіб.

Таким чином, впровадження сучасної системи управління технологічними процесами дозволяє не тільки зменшити затрати на виробництво і підвищити його якість, а ще й додатково вдосконалює та покращує управління підприємством в цілому за рахунок тіснішої інтеграції виробничої системи з управлінською.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Одним з актуальних і перспективних напрямків модернізації та створення нових систем автоматизації технологічними процесами є побудова таких систем на базі спеціалізованих комп'ютерних мереж.

В світі в даний час час різними виробниками пропонується широкий спектр різноманітних спеціалізованих комп'ютерних мереж. І для керівництва підприємства та служби автоматизації даного підприємства важливою задачею є вибір спеціалізованої комп'ютерної мережі, яка стане основою для їх автоматизованої системи керування технологічними процесами.

Спеціалізована комп'ютерна мережа CC-Link була розроблена компанією MitsubishiElectricCorporation в листопаді 1996 року. І з того часу вона постійно вдосконалюється і розвивається.

В 2000 році компанією MitsubishiElectricCorporation було випущено специфікацію для мережі CC-Link (мережа стала відкритою).

В листопаді 2000 року шість компаній заснували Асоціацію партнерів CC-Link (CLPA) для глобального просування мережі.

В травні 2001 року мережа пройшла сертифікацію згідно міжнародного стандарту SEMI E54.12.

В грудні 2005 року мережа CC-Link сертифікована згідно державного стандарту Китаю GB/Z.

В квітні 2006 року мережа сертифікована згідно міжнародного стандарту ISO15745-5, а в грудні 2007 року мережа сертифікована згідно міжнародного стандарту IEC61158/IEC61784 "Industrial communication networks. Field bus specifications", який є основним в сфері міжнародної стандартизації спеціалізованих комп'ютерних мереж [2].

В березні 2008 року мережа сертифікована згідно державного стандарту Південної Кореї KSB ISO15745-5.

В грудні 2008 року мережа CC-Link сертифікована згідно державного китайського стандарту GB/T, який є найвищим державним китайським стандартом в сфері мереж.

Число компаній-членів CLPA становить – 3793 (80% компаній-членів знаходяться за межами Японії).

В раду директорів Асоціації партнерів CC-Link (CLPA) входять всесвітньо відомі компанії:

- MitsubishiElectricCorporation;
- CiscoSystems, Inc;
- 3M Company;
- NEC Corporation;
- SchneiderElectricJapanHoldingsLtd.;
- CognexCorporation;
- Molex;
- BALLUFF;
- IDEC Corporation.

Регіональні офіси CLPA є в різних містах Азії, Європи, Північної Америки.

До технічних переваг на користь використання спеціалізованої комп'ютерної мережі CC-LINK в системах автоматизації управління технологічними процесами можна віднести те, що це високошвидкісна (до 10 Мбіт/с на відстані до 100 м), відкрита та детермінована промислова мережа, яка має засоби підвищення надійності мережі (RAS) [3-11].

Вище перелічені факти свідчать про те, що мережа CC-LINK є сучасною високошвидкісною надійною, детермінованою, яка підтримується, як всесвітньо відомими компаніями так і великою кількістю інших компаній по всьому світу. Це робить мережу привабливою до використання в модернізації чи створенні нових автоматизованих системах керування технологічними процесами.

Необхідно відмітити, що в даний час відсутні математичні моделі залежності швидкості передавання даних в мережі CC-Link. Наявність таких моделей дозволила б більш ефективно проектувати автоматизовані системи управління технологічними процесами на базі мережі CC-Link.

Розробка математичної моделі зміни швидкості передавання даних від довжини сегменту спеціалізованої комп'ютерної мережі CC-Link

В "OpenFieldNetwork CC-Link Compatible ProductCatalog" компанією Mitsubishi Electric Corporation вказано визначені нею відстані на які можна в мережі CC-Link передавати дані з швидкістю 10 Мбіт/с, 5 Мбіт/с, 2,5 Мбіт/с, 625 кбіт/с, 156 кбіт/с (табл.1).

Таблиця 1 – Швидкість передавання даних та відстань на якій вона визначена в мережі CC-Link

Швидкість передавання даних, кбіт/с	Відстань, м
10 000	100
5 000	160
2 500	400
625	900
156	1200

В таблиці 2 наведено результати аналізу швидкості передавання даних в мережі CC-Link (в залежності від довжини сегменту даної мережі), яка визначена експериментально [11] та швидкості передавання даних, яка обчислена за допомогою розробленої моделі 1.

В процесі проведених досліджень було встановлено, що найменше відхиляється від наявних даних степенева математична модель:

$$y = 11054 \cdot e^{-0.003x} \quad (1)$$

Її графічна побудова зображена на рисунку 1.

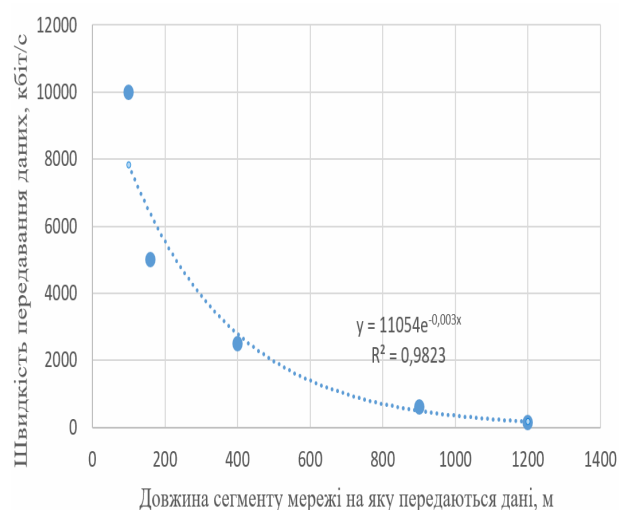


Рисунок 1 - Модель залежності швидкості передавання даних від довжини сегменту мережі CC-Link

З рисунка 1 та з таблиці 1 видно, що модель 1 погано відтворює залежність швидкості передавання даних в мережі CC-Link в залежності від довжини сегменту даної мережі.

Тому було прийнято рішення розробити систему математичних моделей для окремих ділянок мережі CC-Link:

Таблиця 2 – Аналіз швидкості передавання даних в мережі CC-Link з моделі (1)

Відстань сегменту мережі CC-Link, м	Швидкість передавання даних визначена експериментально [10], кбіт/с	Швидкість передавання даних обчислена за допомогою моделі (1), кбіт/с	Похибка, кбіт/с	Похибка, %
100	10000	8189	1811	18
160	5000	6840	1840	37
400	2500	3329	829	33
900	625	742	117	19
1200	156	302	146	94

$$\begin{cases} y = -10638\ln(x) + 58991 & , x \in [100;160) \\ y = -2728\ln(x) + 18847 & , x \in [160;400) \\ y = -3,75x + 4000 & , x \in [400;900) \\ y = -1630\ln(x) + 11715 & , x \in [900;1200) \end{cases}$$

(2)

Було проведено порівняння швидкостей передавання даних в мережі CC-Link (в залежності від довжини сегменту даної мережі), які визначені в [11] та швидкостей передавання даних, які обчислені за допомогою розроблених моделей (2). Результати даного порівняння наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Аналіз швидкості передавання даних в мережі CC-Link з моделі (2)

Відстань сегменту мережі CC-Link, м	Швидкість передавання даних визначена в[10], кбіт/с	Швидкість передавання даних обчислена за допомогою моделі (1), кбіт/с	Похибка, кбіт/с	Похибка, %
100	10000	10001,20	1,20	0,01
160	5000	5001,93	1,93	0,04
400	2500	2500	0	0
900	625	625,03	0,03	0,01
1200	156	156,04	0,04	0,03

Як видно з таблиці 2 похибка визначення за допомогою розробленої математичної моделі зміни швидкості передавання даних від довжини сегменту

спеціалізованої комп'ютерної мережі CC-Link не перевищує 0,04%.

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено математичну модель залежності швидкості передавання даних від довжини сегменту спеціалізованої комп'ютерної мережі CC-Link. Похибка обчислення значення швидкості передавання даних в мережі CC-Link за допомогою розробленої моделі не перевищує 0,04%. Розроблену математичну модель можна в подальшому використовувати при проектуванні нових систем на базі мережі CC-Link.

Список використаних джерел

1. Автоматехком: от проекта до ввода в эксплуатацию [Електронний ресурс]: http://automatech.com.ua/?gclid=Cj0KCQjwreT8BRDTARIsAJLI0KKSDR48HBrKi_-LH1BXwoOsB5jf0bq80Xlv4tJS5rzaqJSnn1fgrsaAnrtEALw_wcB
2. International Standards [Електронний ресурс]: <https://eu.cc-link.org/en/clpa/standard>
3. Ассоциация Партнеров CC-Link [Електронний ресурс]: <https://eu.cc-link.org/ru/clpa/history>
4. CC-Link Product. Development Guidebook. – 2016. – 40 p.
5. CC-Link. – 2018 – 11 p.
6. Open Field Network: CC-Link Family Compatible Product Development Guidebook. - Mitsubishi Electric. - 2019. - 64 p.
7. Asycube CC-Link Gateway. – Asyril. - 2019. - 21 p.
8. Babchuk, S. Classification of Specialized Computer Networks // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – Vol. 48. – P. 57-64.
9. Specification table of CC-Link Ver. 1.10/Ver. 2.00 – 48 p.
10. Бабчук С. М. Незамай Б. С. Математична модель залежності швидкості передавання даних від довжини сегменту спеціалізованої цифрової мережі G3-PLC

.Методи і прилади контролю якості. №2(43)
2019. С. 120 – 127.

11. Open Field Network CC-Link
Compatible Product Catalog. – Mitsubish
iElectric Corporation. - 2012. – 56 p.

References

1. Avtomatekhkom: ot proyekta do vvoda
v ekspluatatsiyu [Elektronniy resurs]:
http://automatech.com.ua/?gclid=Cj0KCQjwreT8BRDTARIsAJLI0KKSDR48HBrKi_-LHIBXwoOsB5jf0bq80Xlv4tJS5rzaqJSnn1fgr-saAnrtEALw_wcB

2. International Standards [Elektronniy
resurs]: <https://eu.cc-link.org/en/clpa/standard>

3. Assotsiatsiya Partnerov CC-Link
[Elektronniy resurs]: <https://eu.cc-link.org/ru/clpa/history>

4. CCLink Product. Development
Guidebook. – 2016. – 40 p.

5. CC-Link. – 2018 – 11 p.

6. Open Field Network: CC-Link Family
Compatible Product Development Guidebook.
- Mitsubishi Electric. - 2019. - 64 p.

7. Asycube CC-Link Gateway. – Asyril. -
2019. - 21 p.

8. Babchuk, S. Classification of
Specialized Computer Networks // Journal of
Automation and Information Sciences. – 2016.
– Vol. 48. – P. 57-64.

9. Specification table of CC-Link Ver.
1.10/Ver. 2.00 – 48 p.

10. Babchuk S., Nezamay B. Mathematical
Model of speed data transmission from
segment length of specialized G3-plc digital
network. Methods and devices of quality
control №2(42) 2019 p 120-127.

