

Засновник: Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

Видавництво: Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу

Головний редактор:

д-р техн. наук Олійник А. П.

Відповідальний секретар:

к. т. н. Незамай Б. С.

Редакційна колегія:

д-р ф.-мат. наук Бандура А. І.

к. техн. наук Воронич А. Р.

д-р техн. наук Горбійчук М. І.

д-р техн. наук Джала Р. М.

д-р техн. наук Древецький В. В.

д-р техн. наук Дьомін Д. О.

д-р техн. наук Заміховський Л. М.

д-р техн. наук Карпаш О. М.

д-р техн. наук Косач Н. І.

к. техн. наук Кучірка Ю. М.

д-р техн. наук Лежнюк П. Д.

д-р техн. наук Лопатін В. В.

д-р техн. наук Лужецький В. А.

д-р ф.-мат. наук Никифорчин О. Р.

д-р техн. наук Осадчий С. І.

д-р техн. наук Пасєка М. С.

д-р техн. наук Рудакова Г. В.

д-р техн. наук Семенов Г. Н.

д-р техн. наук Середюк О. С.

д-р техн. наук Ситник О. С.

д-р техн. наук Сучков Г. М.

д-р техн. наук Учанін В. М.

д-р техн. наук Шекета В. І.

д-р техн. наук 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

Е-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

Свідцтво 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 НЕРУЙНЛИВОГО КОНТРОЛЮ

В. А. Троицкий РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛО-
КОНСТРУКЦИЙ И МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ 5

Є. І. Крижанівський, Д. О. Паневник ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СВЕРДЛОВИННОГО
СТРУМИННОГО НАСОСА..... 16

А. О. Шарко МОДЕЛІ І СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ
АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ
ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ..... 24

О. В. Паливода, Ю. А. Лебеденко ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ
ДИАГНОСТИКОЙ..... 35

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

В. В. Лопатін ДОСВІД РОЗРАХУНКУ, РОЗРОБКИ І ВПРОВАДЖЕННЯ
ТЕНЗОДАВАЧА 46

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

О. В. Середюк, Т. В. Лютенко, А. Г. Винничук, О. С. Криницький
МЕТОДИКА МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОБУТОВИХ
ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ ЗА ОБМЕЖЕНИМ ДІАПАЗОНОМ РОБОЧИХ
ВИТРАТ 54

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Б. Л. Грабчук, Ю. Ф. Романюк АНАЛІЗ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
НАПРУГИ..... 65

О. Т. Чернова, Б. І. Гершун АНАЛІЗ ЗРОСТАННЯ ДЕБІТУ СВЕРДЛОВИНИ ЗА РАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ ДІАМЕТРА ФОНТАННИХ ТРУБ ДАШАВСЬКОГО ПСГ 76

А. І. Лагойда СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОСИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ЗАДАЧ АДАПТИВНОГО І РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ 89

К. Л. Ноздрачова, А. Ю. Слободчук ОДНОПОЛЯРНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ МЕТАЛОВИРОБІВ 99

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В. М. Гарасимів, О. В. Мойсеєнко, Т. Г. Гарасимів СПЕЦІАЛЬНЕ ПРОГРАМНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВОСТУПЕНЕВОГО НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ 110

В. М. Шавранський, В. І. Шекета, М. В. Шавранський ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ КЕРУВАННІ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН В УСКЛАДНЕНИХ УМОВАХ 119

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

А. П. Олійник, Л. І. Фешанич, Є. А. Олійник МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ COVID-19 138

І. В. Рибіцький, О. М. Карпаш, М. О. Карпаш МОДЕЛЮВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИЩОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА НАЯВНИХ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ 147