11. Open Field Network CC-Link
Compatible Product Catalog. –Mitsubishi
Electric Corporation. - 2012. – 56 p.

УДК 539:621

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-125-131

ЩОДО БУДОВИ РОЗПЛАВІВ ЕВТЕКТИЧНИХ СИСТЕМ: ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ОПИСУ СТРУКТУРИ РІДИНИ

І.Р.Михайлюк, Т.О. Ваврик, О.С. Царева, Н. Д. Подубинська*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342)723824; e-mail: pta@iung.edu.ua

Анотація. У запропонованій статті систематизовано теоретичні дослідження евтектичних систем, виокремлено зв'язок результатів цих досліджень із модельним представленням опису структури рідини з метою подальшої практичної реалізації. Дане дослідження є актуальним, оскільки не існує узагальненої і систематизованої інформації щодо вивчення структури розплавів евтектичних систем. З одного боку, це пояснюється певними протиріччями деяких досліджень. Проте основною проблемою видається неоднозначність і несистемність інтерпретації результатів досліджень структури розплавів. Авторами зазначено, що при вирішенні задач, пов'язаних з природою рідкого стану, особливий інтерес представляють саме дослідження будови двокомпонентних розплавів, які утворюють в твердому стані діаграми фазової рівноваги евтектичного типу. Поняття евтектика означає "найбільш легкоплавкий" і використовується, щоб описати ізотермічну оборотну реакцію, в якій рідина розпадається на дві і більше тверді фази під час охолодження. Запропоновано здійснювати судження про структуру металічних розплавів евтектичних систем по виду лінії ліквідусу діаграми фазової рівноваги. Для цього всі евтектичні системи підрозділені на: системи з гладкою лінією ліквідусу без точки перегину ні в доевтектичній, ні в заевтектичній області (NI); системи з точкою перегину на одній гілці лінії ліквідусу; системи з точкою перегину на обох гілках лінії ліквідусу; системи з евтектичною точкою поблизу нульової концентрації одного із компонентів і точкою перегину на лінії ліквідусу (0% SI). На основі узагальнених і систематизованих результатів теоретичних і експериментальних досліджень доведено, що евтектичні системи є полігенними системами, які володіють широким діапазоном взаємодії між частинками і, відповідно, мають будову ближнього порядку. Ця інформація може дати можливість однозначно інтерпретувати результати дифракційних досліджень і даних фізико-хімічного аналізу для створення модельного представлення опису структури рідини (розплаву).

Ключові слова: евтектика; модельне представлення; опис структури рідини; евтектична система, розплав;

Анотація

В предложенной статье систематизированы теоретические исследования эвтектических систем, выделена связь этих результатов с модельным представлением описания структуры жидкости для дальнейшей практической реализации. Данное исследование является актуальным, поскольку не существует обобщенной и систематизированной информации об изучении структуры расплавов эвтектических систем. С одной стороны, это объясняется наличием противоречий в некоторых исследованиях. Но основной проблемой остается неоднозначность и бессистемность в интерпретации результатов исследования структуры расплавов. Авторами отмечено, что при решении задач, связанных с природой жидкого состояния, особенный интерес представляют именно исследования строения двухкомпонентных расплавов, которые создают в твердом состоянии диаграммы фазового равновесия эвтектического типа. Понятие «эвтектика» означает «наиболее легкоплавящийся» и используется, чтобы описать изотермическую оборотную реакцию, в которой жидкость распадается на две и более твердых фазу во время охлаждения. Предложено делать суждения о структуре металлических расплавов эвтектических систем по виду линии ликвидусу диаграммы фазового равновесия. Для этого все эвтектические системы разделены на: системы с гладкой линией ликвидусу без точки перегиба ни в доэвтектической, ни в заэвтектической области (NI); системы с точкой перегиба на одной ветке линии ликвидусу; системы с точкой перегиба на обеих ветках линии ликвидусу; системы с эвтектической точкой возле нулевой концентрации одного из компонентов и точкой перегиба на линии ликвидусу (0% SI). На основе обобщенных и систематизированных результатов теоретических и экспериментальных исследований доказано, что эвтектические системы являются полигенными системами, владеющими широким диапазоном взаимодействия между частичками и, соответственно, имеющие строение ближнего порядка. Эта информация может дать возможность

однозначно інтерпретувати результати дифракційних досліджень і даних фізико-хімічного аналізу для створення модельного представлення описання структури рідкої фази (расплава)

Ключевые слова: эвтектика, модельное представление, описание структуры жидкости, эвтектическая система, рас плав.

Annotation. In the offered article theoretical researches of eutectic systems are systematized, connection of results of these researches with model representation of the description of structure of a liquid for the purpose of the further practical realization is allocated. This study is relevant because there is no generalized and systematic information on the study of the structure of melts of eutectic systems. On the one hand, this is due to certain contradictions in some studies. However, the main problem is the ambiguity and inconsistency of interpretation of the results of studies of the structure of melts. The authors note that in solving problems related to the nature of the liquid state, of particular interest is the study of the structure of two-component melts, which form in the solid state phase equilibrium diagrams of the eutectic type. The term eutectic means "most fusible" and is used to describe an isothermal reversible reaction in which a liquid decomposes into two or more solid phases during cooling. It is proposed to make judgments about the structure of metal melts of eutectic systems according to the type of liquidus line of the phase equilibrium diagram. To do this, all eutectic systems are divided into: systems with a smooth liquidus line without an inflection point in either the pre-eutectic or the supereutectic region (NI); systems with an inflection point on one branch of the liquidus line; systems with an inflection point on both branches of the liquidus line; systems with a eutectic point near the zero concentration of one of the components and an inflection point on the liquidus line (0% SI). Based on the generalized and systematized results of theoretical and experimental studies, it is proved that eutectic systems are polygenic systems that have a wide range of interactions between particles and, accordingly, have a short-range structure. This information can make it possible to unambiguously interpret the results of diffraction studies and physicochemical analysis data to create a model representation of the description of the structure of the liquid (melt).

Keywords: eutectic, model representation, description of liquid structure, eutectic system, melt.

Вступ. Значна частина речовин, які використовуються в промисловості формуються з рідкого стану, а це означає, що в рідині закладена та інформація, яка з часом дасть можливість, керувати процесами кристалізації, отримати матеріали з наперед заданими властивостями.

Поняття евтектика означає "найбільш легкоплавкий" і використовується, щоб описати ізотермічну оборотну реакцію, в якій рідина розпадається на дві і більше тверді фази під час охолодження.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

У процесі дослідження автори в більшості випадків опиралися на класичну літературу та дослідження, пов'язані з темою розвідки, аналізуючи при цьому їх сучасну інтерпретацію.

Так, у роботах В.І. Данилова [1] показано, що рентгенограми зняті з розплавів ряду евтектик (Bi-Pb, Pb-Sn, Zn-Sn) являють собою суперпозицію рентгенограм обох компонентів. На основі цього зроблено висновок, що поблизу точки кристалізації повного змішування компонентів не відбувається і розплав складається із областей, збагачених тим чи іншим компонентом. Таку систему можна

розглядати як мікрогетерогенну з різними фазовими границями. [1].

Висновки про квазіевтектичну будову рідких евтектик були підтверджені подальшими дослідженнями цілого ряду системи методами рентгеноструктурного аналізу [2-3], електронографією [4], нейтронографією, вивченням характеру температурної залежності електропровідності, в'язкості, термодинамічних властивостей, а також досвідами по центрифугування рідких евтектик [5]., а також дослідженнями по центрифугуванню рідких евтектик [6], дослідженнями Г.М. Бартенева [7] по теплотах плавлення і теплоємностях евтектики і чистих металів. В даних дослідженнях встановлено, що процес змішування рідких компонентів являється енергетично не вигідним і, очевидно, він не може йти до кінця, а середній розмір мікрообластей, збагачених одним із компонентів, складає величину порядку 10^3 - 10^4 атомів.

В роботах [8-9] заперечується уявлення про евтектиках як про мікрогетерогенній системі і доводиться, що величини мікрообластей, збагачених одним із компонентів, дуже малі (одна – дві координаційні сфери), що до них

може бути застосована звичайна статистична теорія рідин. Що стосується характерної структури твердої евтектики, то вона зумовлена, не тим, що в рідині є вже готова квазіевтектична суміш, а особливими умовами кристалізації рідин в евтектичній точці. Рентгенографічні дослідження деяких евтектичних розплавів підтвердили дану точку зору про будову рідких евтектик. Згідно [10] структура ближнього порядку в рідких евтектиках Bi-Pb, Bi-In, Cd-Sn і Ga-Sn описується статистичною моделлю.

Згідно третьої точки зору рідка евтектика являється хімічною сполукою, який розпадається при кристалізації. Але ця точка зору недостатньо обґрунтована [11]. До того ж термодинамічні дослідження Бартенєва показали, що теплота плавлення евтектики є сума теплот плавлення відповідних фаз, що свідчить проти представлення про евтектику як про хімічну сполуку.

Виділення частини невирішеної проблеми

Слід відзначити, що не існує узагальненої і систематизованої інформації щодо вивчення структури розплавів евтектичних систем. З одного боку, це пояснюється певними протиріччями деяких досліджень. Проте основною проблемою видається неоднозначність і несистемність інтерпретації результатів досліджень структури розплавів.

Мета досліджень

Мета роботи – Систематизувати теоретичні дослідження евтектичних систем, виокремити зв'язок результатів цих досліджень із модельним представленням опису структури рідини з метою подальшої практичної реалізації.

Висвітлення основного матеріалу

При вирішенні задач, пов'язаних з природою рідкого стану, особливий інтерес представляють дослідження будови двокомпонентних розплавів, які утворюють в твердому стані діаграми фазової рівноваги евтектичного типу. В процесі дослідження даних розплавів було запропоновано три точки зору про будову самої рідкої евтектики [11].

У подвійній фазовій діаграмі (рис. 1), C_E – це склад евтектики, яка формується між компонентами А і В. Приклад, що найчастіше приводиться для ідеалізованої евтектичної мікроструктури – це пластини твердих розчинів

а і β , що чергуються. Така структура може утворитися, якщо матеріал евтектичного складу кристалізується в умовах близьких до рівноважних. Пластинчаті структури формуються під час сумісного або кооперативного росту, оскільки дві фази одночасно ростуть з розплаву. Під час сумісного або кооперативного росту, а фаза відтісняє атоми В, а β фаза відтісняє атоми А. Для будь-якої специфічної швидкості росту, встановлюються поперечні концентраційні градієнти в розплаві на фронті кристалізації, які забезпечують дифузію двох видів атомів, які, в свою чергу, стабілізують встановлену міжфазову відстань. Під час неконтрольованої нерівноважної кристалізації евтектики, можуть бути сформовані різні типи мікроструктур. Одна або обидві первинні фази, можуть бути присутніми додатково до очікуваної пластинчастої структури. При неспрямованій кристалізації, фазове вирівнювання обмежується, як правило, малими розмірами індивідуальних (евтектичних) зерен. Регулярна евтектична структура з однією орієнтацією утворюється тільки при великих значеннях відношення довжина/діаметр $\gg 1$, які формуються під час спрямованої кристалізації.

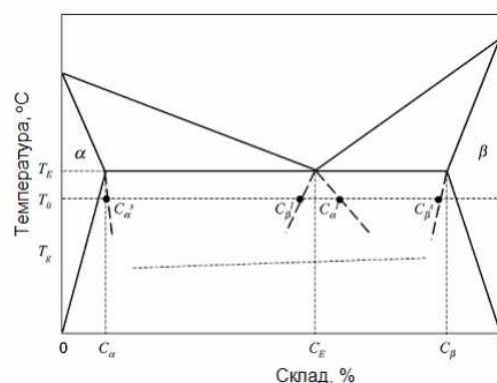


Рисунок 1 – Схематична фазова діаграма простого подвійного сплаву з евтектикою [9]

В.М. Глазов і А.А. Вертман зробили спробу обґрунтувати будову рідких евтектик на основі квазіхімічного наближення на основі аналізу сил міжмолекулярної взаємодії. Було доказано, що хімічна мікронеоднорідність будови рідких евтектик може мати місце в тому випадку, коли сили взаємодії між однойменними атомами

будуть більшими, ніж між різнойменними, тобто:

$$|U_{A-B}| \ll \frac{1}{2} (|U_{A-A}| + |U_{B-B}|)$$

Останнє співвідношення являється умовою позитивності енергії зміщення.

В більшості простих евтектичних системах енергія зміщення позитивна і в їх структурі необхідно очікувати розвитку мікронеоднорідність.

$$\text{При } |U_{A-B}| \ll \frac{1}{2} (|U_{A-A}| + |U_{B-B}|)$$

мікронеоднорідність в розплаві повинна бути відсутньою. У випадку, коли взаємодія між різнойменними атомами значно більша, ніж між однойменними, в розплаві можливі утворення хімічних сполук.

Однак співвідношення між енергіями зв'язку U_{A-A}, U_{B-B} і U_{A-B} не завжди можуть пояснити структуру розплавів. Це пояснюється тим, що не враховується вплив опору з'єднаних атомів на парні взаємодії і нехтується вкладом електронного газу в енергію системи. Остання для металічних розплавів може бути значною і не може бути розбита на доданки відносно до парних взаємодій.

Нами зроблена пропозиція про можливість судження про структуру металічних розплавів евтектичних систем по виду лінії ліквідус діаграми фазової рівноваги. Для цього всі евтектичні системи підрозділені на :

- 1) системи з гладкою лінією ліквідус без точки перегину ні в доевтектичній, ні в заевтектичній області (NI);
- 2) системи з точкою перегину на одній гілці лінії ліквідус;
- 3) системи з точкою перегину на обох гілках лінії ліквідус;
- 4) системи з евтектичною точкою поблизу нульової концентрації одного із компонентів і точкою перегину на лінії ліквідус (0% SI).

Термодинамічні дані по системах з точкою перегину на лінії ліквідус вказують на тенденцію до не змішуваності компонентів. Можливо, що сама точка перегину на лінії ліквідус відповідає сплаву з максимальною трудностю змішування двох рідких компонент і в цих розплавах повинна бути найбільш виражена мікронеоднорідність їх будови. Найбільший ефект, якщо запропонована модель

вірна, повинна бути в евтектичних системах з точками перегину на обох гілках лінії ліквідус. Однак, як показали рентгенографічні випромінювання розплавів системи Au-Ge, Ag-Ge, Ag-Si, Au-Si [5], які належать до даного типу, атоми різних сортів в розплавах евтектичного складу розподілені хаотично, що корелює з енергією зміщення, яка для даних сплавів від'ємна.

Розплави інших концентрацій даних системи можуть мати іншу структуру або характеризуватися полі структурністю. Так, в роботі [10] на основі аналізу ізотерм в'язкості розплавів Ag-Ge, Ag-Si, Au-Ge зроблений висновок про існування вище лінії ліквідус в цих системах сполук відповідно Ag_3Ge , Ag_5Si , Au_2Ge , які розпадаються при звичайних швидкостях охолодження і можуть бути зафіксовані в твердому стані при швидкості охолодження $10^6 - 10^8$ град./с. Дослідження розсіювання нейтронів на малі кути рідкими сплавами Ag-Ge підтверджують, що в даних розплавах взаємодія різносортих атомів грає ведучу роль і приводить до утворення ланцюгів атомів (агломератів).

Дослідження розплавів евтектичних систем з гладкими лініями ліквідус показують, що при температурних, незначно перевищуючих температуру плавлення, вони характеризуються мікрогетерогенною будовою. Так, методами рентгеноструктурного аналізу, дифракцією нейтронів, швидким охолодженням, показано, що структури розплавів Al-Si до евтектичної і евтектичної концентраціями Si подібні і відрізняються і відрізняються від структури розплавів з заевтектичної концентрації Si. В евтектичному розплаві існують області з статистичним розподілом атомів і області із структурою чистих компонент. В евтектичних розплавах всі атоми Al з частиною атомів кремнію утворюють мікрообласті зі статистичним розподілом атомів, інша частина атомів Si утворює гетеро фазні комплекси виду Si_4 . Переважним оточенням односортих атомів характеризується структура ближнього порядку розплавів Al-Sn, Bi-Sn, Cd-Sn, більш складна структура ближнього порядку розплавів системи Cd-In.

Аналіз ізотерм питомого електроопору показує наявність в розплавах при 15 і 75 ат% Cd особливих станів. Із термодинамічних

досліджень [11] зроблений висновок, що в даних розплавах приблизно при 75 ат% Cd утворюються комплекси. Оцінка відносної долі областей взаємного упорядкування показує, що при 500⁰ С вона складає 0,3 від повного об'єму, а при 700⁰ С ≈ 0,03.

Існують протиріччя в результатах досліджень будови розплавів заевтектичних систем з точкою перегину на одній гілці лінії ліквідус. Прямі дослідження розплавів цих систем (Ag-Tl, Al-Ge, Al-Sn, Au-Co, Cd-Tl, Ga-In, Pb-Sn, Sn-Zn) показують досить виражене квазіевтектичний розподіл атомів компонент. Квазіевтектична структура ближнього порядку в розплавах системи Ga-In була підтверджена і вивчена в залежності від коефіцієнта дифузії [10]. Однак в ряді робіт на основі вивчення структурно чутливих властивостей робляться висновки про інше розподілом атомів компонент в цих системах. Так, в роботі [10] по виду ізотерми в'язкості системи Al-Ge віднесена, за класифікацією Н.С. Курнакова до ірраціональних систем, тобто до систем з хімічним складом. Цьому складу приписується формула Al₂Ge. Про переважаючу взаємодію різносторонніх атомів свідчать і дослідження електроопору. В роботі [11] по результатам вимірювання поверхневого натягу зроблено припущення про утворення сполук або груп різницевих атомів, можливо евтектичного складу, в розплавах Pb-Sn. Не виключається можливість утворення сполук при 60 ат% Sn в розплавах Ga-Zn, але інші дослідження говорять про статичний розподіл атомів в даних розплавах.

У роботі [12] на базі розплаву евтектичного складу системи Pb-Sn оцінено межі мікронеоднорідної стабільності в евтектичних розплавах. Дослідження інших, схожих систем показали, що температурні інтервали виявлених аномалій свідчать про те, що в евтектичних системах максимум температури на спінодалі може суттєво перевищувати значення $2T_{eut}$.

Досліджені властивості свідчать, що евтектичний розплав є мікрогетерогенним і схожим на монотектичний [9-12]. Однак початок кристалізації в евтектиках не дає змоги чітко спостерігати тенденцію до поділу фаз у рідкому стані. Тому за температур, що суттєво перевищують критичні, розплави є макроскопічно гомогенними, а всі наявні

неоднорідності описуються пуассонівськими флуктуаціями концентрації з малою довжиною фазової когерентності. При цьому однаково важливу роль відіграють як електронно-іонні взаємодії, що стабілізують систему проти поділу фаз, так і електрон-електронні взаємодії, наявністю яких зумовлене екранування електростатичних сил у системі. При зниженні температури ця макроскопічна гомогенність деякий час зберігається, але під час наближення до критичної області об'ємна доля мікронеоднорідностей з різною концентрацією компонентів починає зростати. Односортні взаємодії починають переважати. Реакція електронної підсистеми на температурні зміни є швидшою за реакцію йонної, що виявляється в концентраційній зміні радіуса екранування. Утворена просторова неоднорідність електронного газу є причиною нестабільності в системі і сприяє розвитку флуктуацій концентрацій у білякритичній області. Як наслідок, виникають мікроскопічні кластери, які зростають під час наближення до температури розшарування. В евтектичних системах, що розглядаються, як окремий випадок систем з обмеженою розчинністю компонентів, розміри частин однієї з фаз, змінюючись за зміни температури, не досягають таких розмірів, як у монотектичних системах, тобто їхня седиментаційна стійкість зберігається до температури початкової кристалізації.

Різноманітність структури ближнього порядку характерно і для розплавів систем з евтектичною точкою поблизу нульової концентрації одного із компонент. Узагальнюючи результати рентгеноструктурних досліджень і експериментальні результати по електроопору, зроблено висновок про статичне розподілу атомів різних сортів в розплавах гелій-олово. Складне багато структурний розподіл атомів різних структур в розплавах Ge-In, Ge-Pb, Ge-Sn, розплави Ge-In, відносяться допоміжної моделі між квазіевтектичним і хаотичним розподілом атомів, а розплави Ge-Sn – з більшою ймовірністю можна описати на основі моделі хаотичного розподілу атомів різних сортів. Результати експериментів по розсіюванню нейтронів дали можливість зробити висновок, що в розплавах Ві-Cu частина атомів міді розподілена хаотично, а атоми Ві, друга частина – утворюють кластери.

Об'ємна доля кластерів, складається тільки із атомів міді, залежить від складу розплавів і змінюється від 10% до 25%.

Дослідження більш складних евтектичних систем, де компонентами евтектики являються хімічні сполуки, тверді розчини, показали, що в цих випадках в рідині можлива своєрідна квазіевтектична структура із структурними компонентами хімічних сполук, розчинів, а не елементів системи. Таку будову мають евтектичні розплави Bi-In, In-Sb, Tl-Te, Co-Ge, Li-Pb і т.д. присутність асоціанів у ближній координації виявлена і в дослідженнях фізико-хімічних властивостей розплавів систем Ag-Mg, Al-Sb, Cd-Sb, In-Sb, Mg-Bi, Mg-Sn, Ga-Na і т.д. з евтектичними точками на лінії ліквідус. Дані асоціани в одних випадках термодинамічно нестійкі і дисоціюють при температурах, незначно перевищуючи температуру плавлення, в інших випадках вони зберігаються при достатньо високих температурах.

Висновок

Узагальнивши вищесказане, можемо стверджувати, що евтектичні системи є полігенними системами, які володіють широким діапазоном взаємодії між частинками і, відповідно, мають будову ближнього порядку. Ця інформація може дати можливість однозначно інтерпретувати результати дифракційних досліджень і даних фізико-хімічного аналізу для створення модельного представлення опису структури рідини (розплаву).

Література

1. Данилов В.И. Строение и кристаллическая жидкость, К., 1956 р. 568 с.
2. Лобода П.І., Богомол Ю.І., Єрмоленко Д.Ю. Механізм зміцнення спрямовано армованого евтектичного сплаву LaB6-ZrB2 в широкому інтервалі температур. *Металознавство та обробка металів*. 2011. № 2. С. 45–53.
3. Скришевский А.Ф. Рентгенография жидкостей. К., 1966, с.123
4. Дутчак Я.И. Рентгенография жидких металов. Львів: Вища школа, 1977, с.162
5. Louzguine – Luzgin D., Inoue A., Yavari A. R., Vaughan G. Thermal expansion of a glassy alloy studied using a real – space pair distribution

function. *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. P. 23 - 26.

6. Bilyk R., Liudkevych U., MudryS. Structure and short range order of liquid gallium. *Physico - Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2017. V. 25. P. 7- 13. 81.

7. Бартенев Г.М. О строении жидких евтектических сплавов. ИМЕТ АН СССР, 1959 с.93

8. Верман А.А., Самарин А.М., Якобсон А.М. О строении жидких евтектик. *Металлургия и тепло*, 1960, №3, С. 17.

9. Абрикосов Н.Х., Глаголева Н.Н., Чижевская С.Н. Исследование расплавов евтектических систем. *Неорганическая химия*. Т.5, №12, АН. СССР, 1969р.

10. Курнаков Н.С. Избранные труды. т. 1, М.: Издательство АН СССР, 1960

11. Яценко С.П., Кононенко В.И. Особенности изменения в'язкості і електричного опору бінарних системах различного типа. *Фізика і химия*. 1969, т.43. №1. С 89-94.

12. Дутчак Я.И., Френчко В.С., Зайкин В.М., Кузнецова Л.С. О характере атомного упорядочения в рас плавах системы Zn-Sn. *Фізика і химия*. 1980, т.25. №3. С-514-515.

References

1. Danylov V.Y. Stroenye y krystalicheskaia zhydkost, K., 1956 r. 568 s.
2. Loboda P.I., Bohomol Yu.I., Yermolenko D.Iu. Mekhanizm zmitsnennia spriamovano armovanoho evtektichnoho splavu LaB6-ZrB2 v shyrokomu intervali temperatur. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*. 2011. № 2. S. 45–53.
3. Skryshevskiy A.F. Renthonohrafiya zhydkostei. K., 1966, s.123
4. Dutchak Ya.Y. Renthonohrafiya zhydkykh metalov. Lviv: Vyshcha shkola, 1977, s.162
5. Louzguine – Luzgin D., Inoue A., Yavari A. R., Vaughan G. Thermal expansion of a glassy alloy studied using a real – space pair distribution function. *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. P. 23 - 26.
6. Bilyk R., Liudkevych U., MudryS. Structure and short range order of liquid gallium. *Physico - Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2017. V. 25. P. 7- 13. 81.