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ 155

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

№1 (44) 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. Gorbichuk, Dr. of Technical Sc.
R. M. Dzhala, Dr. of Technical Sc.
V. V. Drevetskyi, Dr. of Technical Sc.
D. A. Domin, Dr. of Technical Sc.
L. M. Zamichvskyi, Dr. of Technical Sc.
O. M. Karpash, Dr. of Technical Sc.
N. I. Kosach, Dr. of Technical Sc.
Y. M. Kuchirka, PhD.
P. D. Legnyuk, Dr. of Technical Sc.
V. V. Lopatin, Dr. of Technical Sc.
V. A. Luzhetskij, Dr. of Technical Sc.
O. R. Nykyforchyn, Dr. of Phys.-math Sc.
S. I. Osadchy, Dr. of Technical Sc.
M. S. Pasyeka, Dr. of Technical Sc.
A. V. Rudakova, Dr. of Technical Sc.
G. N. Sementsov, Dr. of Technical Sc.
A. A. Sytnik, Dr. of Technical Sc.
H. M. Suchkov, Dr. of Technical Sc.
V. M. Uchanin, Dr. of Technical Sc.
V. I. Sheketa, Dr. of Technical Sc.
V. A. Yatsuk, Dr. of Technical Sc.
Rzasa Mariusz, PhD.
Wojcik Waldemar, Dr. Sc.
Gerhard Mook, Dr.hab.

Address

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

Editors

N.R. Stetsiuk, O.O. Rospopa
Electron galley
B.S. Nezamay, O. S. Tsareva,
M. O. Slabinoga

State Registration Certificate
KB № 15834 - 4306 Regions
Of 16.10.2009

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

CONTENT

METHODS AND EQUIPMENT OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

V. A. Troitckiy RADIATION MONITORING OF STEEL STRUCTURES AND TRUNC PIPELINES 5

Ye. I. Kryzhanivskyy, D. O. Panevnyk THE DOWNHOLE JET PUMPS EXPERIMENTAL STUDIES EFFICIENCY IMPROVING 16

A. O. Sharko THE METAL STRUCTURES TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEM BY ACOUSTIC EMISSION METHOD CONTROL PROCESS AUTOMATION MODELS AND SCHEMATIC SOLUTION..... 24

O. V. Polyvoda, Yu. A. Lebedenko IDENTIFICATION OF AUTOMATIC SYSTEMS FOR ACOUSTIC EMISSION DIAGNOSTICS 35

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

V. V. Lopatin EXPERIENCE OF CALCULATION DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION STRAIN GANGE SENSOR 46

METHODS AND DEVICES OF FLOW MEASUREMENT OF LIQUID AND GASEOUS PHASES

O. V. Serediuk, T. V. Liutenko, A. G. Vynnychuk, O. S. Krynytskyi METHODOLOGY OF DOMESTIC GAS METERS METROLOGICAL CONTROL WITH LIMITED WORK FLOW RANGE 54

METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

B. L. Grabchuk, Yu. F. Romaniuk ANALYSIS OF ENERGY FLOWS IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS WITH A THYRISTOR VOLTAGE CONVERTOR..... 65

O. T. Chernova, V. I. Gershun ANALYSIS OF GROWTH DRIVE BREAKDOWN BY THE INCREASE OF THE DASHAV UGS FOUNTAIN PIPES 76

<i>A. I. Lagoida</i> THE WELLS FLUKING HYDRAULIC SYSTEM ELEMENTS DYNAMICS SYSTEM ANALYSIS AND MODELLING FOR THE ADAPTIVE AND ROBUST CONTROL PROBLEMS.....	89
<i>K. L. Nozdrachova, A. Yu. Slobodchuk</i> SINGLE-POLAR POWER SUPPLY OF HIGH FREQUENCY CAPACITIVE TRANSDUCERS FOR MEASUREMENT	99

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

<i>V. M. Harasymiv, O. V. Moiseenko, T. G. Harasymiv</i> APPLICATION AND ALGORITHMIC SOFTWARE OF THE CONTROL SYSTEM OF THE TECHNICAL STATE PARAMETER	110
<i>V. M. Shavranskii, V. I. Sheketa, M. V. Shavranskii</i> AN INTELLECTUAL SYSTEM FOR SUPPORTING DECISION MAKING IN THE CONTROL OF THE BORING PROCESS.....	119