- 7 Bartieniev H.M. O stroenyy zhydkykh evtekticheskykh splavov. YMET AN SSSR, 1959 s.93
- 8 Verman A.A., Samaryn A.M., Yakobson A.M. O stroenyy zhydkykh evtektik. Metallurhiya y teplo, 1960, №3, S. 17.
9. Abrykosov N.Kh., Hlaholeva N.N., Chyzhevskaia S.N. Yssledovanye rosplavov evtekticheskykh system. Neorhanycheskaia khymia. T.5, №12, AN. SSSR,1969r.
- 10 Kurnakov N.S. Yzbrannyye trudy. t. 1, M.: Yzdatelstvo AN SSSR, 1960
- 11 Yatsenko S.P., Kononenko V.Y. Osobennosty yzmeneniya v'язkosti i elektrosoprotivleniya binarnykh systemakh razlychnoho typu. Fyzyka y khymia. 1969, t.43. №1. S 89-94.
- 12 Dutchak Ya.Y., Frenchko V.S., Zaikyn V.M., Kuznetsova L.S. O kharaktere atomnogo uporiadocheniya v ras plavakh systemy Zn-Sn. Fyzyka y khymia. 1980, t.25. №3. S-514-515.

УДК 004.896

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-132-145

ЗНАННЯ ОРІЄНТОВАНІ МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В МОДЕЛЮВАННІ ТРЕНАЖЕРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

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; milapoteriailo@gmail.com

У статті представлено результати досліджень у галузі симуляції процесів буріння із застосуванням сучасного комп'ютерного моделювання. Визначено основні параметри процесу буріння як теоретичні міркування, спрямовані на введення понять, пов'язаних із імітаційним моделюванням та комп'ютерним моделюванням в бурінні. Здійснено аналіз моделей, що використовують при симуляції процесів буріння. Висвітлено базові характеристики при моделюванні тренажера, що забезпечує цілісне сприйняття технологічних процесів, а також будь-яку ступінь їх деталізації. Висвітлено основні методи моделювання, що використовуються при розробці автоматизованих систем управління і тренажерів промислових установок, шляхи розробки їх математичного забезпечення і деякі аспекти створення ефективних програмно-комп'ютерних комплексів. Далі проведено огляд сутності технологічних тренажерів, з технічної точки зору висвітлено сучасний стан тренажерних систем для навчання операторів технологічних процесів. Наведено відмінності тренажерів від інших засобів навчання та специфіку тренажерів для технічних процесів. Коротко описано характерні особливості та перспективи тренажеробудування в різних галузях. Визначено обов'язкові складові частини тренажерів і критерії якості тренажерів. Проведено дослідження існуючих технічних рішень систем класу «Бурові тренажери». Зроблено висновки щодо практичних аспектів використання сучасних інженерних рішень симуляторів буріння. Визначено переваги в результаті використання тренажерів в різних видах оперативно-тактичних вправ, як основна форма вдосконалення оптимізації управління процесу буріння як для задач виробничих так і задач навчання. Особливий акцент зроблено на симуляторі Drillsimm5000, що використовується в процесі підготовки спеціалістів напряму буріння в Івано-Франківському технічному національному університеті нафти і газу. З позицій різних служб підприємства, зацікавлених в придбанні тренажерів, проаналізовано потенційні вигоди комп'ютерного тренінгу та завдання, які необхідно вирішити для успішної реалізації тренажерів, наведено проблеми, пов'язані з їх реалізацією.

Ключові слова: параметризація буріння, модель, прецедент, база знань, комп'ютерне моделювання, бурові тренажери.

В статье представлены результаты исследований в области симуляции процессов бурения с применением современного компьютерного моделирования. Определены основные параметры процесса бурения как теоретические рассуждения, направленные на введение понятий, связанных с имитационным моделированием и компьютерным моделированием в бурении. Осуществлен анализ моделей, использующих при симуляции процессов бурения. Освещены базовые характеристики при моделировании тренажера, что обеспечивает целостное восприятие технологических процессов, а также любую степень их детализации. Приведены основные методы моделирования, используемые при разработке автоматизированных систем управления и тренажеров промышленных установок, пути разработки их математического обеспечения и некоторые аспекты создания эффективных программно-компьютерных комплексов. Далее проведен обзор сущности технологических тренажеров, с технической точки зрения освещено современное состояние тренажерных систем для обучения операторов технологических процессов. Приведены отличия тренажеров от других средств обучения и специфику тренажеров для технических процессов. Коротко описаны характерные особенности и перспективы тренажеростроения в различных отраслях. Определены обязательные составные части тренажеров и критерии качества тренажеров. Проведено исследование существующих технических решений систем класса «Буровые тренажеры». Сделаны выводы относительно практических аспектов использования современных инженерных решений симуляторов бурения. Определены преимущества в результате использования тренажеров в различных видах оперативно-тактических упражнений, как основная форма совершенствования оптимизации управления бурения как для задач производственных, так и задач обучения. Особый акцент сделан на симуляторе Drillsimm5000, используемый в процессе подготовки специалистов направления бурения в Ивано-Франковском техническом национальном

университете нефти и газа. С позиций различных служб предприятия, заинтересованных в приобретении тренажеров, проанализированы потенциальные выгоды компьютерного тренинга и задачи, которые необходимо решить для успешной реализации тренажеров, приведены проблемы, связанные с их реализацией.

Ключевые слова: параметризация бурения; модель; прецедент; база знаний; компьютерное моделирование.

Presents the results of research in the field of simulation of drilling processes using modern computer modeling. The main parameters of the drilling process are determined as theoretical considerations aimed at introducing concepts related to simulation modeling and computer modeling in drilling. The analysis of the models used in the simulation of drilling processes is carried out. The basic characteristics of the simulator modeling are highlighted, which provides a holistic perception of technological processes, as well as any degree of their detailing. The main methods of modeling used in the development of automated control systems and simulators of industrial installations, ways of developing their software and some aspects of creating effective software and computer systems are presented. Further, a review of the essence of technological simulators is carried out, from a technical point of view, the current state of training systems for training operators of technological processes is highlighted. The differences between simulators and other teaching aids and the specifics of simulators for technical processes are presented. The characteristic features and prospects of simulator building in various industries are briefly described. The compulsory components of the simulators and the quality criteria of the simulators are determined. A study of the existing technical solutions for systems of the "Drilling simulators" class was carried out. Conclusions are made regarding the practical aspects of using modern engineering solutions for drilling simulators. The advantages are determined as a result of using simulators in various types of operational-tactical exercises, as the main form of improving the optimization of drilling control both for production tasks and training tasks. Particular emphasis is placed on the Drillsimm5000 simulator, which is used in the training of drilling specialists at the Ivano-Frankivsk Technical National University of Oil and Gas. From the standpoint of various services of the enterprise interested in purchasing simulators, the potential benefits of computer training and the tasks that need to be solved for the successful implementation of simulators are analyzed, problems associated with their implementation are presented.

Key words: parameterization of drilling, model, precedent, knowledge base, computer modeling, drilling simulators.

Вступ

Використання сучасних методів керування процесом буріння нафтових і газових свердловин, які ґрунтуються на використанні сучасних ІТ-технологій, забезпечує зниження до 25% витрат на спорудження свердловини [16].

Бурова техніка - це область застосування, в якій систематичне зберігання та ситуаційне повторне використання минулого конкретного досвіду забезпечують значну підтримку бурового персоналу на різних рівнях. Пошук оптимального проектного рішення передбачає розгляд безлічі варіантів розробки, і на практиці фахівці спираються на минулий досвід, вибираючи об'єкти-аналоги з готовими рішеннями, які застосовуються до нового об'єкту. При цьому високий ступінь невизначеності інформації про процеси і об'єкти нових родовищ обумовлює те, що кінцевий результат залежить від досвіду, інтуїції і суб'єктивних переваг фахівця. Цей результат не є гарантовано кращими серед можливих, а на його пошук потрібні істотні витрати часу.

Симулятор призначений для імітації дій фахівців, які безпосередньо виконують бурові роботи та відповідають за їх проведення,

модельовання об'єктів, відображення предметів в реальному чи гіпотетичному стані. Це дозволяє проведення експериментів із використанням моделей конкретних фрагментів реальності, що зменшують інформаційну ентропію, що характеризує сучасні ситуації прийняття рішень.[22]

Мета дослідження охарактеризувати існуючі інженерні рішення, що використовують знання орієнтовані методи для симуляції технологічних процесів, з'ясувати, які можливі переваги використання міркувань на основі конкретних випадків (СВР) може надати нафтогазовій галузі буріння при прийнятті рішень.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Більшість опублікованих праць та літератури співвідносить наступні аспекти параметризації, що враховуються при прийнятті рішень у процесі буріння свердловин на нафту і газ:

- геологічна будова родовища
- його розташування в просторі і пов'язані з ним рельєфні умови;

- кількість та якість корисних копалин
 - прогнозовані умови експлуатації родовища (факторам, їх зумовлюють) [13].

Технологічними елементами буріння є параметри режиму буріння (осьова сила на долото, швидкість його обертання, кількість та якість промивальної рідини), які можна цілеспрямовано змінювати з метою досягнення необхідних показників у кожному рейсі долота з урахуванням обмежень, встановлених геологотехнічним нарядом на свердловину [21].

На основі комплексної геолого-технологічної інформації алгоритм прогнозування дозволяє приймати рішення про вибір оптимальних значень режимних параметрів, при яких забезпечуються максимум швидкості буріння і мінімум вартості 1 м проходки [28].

Основою формування моделювання процесу буріння вважається встановлення В.С.Федоровим залежності механічної швидкості буріння V від навантаження на долото G і частоти його обертання n . В.С. Федоровим отримана емпірична залежність

$$V = a n^x G^y,$$

де x , a , y – коефіцієнти, які враховують характеристики гірського масиву і спосіб буріння; за даними Л.І. Штурмана при турбінному бурінні в породах Каширської світи $x = 0,7$; $y = 1,1$; $a = 0,0024$.

Із відомих типів моделей (концептуальних, фізичних, математичних) широке застосування у практиці буріння отримали математичні моделі, які у формалізованому вигляді встановлюють кількісні і якісні співвідношення між фізичними процесами, що відбуваються в механічній, гідродинамічній, електричній підсистемах бурової установки як складного технологічного комплексу, що функціонує за умов невизначеності. Основним процесом, який об'єктом формалізації за допомогою технологічних моделей, є процес взаємодії долота з гірською породою на вибої свердловини [12].

Моделювання швидкості проникнення (ROP) на бурове долото має важливе значення для оптимізації процесу буріння [6,11].

В практиці розглядають два різні підходи до прогнозування швидкості проникнення: підхід моделювання, заснований на фізиці та на основі даних.

Моделі, керовані даними, побудовані за допомогою алгоритмів машинного навчання, використовують для вимірювання швидкості проникнення використання вимірюваних поверхневих вхідних функцій - вага-долото, обертів і швидкість потоку.

На основі результатів цих симуляцій було зроблено висновок, що керовані даними моделі є більш точними та забезпечують кращу відповідність, ніж традиційні моделі. Моделі, керовані даними, працюють краще із середньою помилкою 12% та покращують прогноз корисності пристосування швидкості проникнення від 0,12 до 0,84 [4].

База знань користувача про параметри процесу буріння є основою для визначення методів реалізації технологічного симулятора автоматизованого управління процесом буріння свердловин, що дає змогу визначити необхідні керувальні дії.

У роботі [8] представлений метод зв'язку кількох свердловинних параметрів за допомогою алгоритмів машинного навчання.

В роботі [24] розглядається метод виведення рішення по прецедентам, як інструмент підтримки прийняття рішень при проектуванні та моделюванні родовищ нафти і газу. Пропонований підхід дозволяє мінімізувати вплив людського фактору, об'єктивізувати процес прийняття рішення, оскільки передбачає використання суворо формалізованої процедури з кількісним обґрунтуванням схожості порівнюваних об'єктів і розглядом всіх доступних в базі прецедентів. Останнє є ще однією перевагою використання СВР-системи, так як при традиційному підході людського ресурсу, як правило, не вистачає, щоб зробити вичерпний пошук і аналіз всіх можливих аналогів для прийняття рішень. На даний момент вже існує уявлення про родовища вуглеводнів як про прецедент. Інструмент підтримки прийняття рішень у вигляді СВР-системи і бази родовищ-прецедентів може бути задіяний на всіх стадіях проектування розробки родовищ, де необхідний вибір об'єкта-аналога, а не тільки при моделюванні.

Протягом багатьох років використання штучного інтелекту призвело до значних оптимізацій проектування та обчислень у світовій галузі розвідки та видобутку нафти, і його застосування лише продовжує зростати з

появою сучасних технологій буріння та виробництва [2].

Тому кілька досліджень [1,3,7] в останні роки пропонують використовувати моделі, керовані даними, із поля штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації ROP, запобігання ускладнень і аварійних ситуацій в процесі будівництва нафтових і газових свердловин.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Для того щоб мати можливість будувати точні прогнози видобутку, аналізувати і моделювати поточний стан свердловини важливо зберігати і накопичувати всю отриману інформацію про стан свердловин і параметрах буріння з перших метрів проходки і до закінчення буріння. Однак рішення даної задачі ускладнене через відсутність стандартних механізмів уніфікації технічної взаємодії між різними рішеннями, що в свою чергу перешкоджає формуванню єдиного інформаційного середовища симуляції процесів буріння.

Практика буріння нафтогазових свердловин показує, що основна причина невизначеності в ситуаціях прийняття рішень є наслідком невиконання інформаційних вимог повноти даних про технологічні процеси, що компенсується припущеннями чи гіпотезами на основі знань, досвіду та інтуїції. Тому оператор технічного процесу не повністю контролює хід технологічних процесів і перебуває у ситуаціях невизначеності та ризику, під тиском постійного дефіциту даних повинен висувати гіпотези про оцінку поточних та майбутніх подій.

В даний час сучасні комп'ютерні тренажери для навчання операторів знаходяться в процесі розвитку. Існує ряд проблем, істотно загальмовують їх розвиток. Перш за все, це пов'язано з великою кількістю різних компаній-розробників комп'ютерних тренажерів, жорстко конкурують між собою і тримають в суворій секретності позитивні і негативні результати своєї діяльності.

Проблема точності в комп'ютерному тренінгу зазвичай викликає найбільші дискусії. Саме поняття «точність» передбачає наявність дотримання вищенаведених вимог.

Повнота моделі - включення в модель абсолютно всієї технологічної схеми, значно здорожує тренажер і знижуючи швидкість моделювання, може мало що додавати до її цінності для тренінгу. Технологічні лінії, не задіяні при нормальному функціонуванні, пуску або зупинці, можуть не моделюватися. Резервне або паралельно працююче обладнання може моделюватися спрощено, деякі елементи обладнання можуть при моделюванні об'єднуватися в «пакети».

Зв'язність - необхідно забезпечити розрахунок всієї моделюється технологічної схеми, так щоб зміни на будь-якому її ділянці відбилися на всій схемі відповідно до реальних фізико-хімічними процесами, що протікають в моделюється об'єкті. Штучна ізольованість окремих частин ТП, ще властива деяким вітчизняним розробкам і є наслідком об'єктивної складності реалізації КТ, неприпустима. [19]

Одночасно виникає і проблема «старіння» комп'ютерних тренажерних комплексів, яка полягає в параметричних і структурних змінах технологічного процесу.

До основних проблем створення віртуальних тренажерів класу «Бурові тренажери»- імітатори будівництва свердловин можна віднести: складність або відсутність математичних моделей, які описують ті чи інші процеси буріння.

Поставлена задача має значний простір вирішення. Проте, безумовно комплектність проблеми є суттєвим бар'єром для її вирішення. Поява саме класу певних систем, систем на основі знань дає можливість використання саме минулого досвіду для побудови нових ефективних рішень. Тому, серед підходів менеджменту знань слід виділяти ефективність підходу кейс-базованих міркувань та інформаційно-пошукових задач на основі обмежень [27].

Формулювання цілей статті

Метою статті є огляд загальних принципів побудови тренажеру на знання базованих технологіях побудови бурових тренажерів, а також методичного та програмного забезпечення для навчання оперативного і диспетчерського персоналу об'єктів процесу буріння НГС.

Проведення аналізу існуючих тренажерних систем, тенденцій їх розвитку і загальних складових програмно-технічних тренажерних комплексів, з позиції концептуальних моделей, методів навчання оперативного і диспетчерського персоналу, програмно-технічного забезпечення тренажерного комплексу для навчання персоналу, що задіяні в технічних процесах буріння НГС.

З'ясувати в процесі синтезу знань суттєвих зв'язків між реальними технічними процесами і імітаційним моделюванням та комп'ютерним моделюванням в бурінні та виявити загальні закономірності, з метою поширення результатів дослідження на майбутню розробку знання базованої системи без повторення всього обсягу досліджень. В основу досліджень та для реалізації завдань дослідження покладено методи системного аналізу.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Технологічно спорудження свердловин пов'язане із цілою низкою задач, серед яких найважливіша – забезпечення успішного їх буріння із попаданням вибою у визначене коло допуску. Проблеми, що виникають при її 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 симулятором буде моделюватись технологічні процеси буріння слід брати до уваги фактори, які ускладнюють процес буріння.

Модель є центральним змістовним вузлом симулятора, який проектується з метою отримання навичок управління модельованими технічними процесами.

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.

Використання в процесі розробки технологій геоданих є першим кроком для створення цифрового двійника, симулятора 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.

Елементи інтегрованого управління вуглеводневими пластами з урахуванням використовуваних технологій, джерел даних, дослідницьких інструментів та складу групи управління наведено на рис.1. Блок-схема представляє питання, що стосуються техніки та технології розробки родовища вуглеводнів та елементів прийняття рішень, рекомендованих під час аналізу продуктивності нафтогазоносних пластів, а також визначення можливості стимулювання видобутку, або для відмови від розробки пласта або всієї розвідувальної свердловини. [10]. Типова система, що описує поведінку технологічної установки, що моделюється, може налічувати кілька тисяч рівнянь, але сучасні обчислювальні системи цілком справляються з таким обчислювальним навантаженням.

Структурно в тренажерній моделі можна виділити власне фізико-хімічну модель, що описує рівноважну динаміку, гідравліку, кінетику, збереження балансів та ін. аспекти функціонування технологічних процесів, і модель системи керування, що розташовується між фізичним об'єктом і оператором і включає в себе вимірювальні прилади, систему сигналізації і блокувань, базові регулятори, системи логічного управління, вдосконалені контролери та ін.

Фізико-хімічна модель щоразу унікальна і тому може бути створена і модифікована тільки розробником тренажера, а модель системи керування практично для всіх технологічних процесів складається зі стандартних елементів і більш відкрита для користувача як в разі повної емуляції, так і при часткової або повної симуляції.

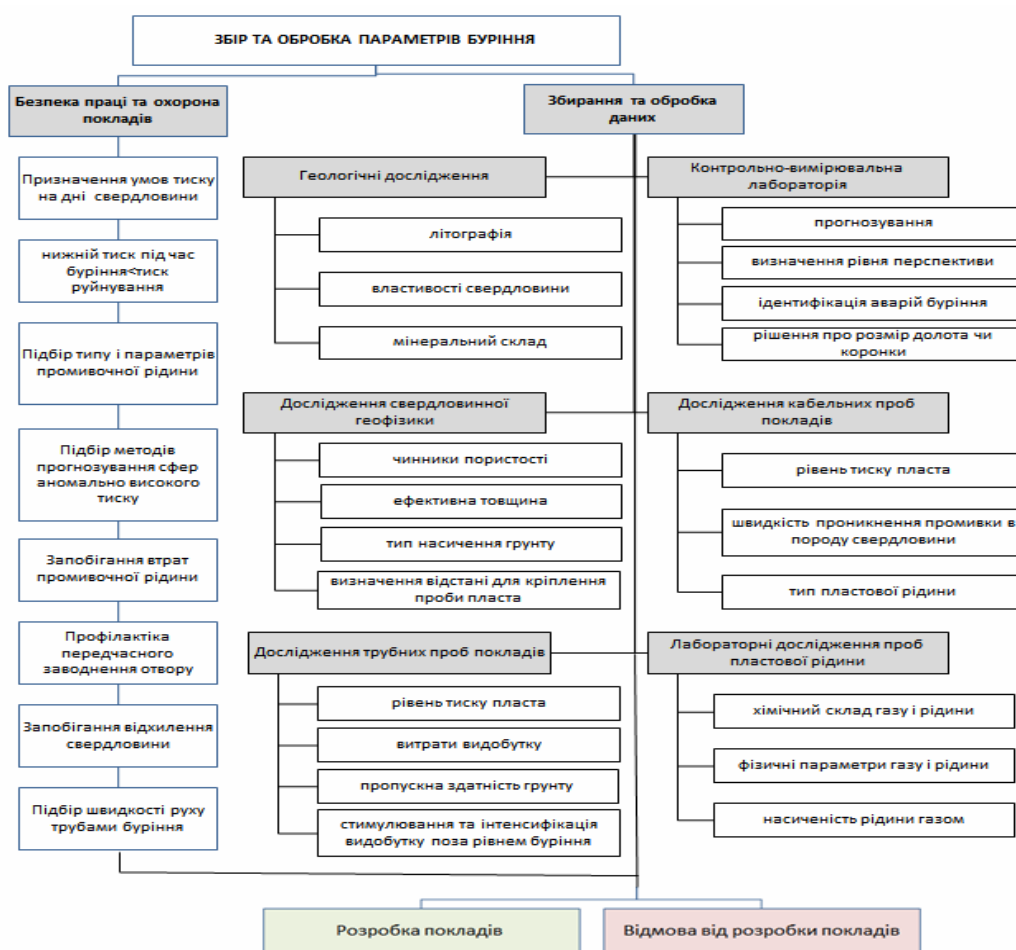


Рисунок 1 - Проблеми буріння в продуктивному горизонті

Виходячи з цілей навчання тренажерні моделі можна розділити на стандартні, що відображають поведінку цілого класу технологічних процесів або окремих поширених технологічних вузлів і апаратів, і спеціалізовані, що описують функціонування конкретних технологічних установок.

Отже, моделі тренажерів повинні мати наступні властивості:

- повноти, тобто надавати навчаючому всю істотну інформацію про хід технологічного процесу і всі основні точки управління.
- зв'язності, подія, внесена на одній ділянці технологічної схеми, має проявитися скрізь, де цього вимагає будова технологічного процесу. Ця умова, часто вимагає від розробника тренажера значних зусиль, буває дуже жорсткою в спеціалізованих системах. В стандартних тренажерах деякі неважливі зв'язки можуть бути проігноровані.

- забезпечувати задану статичну і динамічну точність. В стандартних моделях точність задається щодо деяких усереднених технологічних режимів і, як правило, зводиться до правильного напрямку і порядку змін значень параметрів. У спеціалізованих моделях потрібно наблизитися до відомих з практики або експертно оцінених, статичних і динамічних режимів.

В результаті проведених аналітичних узагальнень і оцінки визначено обов'язкові складові частини тренажерів. Виокремлюються такі компоненти тренажерів - модель технологічних процесів, інформаційна модель і модель навчання.

1. Будь-який тренажер містить імітацію реального об'єкта, оскільки тренажер створюється саме тому, що реальний об'єкт неможливо, небезпечно чи дорого використовувати для навчання. Симулятор об'єкта називають тренажерною моделлю об'єкта.