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE UNDESTROYED CONTROL PROBLEMS

<i>A. P. Oliinyk, L. I. Feshanich, Y. P. Oliinyk</i> THE EPIDEMIOLOGICAL SITUATION DEVELOPMENT PROCESS MATHEMACIKAL MODELLING TAKING INTO ACCOUNT THE COVID 19 DESSEMINATION FEATURES	138
<i>I. V. Rybitskyi, O. M. Karpash, M. O. Karpash</i> THE NATURAL GAS COMBUSTIONS HIGHER HEAT MEASURING POSSIBILITY MODELING FOR THE AVAILABLE INFORMATIVE PARAMETERS	147

REQUIREMENTS FOR THE ARTICLE.....	155
-----------------------------------	-----

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 62-791.2

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-5-15

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В. А. Троицкий

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины; 03061 г. Киев-150,
ул. К. Малевича, 11, тел.: (044)200466, e-mail: usndt@ukr.net*

Показана можливість розташування на магнітних платформах рентгенівських апаратів і твердотільних радіоскопічних перетворювачів. Це робить радіаційний контроль мобільним і більш інформативним. Описано принципи побудови такого обладнання і застосування його для різних зварних з'єднань складних металоконструкцій і трубопроводів замість плівкової радіографії. Портативна радіоскопія (рентген-телебачення) з використанням рухомих рентгенівських апаратів і ПЗС-детекторів розширить сфери застосування дефектоскопії в промисловості. Описано виготовляються в ІЕЗ ім.Є.О.Патона портативні радіоскопічні детектори, вартість яких на порядок нижча за вартість стандартних великопанельних промислових перетворювачів. Наведено висновки за результатами роботи, зокрема відзначено, що нові технологічні можливості при промисловому радіаційний контроль відкриваються при автономному переміщенні R-апарату і R-перетворювачів поверхнею досліджуваного об'єкта, кожен з яких може зайняти більше інформативне положення для оцінки якості зони просвічування, а внутрішня несуцільність в реальному часі може бути розглянута в різних ракурсах; наведена інформація про те, що з появою високочувливих відеокамер з'явилася можливість виготовляти радіоскопічні недорогі, чутливі перетворювачі на основі флюорографічних екранів. Вартість таких пристроїв найменша серед розглянутих рішень і вона мало залежить від формату і розмірів R-перетворювача. Також зазначено, що мобільна рентгеноскопія (рентген-телебачення) з використанням рухомих R-апаратів і R-сенсорів більш інформативна, портативна, вимагає менше часу і матеріальних засобів, легше вписується в основні технологічні процедури виготовлення механізмів і споруд, ніж технології з проміжними носіями інформації.

Ключові слова: радіаційний контроль, магістральний трубопровід, магнітні платформи, рентгенівські апарати.

Показана возможность расположения на магнитных платформах рентгеновских аппаратов и твердотельных радиоскопических преобразователей. Это делает радиационный контроль мобильным и более информативным. Описаны принципы построения такого оборудования и применение его для различных сварных соединений сложных металлоконструкций и трубопроводов вместо пленочной радиографии. Портативная радиоскопия (рентген-телевидение) с использованием подвижных рентгеновских аппаратов и ПЗС-детекторов расширит области применения дефектоскопии в промышленности. Описаны изготавливаемые в ИЭС им.Е.О.Патона портативные радиоскопические детекторы, стоимость которых на порядок ниже стоимости стандартных крупнопанельных промышленных преобразователей. Приведены выводы по результатам работы, в частности отмечено, что новые технологические возможности при промышленном радиационном контроле открываются при автономном перемещении R-аппарата и R-преобразователей по поверхности изучаемого объекта, каждый из которых может занять более информативное положение для оценки качества зоны просвечивания, а внутренняя несплошность в реальном времени может быть рассмотрена в разных ракурсах, приведена информация о том, что с появлением высокочувствительных видеокамер появилась возможность изготавливать радиоскопические недорогие, чувствительные преобразователи на основе флюорографических экранов. Стоимость таких устройств наименьшая среди рассмотренных решений, и она мало зависит от формата и размеров R-преобразователя. Также указано, что мобильная рентгеноскопия (рентген-телевидение) с использованием подвижных R-аппаратов и R-сенсоров более информативна, портативна, требует меньше времени и материальных средств, легче вписывается в основные технологические процедуры изготовления механизмов и сооружений, чем технологии с промежуточными носителями информации.

Ключевые слова: радиационный контроль, магистральный трубопровод, магнитные платформы, рентгеновские аппараты.

The possibility of arranging x-ray machines and solid-state radioscopic transducers on magnetic platforms is shown. This makes radiation monitoring mobile and more informative. The principles of constructing such equipment and its application for various welded joints of complex metal structures and pipelines instead of film radiography are described. Portable radioscopy (X-ray television) using mobile X-ray machines and CCD detectors will expand the scope of flaw detection in industry. Portable radioscopic detectors manufactured at the EO Paton Electric Welding Institute are described, the cost of which is an order of magnitude lower than the cost of standard large-panel industrial converters. Conclusions are given based on the results of work, in particular, it is noted that new technological capabilities in industrial radiation monitoring open up when the R-apparatus and R-transducers are independently moved over the surface of the object under study, each of which can occupy a more informative position for assessing the quality of the transillumination zone, and the internal real-time discontinuity can be considered from different angles; information is provided that with the advent of highly sensitive video cameras, it became possible to Press radioscopic low-cost, sensitive fluorographic screen converters. The cost of such devices is the smallest among the considered solutions and it does not depend much on the format and size of the R-converter. It is also indicated that mobile fluoroscopy (X-ray television) using mobile R-devices and R-sensors is more informative, portable, requires less time and material resources, fits more easily into the basic technological procedures for manufacturing mechanisms and structures than technologies with intermediate storage media .

Key words: radiation control, trunk pipeline, magnetic platforms, x-ray machines.

При оценке качества сварных соединений многих ответственных конструкций часто радиационный неразрушающий контроль (НК) является основным.

Все трубопроводы имеют различные гибы, отводы, врезки разного диаметра и многие другие элементы, которые, как и основное тело магистрали, должны периодически диагностироваться. Не всегда и не везде может быть организовано прохождение внутритрубных дефектоскопов или пропускание кроулеров для панорамного просвечивания труб изнутри.

При строительстве и мониторинге состояния эксплуатируемых трубных магистралей, несмотря на обилие различных физических методов НК, главным остается радиационный контроль.

Чаще всего все разрушения магистральных трубопроводов происходят по кольцевым швам, производимым при их строительстве. Заводские продольные швы труб более надежны.

На рис. 1 показаны основные схемы просвечивания сварных соединений трубопроводов. Схем просвечивания, как и элементов, подлежащих контролю, намного больше, чем изображено на рис. 1. Со временем объемы пленочной радиографии будут сокращаться, радиационный контроль будет реализовываться преимущественно с помощью твердотельных R-преобразователей, объемы производства которых во всем мире растут.

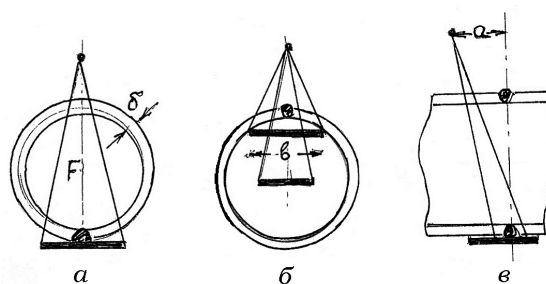


Рисунок 1 – Основные схемы просвечивания сварных соединений трубопроводов

Это быстро, наглядно и намного дешевле, чем пленочная радиография. Пленочная радиография будет применяться только при отсутствии радиоскопического оборудования в исключительных случаях. Получат большое распространение малогабаритные R-аппараты и твердотельные R-преобразователи, которые будут крепиться и свободно перемещаться по объекту (по трубе), например, так, как показано на схемах рис. 2. На рис. 3 дано фото на обечайке трубы диаметром 920 мм с рентгеновским аппаратом «Арина-05», закрепленным на подвижной магнитной платформе.