2. У будь-якому тренажері взаємодія учня з моделлю об'єкта здійснюється за допомогою спеціального середовища - інформаційною моделлю. З допомогою якої здійснюється вплив на тренажерну модель і отримується інформація про її стан. У сучасних термінах інформаційна модель являє собою інтерфейс.

3. Тренажерна модель, забезпечена інформаційною моделлю є лише імітатором реального об'єкта з можливістю маніпулювання. Імітатор стає тренажером з появою правил, методів, рекомендованого складу тренувальних вправ та інших атрибутів навчання. Все це є моделлю навчання.

Таким чином, для кожної предметної області, буріння зокрема, можна виділити кілька основних випадків, які також можна трактувати як типові, найпоширеніші. На рівні бази знань ми отримуємо деяке ядро бази знань, яке буде інформаційною основою тренажера.

Виходячи з даної проблеми (технологічна проблема в галузі буріння нафтових і газових свердловин), слід використовувати відповідну методологію міркувань, щоб мати змогу знайти минулі подібні випадки з метою багаторазового або модифікованого її використання для нового рішення з врахуванням поточних проблем (наприклад, вибір режиму буріння: вимушений, оптимальний, раціональний тощо) [9].

Технологічний цикл управління процесом видобутку формується інформаційним циклом «Вимірювання - Корекція - Контроль - Прогноз - Вплив». Однак, прецеденти, не завжди використовуються ефективно для аналізу процесів через відсутність добре організованих даних, де існує величезний потенціал перетворення даних у знання.

Організація та вдосконалення даних мають стати важливими компонентами при проектуванні тренажера. Схема алгоритма прийняття рішень на основі CBR наведено на рис.2.

Знання слід організувати навколо найбільш важливих об'єктів предметної області. Всі знання, що характеризують деяку сутність, зв'язуються і подаються вигляді окремого об'єкту. Якщо системі потрібна інформація про деяку сутність, то вона спочатку шукає об'єкт, що її описує, а потім вже всередині об'єкту шукає інформацію про дану сутність. В об'єктах, в свою чергу, виділяють два типи зв'язків між елементами – зовнішні і внутрішні. Внутрішні зв'язки об'єднують елементи в єдиний об'єкт і утворюють його структуру. Зовнішні зв'язки відображають залежності, що існують між об'єктами в предметній області. Зовнішні зв'язки поділяють на логічні і асоціативні. Логічні зв'язки виражають семантичні відношення між елементами знань. Асоціативні зв'язки забезпечують взаємозв'язки, що прискорюють пошук релевантних знань. Кожен виділений об'єкт предметної області володіє певними характеристиками та властивостями. Наприклад в бурінні, для об'єкту «родовище» типовими атрибутами є глибина залягання, вік, літологія тощо. Атрибути набувають конкретних значень [15]. Симуляція розглядається як з'єднувальна ланка між знаннями, що містяться в активованих наборах даних, і здатністю до швидкого вивчення попередньо отриманих ідей та експертного досвіду стосовно наведених статистичних оцінок даних [26].

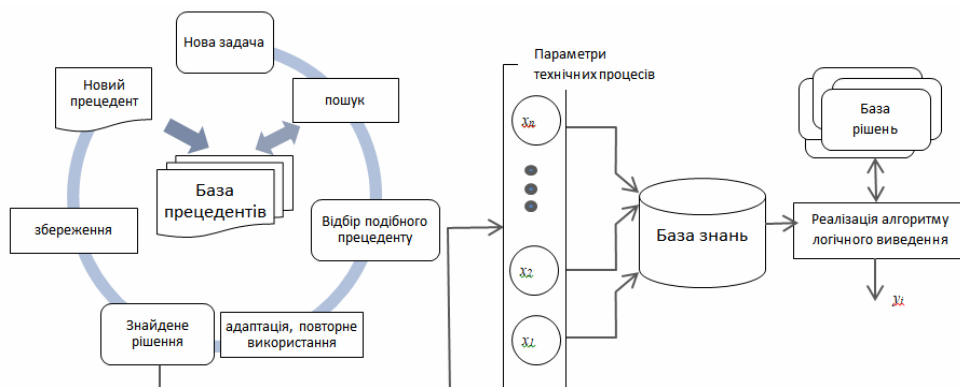


Рисунок 2 - Схема алгоритма прийняття рішень на основі CBR

Загальна структура комп'ютерного тренажеру з технічної точки зору, являє собою програмно-апаратний комплекс і включає в себе:

- станцію, що моделюється, на якій вирішується система алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують модель технологічного процесу;
- станції учнів, на яких реалізовано інформаційну модель;
- робочу станцію інструктора навчання, з допомогою якої інструктор організує і відстежує хід тренінгу.

При цьому станція, що моделюється, як правило, поєднується на одній обчислювальній системі з інструкторською, оскільки характеристики сучасних обчислювальних систем дозволяють в багатозадачному режимі одночасно розраховувати кілька тренажерних моделей і реалізовувати інструкторські функції.

При всій важливості технічних складових тренажерів очевидно, що ці цілі недосяжні, якщо основа тренажера - модель технологічного процесу - не буде адекватною і не відобразить актуального стану реального технічного процесу. [23]

Більшість серйозних тренажерних систем є складними програмно-апаратними комплексами. Вимоги до сучасних тренажерних систем та комплексам в даний час досить жорсткі і перекрити всі наявні потреби засобами однієї лише комп'ютерної графіки неможливо. Об'єктами тренінгу є відтворення динаміки модельованого об'єкта, імітація роботи засобів вимірювання і управління об'єктом, і відтворення апаратної частини людино-машинного інтерфейсу.

Сучасні тренажерні системи мають загальні вимоги, структуру та закономірності проектування. В той же час спостерігається і безліч відмінностей, які обумовлені сферою застосування, аналіз яких дозволяє виявити особливості тренажерів для операторів технологічних процесів і виробити обґрунтовані критерії оцінки їх якості.

Технологічні тренажери з'явилися в потенційно небезпечних сферах. Це пов'язано з великим ризиком для життя і безпеки людей та жорсткими вимогами законодавства в галузі підготовки і сертифікації працівників в цих галузях. Тренажери знаходять все більше

застосування в авіації, судноводінні, енергетиці, збройних силах, медицині, космонавтиці і тих областях, де проведення фізичного навчання пов'язане з зазначеними труднощами.

В морських тренажерах центральне місце відводиться моделі морської обстановки, що забезпечує учня ключовою зоровою інформацією (зміна берегової лінії, зустрічні судна, сигнали навігаційного обладнання та ін.). У тренажерах для високоманеврових морських засобів, в автомобільних і авіаційних тренажерах особлива увага відведена моделюванню швидкоплинного навколишнього оточення і відчуттів оператора (лінія горизонту, звуки, вібрація, положення тіла, перевантаження, зусилля на органах управління і ін.). В енергетичних тренажерах (особливо в таких як тренажери оперативних перемикачів) людина часто виступає як диспетчер, для якого візуальна інформація є радше засобом актуалізації знань про структуру процесу, ніж показаннями приладів. Вважається, що до 80% поточної інформації отримується диспетчером з додаткових джерел (телефонія, телеметрія, електронна пошта і т.п.), тому модель об'єкта диспетчеризації також відображає таку специфіку.

Основною цільовою функцією оптимізації буріння є швидкість проникнення обчислена з використанням параметрів буріння як вхідних даних. Однак, успішною моделлю тренажера можна вважати, використання якого призведе до оптимізації таких параметрів буріння як мінімізація відхилення від запланованої траєкторії свердловини та максимізація коефіцієнту корисної дії.

Сьогодні моделі тренажерів класу «Бурові тренажери» варіюються від звичайних портативних і повномасштабних тренажерів-симуляторів буріння і управління свердловиною до новітніх моделей з кібер-кріслом, доповнюються опціями за індивідуальними вимогами.

Як приклад простих рішень мобільний додаток «Wellcontrol», що працює в середовищі операційної системи IOS, містить мнемосхему гідравлічної лінії бурової установки. Анімаційне супровід, що створює ефект присутності, візуалізує зміну технологічного процесу в залежності від обраних команд оператора. Тренажер компанії «Learn to drill» призначений

для навчання основам ліквідації газонафтоводопроводів. Інтерфейс тренажера розроблений таким чином, що оператор бачить статус виконання операцій, параметри яких він може регулювати. Процес управління технологічними процесами супроводжується анімацією, елементи управління аналогічні контролерам, що застосовуються на виробництві [20].

В даний час за кордоном розвиваються кілька тренажерних платформ, розроблених і підтримуваних основними світовими виробниками комп'ютерних тренажерних комплексів (КТК) (ABB Simeon, Inc., Honeywell, Inc., CAE Link, Inc. і ряд інших).

До найбільш відомих симуляційних систем, що добре себе зарекомендували, можна віднести тренажери наступних виробників: комплекс віртуальних тренажерів «Слайд Майстер 1.18», «АМТ-231» (ЗАТ «Автоматизація Моніторингу Технологій»), DART (КАА DEUTAG), DrilSim20, DrillSim5000 [17].

Комплекс віртуальних тренажерів «Слайд Майстер 1.18» складається з 4 симуляторів процесів, що застосовуються в ході підготовки до буріння і безпосередньо буріння:

- тренажер КНБК (компоновки низу бурильної колони);
- тренажер Міра Інструменту;
- тренажер Буріння похило-спрямованого буріння (відповідно до варіанту);
- тренажер Буріння похило-спрямованого буріння вибір профілю.

Апаратно-програмний комплекс тренажера складається з пультів і постів управління обладнанням для проведення свердловин, персонального комп'ютера і програмного забезпечення.

Тренажер імітує в реальному і прискореному масштабах часу технологічні процеси провідки свердловин: поглиблення, спускопідйому, цементування, ліквідації нафтогазопроводів.

Програмне забезпечення тренажера містить засоби проектування навчальних завдань з будь-якими початковими умовами виконання провідки свердловин: характеристиками продуктивного пласта, конструкцією свердловини, набором устаткування і інструменту, технологій виконання основних операцій, нестандартними ситуаціями.

При імітації технологічних процесів на екран монітора виводяться: числові характеристики умов імітованого процесу, графіки найважливіших контрольованих технологічних параметрів, а також анімації, що відображають в реальному часі роботу обладнання, інструменту та стан свердловини. Імітація роботи обладнання супроводжується звуком. Тренажер дозволяє учням побачити приховані від прямого спостереження процеси, що відбуваються в свердловині, спостерігати процеси виникнення і розвитку ускладнень і аварійних ситуацій. Він дає можливість учнем перевірити і порівняти різні варіанти вирішення технологічних задач.

Тренажер DART (Drilling and Advanced Rig Training) обладнаний екранами для відтворення 3D-графіки, звуковими колонками, віртуальними люльками бурильника, пультом керування. Тренажер DART дозволяє відпрацьовувати навички буріння і різні сценарії в режимі реального часу для конкретного випадку із застосуванням технології візуального внутрішньосвердловинного моделювання та тим самим оптимізувати процес навчання.

В системі DART використовується програмне забезпечення, яке інтегрує і відтворює свердловинні умови. Імітація основних технологічних процесів проводиться учнем із застосуванням ЕОМ, при цьому робота бурового обладнання і сама свердловина візуалізуються на декількох екранах, завдяки високоякісній 3D графіці і імітації процесу в режимі реального часу

Можливості тренажера DART наступні:

- забезпечує реалістичні практичні рішення в процесі навчання і підготовки бурових бригад до початку роботи на новій буровій установці або початку нового проекту з буріння;

- дозволяє пробурити віртуальну свердловину по заданих проектним параметрам і виявити потенційні проблеми;

- сприяє підвищенню ефективності когось комунікація та згуртованості бурових бригад.

Даний вид тренажера головним чином застосовується для перевірки навичок членів бурової вахти, а саме бурильників і виключно для ілюстрації роботи бурового персоналу або

перепідготовки бурильників в рамках підвищення кваліфікації.