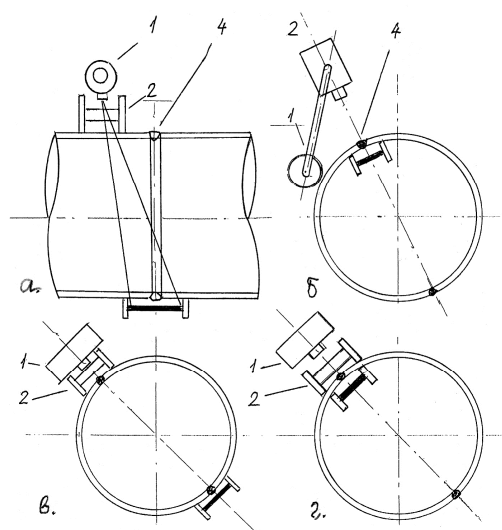


Рисунок 2 – Автономно перемещаемые R-аппарат и R-преобразователь по внешней и внутренней поверхностям труб большого диаметра

Магнитная платформа оборудована двумя магнитными колесами диаметром 110 мм. Платформа имеет диск для крепления штанги с R-аппаратом и удерживающий магнит, сила отрыва которого от поверхности ферромагнитного объекта 35 кг, что в несколько раз больше, чем вес R-аппарата. Поэтому R-аппарат может удерживаться на трубе в любом пространственном положении, включая потолочное.

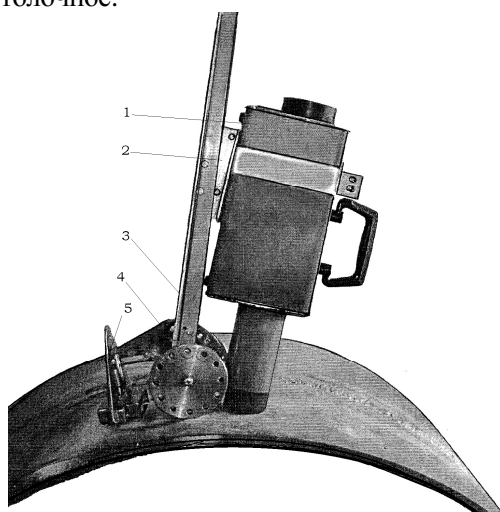


Рисунок 3 – Фото R-аппарата Арина-05 на подвижной магнитной платформе, располагаемой на трубе $\varnothing 920 \times 12$

Устройство по рис. 3 предназначено для R-контроля кольцевых монтажных швов, вдоль которых перемещаются R-аппарат и R-преобразователь, его конструктивные схемы показаны на рис. 6, 8, 10.

На рис. 4 приведено фото радиационного контроля кольцевых соединений магистральных трубопроводов, взятые из журнала «Территория нефтегаза», № 10, 2016. Это российское оборудование для цифрового радиационного контроля трубопроводов без рентгеновской пленки, в котором используются очень дорогие большие (200×200) плоскочастотные стандартные R-преобразователи.

Результаты просвечивания по рис. 2, 3, 4 при использовании твердотельных преобразователей наблюдаются в реальном времени на экране монитора, т.е. речь идет о замене пленочной радиографии на рентгеноскопию (рентген-телевидение), которая достаточно распространена на трубопрокатных заводах и в медицине [1]. В стране имеется много рентгенологов, которые способны освоить описываемую радиоскопическую технологию, внедрение которой сдерживается стоимостью оборудования (рис. 4).

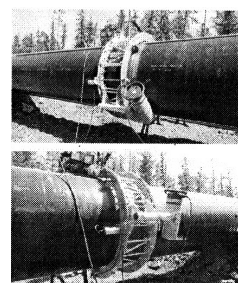


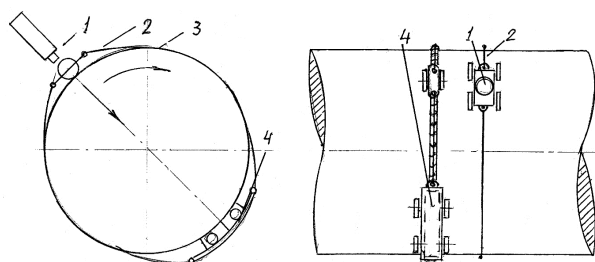
Рисунок 4 – Цифровой радиографический контроль качества сварных соединений в России (из журнала «Территория нефтегаза», № 10, 2016)

В установках по рис. 4 промышленный рентгеновский аппарат перемещается по мощной металлоконструкции, охватывающей трубу вблизи кольцевого сварного шва. Одновременно диаметрально противоположно положению R-аппарата перемещается плоскочастотный преобразователь, имеющий размеры 200×200 мм. Эта конструкция имеет вес 80 кг, монтируется на каждом кольцевом шве, подлежащем контролю, что занимает много времени.

Устройство по рис. 4 имеет узко специализированное назначение и предназначено только для просвечивания кольцевых сварных соединений через две стенки (рис. 1а, в). Оно не годится для просвечивания других видов сварных соединений, различных гибов, отводов, врезок и других элементов трубных магистралей. Предлагаемое подвижное крепление R-аппарата по рис. 2, 3 универсально. Оно может быть использовано для любых металлоконструкций, не только для трубопроводов.

Основными недостатками технологии контроля по рис. 4 является узкая специализация вспомогательной металлоконструкции, ее привязанность к размеру диаметра, большая продолжительность попутных процедур, высокая стоимость, длительность контроля. В нашем случае R-аппарат и R-преобразователь передвигаются по поверхности трубы на автономных магнитных тележках (рис. 2 – 5), т.е. исключаются основные недостатки, присущие технологии по рис. 4. Кроме того, надо отказываться от избыточной информации, получаемой от крупнопанельных R-детекторов и применять миниатюрные твердотельные R-преобразователи, ширина которых соизмерима с шириной изучаемого сварного шва.

На рис. 5, 6 показано, как в этом случае производить просвечивание кольцевого сварного соединения через две стенки. Крепления по рис. 5, 6 могут легко быть перестроены на выполнение просвечивания любых элементов трубопроводов, продольных, спиральных и других швов. На рис. 6 показано, как R-аппарат 1 и подвижный твердотельный преобразователь 7 с помощью двух тросов (гибкой ленты и т.п.) объединяются в единое устройство, способное одновременно вращаться вокруг трубы так, как это делается при контроле с помощью специальной громоздкой металлоконструкции, показанной на рис. 4. При этом на несколько порядков снизится металлоемкость вспомогательных средств, объединяющих R-аппарат и R-преобразователь.



Риснок 5 – Схема крепления на трубе

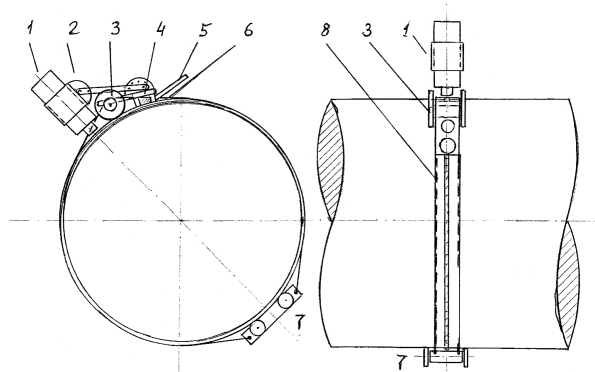


Рисунок 6 – Схема крепления на трубе

Очевидно, что R-аппарат и портативный твердотельный R-преобразователь, расположенные на автономных платформах (рис. 5) могут занимать любые пространственные положения относительно друг друга. Способ мобильного радиационного контроля с помощью автономно перемещаемых по поверхности объекта источника излучения и R-преобразователя, расширяет возможности мониторинга не только магистральных трубопроводов, но и других объектов, например, ферм (рис. 7) и т.п. металлоконструкций с их сложным сплетением элементов.