При створенні даного тренажера був застосований типовий підхід «від меншого до більшого» в системі «бурильник - робоче місце - умови праці». Але з огляду на ступінь оригінальності умов буріння на кожній реальній свердловині, говорити про універсальність DART не доводиться.

Цей підхід краще розкриває причинно-наслідковий зв'язок між виконуваними операціями і отриманим результатом. Одним з головних недоліків є можливість працювати на тренажері всього лише одного або двох-трьох операторів.

Наряду з вищенаведеними інженерними рішеннями у світі, в таких країнах як Угорщина, Данія, Голландія, Польща, Японія, Росія, Франція, США, Туреччина, Китай, Іран та інших тренувальні центри для сертифікації та перепідготовки працівників, що замагаються розробкою родовищ використовують тренажер DrillSim5000, виробник Англія.

Тренажер DrillSim5000 забезпечений подібно сучасному обладнанню бурової установки.

Склад тренажера:

- робоче місце бурильника (блоки управління обладнанням та реєстраційних приладів);
- пульт управління противикидним обладнанням (ПВО);
- пульт управління гідравлічними дроселями (керованими штуцерами);
- манифольд стояків та манифольд дроселів;
- робоче місце інструктора-викладача.

Відтворені на пультах тренажера засоби управління і контрольно-вимірювальна апаратура майже не відрізняються від реального обладнання.

Інтерфейс Тренажера «Drillsim 5000» відображає безліч модулів, що імітують робочі місця фахівців в бурінні. Тренажер влаштований таким чином, щоб оператор міг тренуватися на базі віртуальної версії або фізичної приладовій панелі, завдяки можливості підключення безлічі контролерів по імітації осьового навантаження на долото, регулювання параметрів промивки і т.д. Функціональна можливість з обміну даними в реальному часі через інтерфейси дозволяє

підключити декілька фізичних приладових панелей управління бурінням до єдиного інтерфейсу (монітора).

Для максимальної відповідності реальним умовам обстановки буріння використовуються цифрові звукові ефекти, повністю синхронізовані з різними операціями, що здійснюються на тренажері. Кольоровий графічний монітор з високою роздільною здатністю дозволяє учню отримувати в реальному часі графічну інформацію про роботу спускопідйомного обладнання і роторної системи в процесі буріння, а також іншого обладнання. Дії оператора тренажера відображаються на моніторі.

Індивідуальна станція учня з сенсорним екраном поставляється в комплекті обладнання тренажера для спостереження за параметрами, не пов'язаними безпосередньо з обладнанням бурової установки, наприклад, для спостереження за зміною питомої ваги бурового розчину [25].

Повномасштабний бурової тренажер DrillSim-5000 дозволяє моделювати практично будь-яку бурову установку, яка існує на сьогоднішній день. На додаток до оперативних завдань, інструктор може вводити численні несправності. На тренажері моделюється все стандартне обладнання, яке присутнє на будь-якій буровій установці.

Крім того моделюються

- параметри бурового розчину і циркуляційної системи, бурильного інструменту і процесу буріння, талевої системи;
- система управління свердловиною і запобігання ГНВП;
- позаштатні ситуації, які можуть виникнути на виробництві (всі позаштатні ситуації задаються інструктором зі свого робочого місця);
- широкий діапазон забійних умов;
- ГНВП і глушіння свердловини;
- стандартний процес буріння і спускопідйомних операцій (СПО).
- процеси, пов'язаних з капітальним ремонтом свердловини [5].

Наряду з повномасштабним тренажером використовується портативний тренажер реального часу буріння і управління DrillSim20. Інтерактивний тренажер є економічно ефективним засобом проведення практичного

навчання з контролю за свердловинами за визнаними стандартами акредитації, включаючи IADC та IWCF.

DrillSim20 включає в себе дві консолі, робоче місце бурильника з сенсорним екраном і ноутбук інструктора, які упаковані в міцний захисний кейс, зручний для транспортування і проведення навчання в будь-якому місці, в будь-який час.

Підтримує повні можливості свердловинної моделі DrillSim.

Таблиця 1 - Порівняльна техніко-функціональна характеристика тренажерів

Показники	Слайд Майстер 1.18	AMT -231	DAR T	DrillSim 5000	Drill Sim 20
Тренажер має реалістичні динамічні властивості	-	+	+	+	+
Симуляція аварій і ускладнень	-	+	+	+	+
Автоматичний режим	+	+	+	+	+
Інтерфейс відповідає прийнятим стандартам	+	+	+	+	+
Розробник може емулювати типовий операторський інтерфейс	-	-	+	+	-
Оцінка і складання звітності	+	+	+	+	-
Декілька станцій тренування	-	+	-	+	-

В результаті огляду систем класу «Бурові тренажери» бачимо, що тенденція використання тренажерних комплексів в наш час має під собою вагомий підстави. Однак без недоліків не обійшлося. Основне досліджуване устаткування не моделюється, а обчислюється, не враховуючи динаміки, або обчислюється за готовими формулами з незмінними параметрами.

Висновки

Представлено основні тенденції використання штучного інтелекту при симуляції технологічних процесів. Доведено високу ефективність цього засобу навчання та необхідність його впровадження у навчальну і їх професійну підготовку. Деталізовано структуру сучасних тренажерів з погляду технічної

сторони, особливий акцент зроблено на організації інформаційної моделі.

Узагальнено задачі, які на сьогоднішній день не повністю вирішені при реалізації проектних рішень побудови тренажерів, а саме питання формування адекватної бази даних, питання критеріїв, що стосуються суб'єктивності визначення важливості епізодів та доцільності занесення прецедентів до бази, організації даних, де існує величезний потенціал перетворення даних у знання.

Проаналізовано виникнення, етапи розвитку та сучасний стан комп'ютерних тренажерів, що застосовуються в підготовці персоналу НГС.

Список використаних джерел

1. Barbosa, Luis Felipe et al. "Machine learning methods applied to drilling rate of penetration prediction and optimization - A review." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 183 (2019): 106332.
2. Bello, O. et al. "Application of Artificial Intelligence Techniques in Drilling System Design and Operations: A State of the Art Review and Future Research Pathways." (2016).
3. 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>
4. Chiranth Hegde, Hugh Daigle, Harry Millwater, Ken Gray Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. Publication: *Journal of Petroleum Science and Engineering* Publisher: Elsevier. Date: November 2017.
5. DrillSIM:5000 Classic [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.drillingsystems.com/product/drillsim5000/>.
6. Hegde, C. et al. "Fully coupled end-to-end drilling optimization model using machine learning." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 186 (2020): 106681.
7. Hegde, Chiranth et al. "Performance Comparison of Algorithms for Real-Time Rate-of-Penetration Optimization in Drilling Using Data-

Driven Models.” Spe Journal 23 (2018): 1706-1722.

8. Pollock, J. et al. “Machine Learning for Improved Directional Drilling.” (2018).

9. Sheketa V. Case-based modelling of data and knowledge // Sheketa V., Chesanovsky M., Styslo T., Romanyshyn Y., Poteraiilo L. // 14-a міжнародна науково-практична конференція “Математичне та імітаційне моделювання систем – МОДС 2019” .– Чернівці.– 2019.–С.177–181.

10. Stanisław Dubiel Barbara Uliasz-Misiak Analiza decyzji technologicznych podejmowanych w zakresie zarządzania złożem węglowodorów przy dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż Przegląd Górniczy 2014; 70 (12) : 106-113; (PL)

11. Yanlong Li, Lei She, Lifeng Wen, Qiang Zhang Sensitivity analysis of drilling parameters in rock rotary drilling process based on orthogonal test method. Publication: Engineering Geology. Publisher: Elsevier. Date: Available online 5 March 2020.

12. Білецький В., Сергеев П., Фик М., Козирець С. Моделювання в нафтогазовій промисловості Geotechnologies Journal homepage: <http://library.kpi.kharkov.ua/> Volume 1 (2018), pp. 86-98

13. Бурение (добыча, транспортировка, переработка) [Электронный ресурс] // Техническая библиотека транспортировка и хранение. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://neftgaz.ru/tech-library/burenie/141992-burenie-1/>.

14. Волкова М. М., Манурова Р. А., Шайдуллина Д. Н. Применение виртуальных тренажеров для обучения специалистов нефтегазовой отрасли Вестник технологического университета. 2019. Т.22, №4 115 УДК 66-9.

15. Гобир Л.М. Ймовірнісна оцінка результатів інтерпретації даних та параметрів геофізичних досліджень / Гобир Л.М., Вовк Р.Б., Потеряйло Л.О., Шекета В.І. // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”. – 2018. – №3(68).– С. 46-59.

16. Горбійчук М.І. Оптимізації процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенов. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.

17. Гриб П.С. Цифровые тренажерные комплексы как средство оптимизации бурения и

эксплуатации скважин Инженерная практика 08/2019.

18. Дарьин А. А. Некоторые аспекты моделирования при создании интерактивных средств обучения операторов Тип: статья в сборнике трудов конференции, 2020 Страницы: 116-118.

19. Дозорцев В. М., Кнеллер Д. В., Левит М. Ю. О проблеме адекватности тренажерных моделей технологических процессов/Труды междунар. конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'2000)». М.: 2000. С. 51–61.

20. Мухаметгалиев И.Д., Агзамов З.В. Разработка человеко-машинного интерфейса тренажера наклонно-направленного бурения «Молодой учёный» №27 (317), июль 2020

21. Мыслюк М.А., Стефурак Р.И., Рыбчик И.И., Ю.М.Васильюк Совершенствование технологии обработки трёхшарошковых долот при роторном бурении скважин /. – М.: ОАО. ВНИИОЭНГ, 2005. – 212 с.

22. Потеряйло Л.О. Моделювання імітаційної моделі керування процесами буріння на основі прецедентів /Потеряйло Л.О. , Процюк В.В. , Кравців К.І// Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості » - - ІГОТП-2020 -Івано-Франківськ, 8 жовтня 2020.

23. Потеряйло Л.О. Використання СВР при реалізації інженерних рішень систем класу «Бурові тренажери» /Потеряйло Л.О. , Процюк В.В. , Кравців К.І//VI Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», Дніпро, 4 листопада 2020р. – Дніпро, 2020.

24. 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. – Текст: непосредственный. ISBN 978-5-9961-2225-7 .

25. Функциональные возможности полномасштабного бурового тренажера DrillSim-5000 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.gubkin.ru/faculty/oil_and_gas_develop

ment/chairs_and_departments/drill_center/DrillSim-5000.php.

26. Чесановський М.С. Особливості контролю параметрів процесу буріння в контексті підтримки прийняття релевантних рішень / Чесановський М.С., Шекета В.І., Процюк В.В. // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал “Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ”. – 2018.

27. Шекета В.І. Формально-алгоритмічна імплементація моделей кейсів даних про процес буріння / В.І. Шекета, М.С. Чесановський, Л.О. Потеряйло // Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем : IV Міжнар. наук.-техн. конф., Дніпро, 1-2 листопада 2018р. – Дніпро, 2018. - С. 312-314.

28. Эфендиев, Алиев С.А., Сарбопеева М.Д., Агаева К.К., Кирисенко О.Г. Принятие решений при выборе долот и режимных параметров бурения в зависимости от характера исходной информации г.м., геоинформатика, 2016, №3 (59).

References

1. Barbosa, Luis Felipe et al. “Machine learning methods applied to drilling rate of penetration prediction and optimization - A review.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 183 (2019): 106332.

2. Bello, O. et al. “Application of Artificial Intelligence Techniques in Drilling System Design and Operations: A State of the Art Review and Future Research Pathways.” (2016).

3. 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>

4. Chiranth Hegde, Hugh Daigle, Harry Millwater, Ken Gray Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. Publication: *Journal of Petroleum Science and Engineering* Publisher: Elsevier. Date: November 2017.

5. DrillSIM:5000 Classic [Електронний ресурс] Retrieved from: <https://www.drillingsystems.com/product/drillsim5000/>.

6. Hegde, C. et al. “Fully coupled end-to-end drilling optimization model using machine learning.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 186 (2020): 106681.

7. Hegde, Chiranth et al. “Performance Comparison of Algorithms for Real-Time Rate-of-Penetration Optimization in Drilling Using Data-Driven Models.” *Spe Journal* 23 (2018): 1706-1722.

8. Pollock, J. et al. “Machine Learning for Improved Directional Drilling.” (2018).

9. Sheketa V. Case-based modelling of data and knowledge // Sheketa V., Chesanovsky M., Styslo T., Romanyshyn Y., Poteriailo L. // 14th International Scientific and Practical Conference “Mathematical and Imitational Models of Systems - MODS 2019”. Chernigiv. 2019. pp.177–181.

10. Stanisław Dubiel Barbara Uliasz-Misiak Analiza decyzji technologicznych podejmowanych w zakresie zarządzania złożem węglowodorów przy dowiercaniu, opróbowaniu i udostępnianiu złóż *Przegląd Górniczy* 2014; 70 (12) : 106-113; (PL)

11. Yanlong Li, Lei She, Lifeng Wen, Qiang Zhang Sensitivity analysis of drilling parameters in rock rotary drilling process based on orthogonal test method. Publication: *Engineering Geology*. Publisher: Elsevier. Date: Available online 5 March 2020.

12. Biletskyi V., Serhieiev P., Fyk M., Kozurets S. Modeliuvannia v naftohazovii promyslovosti [Modeling in the oil and gas industry] *Geotechnologies Journal* homepage: <http://library.kpi.kharkov.ua/> Volume 1 (2018), pp. 86-98.

13. Burenie (dobycha, transportirovka, pererabotka) [Yelektronniy resurs] // *Tekhnicheskaya biblioteka transportirovka i khranenie*. 2013 Retrieved from: <https://neftegaz.ru/tech-library/burenie/141992-burenie-1/> (in Russ.).

14. Volkova M. M., Manurova R. A., Shaydullina D. N. Primenenie virtualnykh trenazherov dlya obucheniya spetsialistov neftegazovoy otrasli [Using virtual simulators in training oil and gas professionals] *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2019.; T.22,4 115 UDK 66-9 (in Russ.).

15. Hoby L.M. Ymovirnisna otsinka rezultativ interpretatsii danykh ta parametriv heofizychnykh doslidzhen / Hoby L.M., Vovk R.B., Poteriailo L.O., Sheketa V.I. // *Vseukrainskyi shchokvartalny*

naukovo-tekhnichnyi zhurnal “Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch”. 2018;3(68).p. 46-59(in Ukr.).

16.Horbiichuk M.I. Optymizatsii protsesu burinnia hlybokykh sverdlovykh / M.I.Horbiichuk, H.N.Sementsov. – Ivano-Frankivsk: Fakel, 2003, 493 p. (in Ukr.)

17.Grib P.S. Tsifrovye trenazhnyye kompleksy kak sredstvo optimizatsii bureniya i ekspluatatsii skvazhin Inzhenernaya praktika 08.2019 (in Russ.).

18.Darin A. A. Nekotorye aspekty modelirovaniya pri sozdani interaktivnykh sredstv obucheniya operatorov Tip: statya v sbornike trudov konferentsii. 2020 pp: 116-118 (in Russ.).

19.Doziertsev V. M., Kneller D. V., Levit M. Yu. O probleme adekvatnosti trenazhnykh modeley tekhnologicheskikh protsessov//Trudy mezhdunar. konferentsii «Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya (SICPRO’2000)». Moskow: 2000. p. 51–61 (in Russ.).

20.Mukhametgaliev I.D., Agzamov Z.V. Razrabotka cheloveko-mashinnogo interfeysa trenazhera naklonno-napravlenogo bureniya «Molodoy uchenyy» 27(317), 07.2020 (in Russ.).

21.Myslyuk M.A., Stefurak R.I., Rybchich I.I., Yu.M.Vasylyuk Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki trekhsharoshkovykh dolot pri rotnom burenii skvazhin/ Moskow: OAO VNIIOENG, 2005. – 212 p. (in Russ.).

22.Poteriailo L.O. Modeliuvannia imitatsionnoi modeli keruvannia protsesamy burinnia na osnovi pretsedentiv /Poteriailo L.O. , Protsiuk V.V. ., Kravtsiv K.I// Vseukrainskoi nauk.-prakt. konf. «Informatsiini tekhnolohii v osviti, tekhnitsi ta promyslovosti » - ITOTP-2020 -Ivano-Frankivsk, 8 zhovtnia 2020.

23.Poteriailo L.O. Vykorystannia CBR pry realizatsii inzhenernykh rishen system klasu «Burovi trenazhery» /Poteriailo L.O. , Protsiuk V.V. ., Kravtsiv K.I//VI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system», Dnipro, 4.11.2020. – Dnipro, 2020. (in Ukr.)

24.Razrabotka protsessa prinyatiya resheniy pri modelirovanii i proektirovanii mestorozhdeniy uglevodorodov na osnove vyvoda po pretsedentam. Novye informatsionnye tekhnologii v neftegazovoy otrasli i obrazovanii: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii; otv. red. O. N. Kuzyakov. Tyumen:

TIU, 2019. 324 p. (in Russ.).

25.Funktsionalnye vozmozhnosti polnomasshtabnogo burovogo trenazhera DrillSim-5000 [Yelektronniy resurs] – Retrieved from: https://www.gubkin.ru/faculty/oil_and_gas_development/chairs_and_departments/drill_center/DrillSim-5000.php. (in Russ.).

26.Chesanovskyi M.S. Osoblyvosti kontroliu parametriv protsesu burinnia v konteksti pidtrymky pryiniattia relevantnykh rishen / Chesanovskyi M.S., Sheketa V.I., Protsiuk V.V. // Vseukrainskyi shchokvartalnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal “Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch”. 2018(in Ukr.).

27.Sheketa V.I. Formalno-alhorytmichna implementatsiia modelei keisiv danykh pro protses burinnia / V.I. Sheketa, M.S. Chesanovskyi, L.O. Poteriailo // Kompiuterne modeliuvannia ta optymizatsiia skladnykh system: IV Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., Dnipro, 1-2 lystopada 2018r. Dnipro, 2018. p. 312-314 (in Ukr.).

28.Efendiev, Aliev S.A., Sarbopeeva M.D., Agaeva K.K., Kirisenko O.G. Prinyatie resheniy pri vybore dolot i rezhimnykh parametrov bureniya v zavisimosti ot kharaktera iskhodnoy informatsii g.m., geoinformatika, 2016, 3 (59) (in Russ.).

Вимоги до оформлення статей

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 самоплагіату.

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, сформувані 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 стаття подається он-лайн, після попереднього узгодження тематики статті з проблематикою журналу:

<https://nv.nung.edu.ua> – журнал: "Науковий вісник ІФНТУНГ",

<https://rrngr.nung.edu.ua> - "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ",

<https://nge.nung.edu.ua> - "Нафтогазова енергетика",

<https://mpky.nung.edu.ua> - журнал "Методи та прилади контролю якості",

<https://eung.nung.edu.ua> - журнал "Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості";

<https://ogpe.nung.edu.ua> – журнал «Journal of Hydrocarbon Power Engineering»;

<https://ebzr.nung.edu.ua> – журнал «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування».

Електронна пошта редакції: redntv@nung.edu.ua

Стаття повинна бути структурована за такими пунктами:

1. Назва статті відтворює її зміст та привертає увагу наукової 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 (з пробілами, українською, російською та англійською).

4. Ключові слова повинні конкретизувати інформацію про дослідження, але не узагальнювати її. Складаються з 3-6 слів, 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...».

6. Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми і на які посилається автор.

7. Висвітлення невіршених 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.

Кількість дослідів повинна бути достатньою, об'єм вибірок має відповідати аналогічним дослідженням, опублікованим в міжнародних наукових виданнях. Дослідні дані обробляють коректними статистичними методами (перевагу надавати якомога сучаснішим багатомірним). Аналіз результатів містить достатнє статистичне обґрунтування і відповідає загальноновизнаним нормам нафтогазової галузі.

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, ліве – 30, праве – 15.

2. Порядок набору:

УДК (Times New Roman (Сур), кегль 11, без абзацного відступу, вирівнювання – зліва).

Назва статті (Arial (Cyr), кегль 14, bold, прописом, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 9 пт).

Ініціали, прізвище автора (співавторів) (Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру). Прізвище відповідального за подання статті автора повинно бути позначене зірочкою.

Назва організації, її повна поштова адреса, адреса електронної пошти (Times New Roman (Cyr), кегль 11, italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка знизу – 12 пт). Якщо автори статті представляють декілька організацій, то необхідно для кожної організації аналогічно вказати її назву, повну поштову адресу і адресу електронної пошти.

Анотації українською, російською та англійською мовами – кегль (менший від основного тексту статті) – 10, інтервал - 1,0. Повинна містити не менш як 1800 знаків.

Основний текст набирається таким чином:

2.1. Стиль “звичайний”, гарнітура - Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

Текст статті, в якому повинні бути вказані вище елементи, обсягом від 7 сторінок.

2.2. Відбивки по тексту не використовуються за винятком підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відокремлюються відбивками “перед” – 9, “після” – 6).

3. Для набирання **формул** використовується редактор формул **Equation v. 3.0.** або Math Type 6,9 **Стилі:** **Text** – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** - Times New Roman (Cyr), italic, L.C.Greek – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** - Times New Roman (Cyr), **Number** - Times New Roman (Cyr). **Розміри:** **Full** – 11, **Subscript/Superscript** – 8, **Sub-Subscript/Superscript** – 8, **Symbol** – 14, **Sub-Symbol** – 10.

Забороняється використовувати вбудований у MS Office версій 10 і вище редактор формул!

Для наочності рекомендується формули відокремлювати відбивками зверху і знизу – 6 пт.

Формули компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм!!!

4. Таблиці повинні бути складені лаконічно, зрозуміло і містити мінімальні відомості, необхідні для ілюстрування суті статті. Таблиці не повинні дублювати результати, представлені в інших місцях рукопису (наприклад, у вигляді графіків).

Назва таблиці: Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 6 пт.

Таблиці компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм або 165мм!!!

5. Ілюстрації до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані у растровому (векторному) форматах (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF, CDR) і додаватися окремим файлом.

Забороняється використовувати графічний редактор MS WORD!!!

Ілюстрації типу фотографій повинні бути відскановані з роздільною здатністю не менше 400 dpi і/або додаватися в оригіналі.

Усі рисунки, графіки і фотографії можуть бути чорнобілими, кольоровими або півтоновими.

Ілюстрації, перескановані з періодики та накреслені вручну, не приймаються!!!

Підписи до ілюстрацій: Times New Roman (Сур), кегль 10, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. **Написи в ілюстраціях** виконуються гарнітурою Arial.

Забороняється використовувати аббревіатуру в назвах.

6. Використані автором літературні джерела, на які є посилання у тексті, наводяться у кінці статті загальним списком у порядку згадування. До нього слід включати лише джерела, на які є посилання у статті. У тексті порядковий номер (згідно списку) літературного джерела, на яке посилаються, подається у квадратних дужках, наприклад, [4]. Обов'язково оформити **REFERENCES**.

Додатково до тексту статті додається файл з довідкою про авторів (для присвоєння індексу DOI кожній публікації).

ДОВІДКА ПРО АВТОРА

1. Автор (укр. і англ.) _____
(Прізвище, ім'я, по батькові)
2. Науковий ступінь _____
3. Вчене звання, ID ORCID _____
4. Місце роботи (повна назва організації та адреса укр. і англ.)

5. Контактний номер телефону _____
6. Електронна пошта _____
7. Поштова адреса з індексом (на яку необхідно направити примірник збірника наукових праць) _____

8. Назва публікації (укр. і англ.) _____
9. Анотації 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,
<https://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 17.02.2021 р. Формат 60×84^{1/8} Папір офсетний

Ум. друк. арк. 17,32 Тираж 300 прим. Замовл. № 12