Если элементарное объединение R-аппарата и R-преобразователя (рис. 6) по сравнению с сооружением по рис. 4 даёт мобильность, сокращение времени и веса, то преимущество раздельного (рис. 5) перемещения R-аппарата и R-преобразователя позволяет рассматривать внутренние несплошности металла под разными углами в разных ракурсах, открывает новые технологические возможности в мониторинге.

Для просвечивания сложных металлоконструкций важно сочетание точечного и ограничено подвижного крепления R-аппарата в сочленениях элементов ферм, например, таких, как по рис. 7.

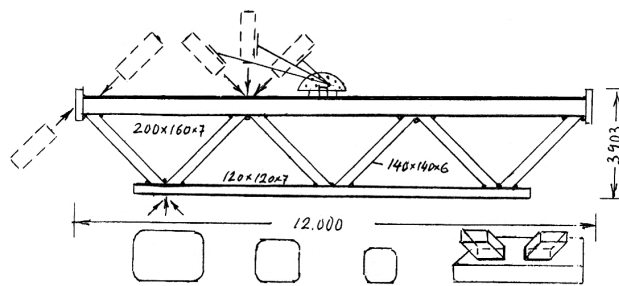


Рисунок 7 – Схема сочленения

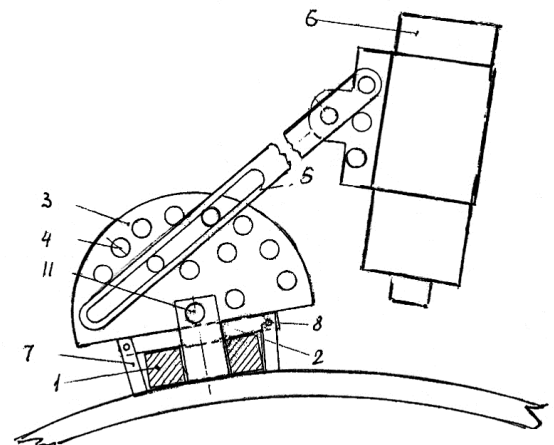


Рисунок 8 – Схема навешивания излучателя

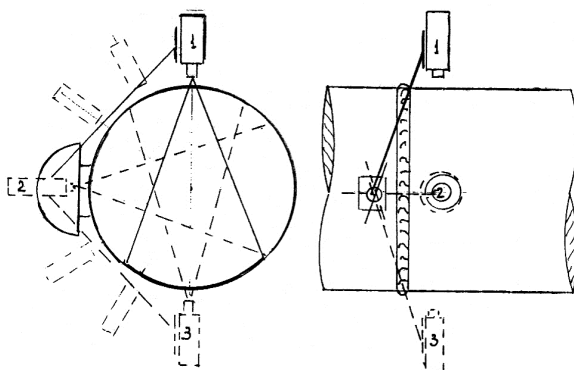


Рисунок 9 – Схема просвечивания

На рис. 8 показано точечное крепление R-аппарата, с помощью которого удобно выполнять изучение металлоконструкций типа ферм по рис. 7. Точечное крепление R-аппарата осуществляется с помощью мощного миниатюрного постоянного магнита, изготовленного из редкоземельных металлов, сила удержания которого в несколько раз превышает вес R-аппарата. С помощью точечного крепления (рис. 8) можно обследовать не только фермы, но и кольцевые швы труб с двух диаметрально противоположных размещений R-аппарата на поверхности трубопровода так, как это показано на рис. 9. Сочетание точечного и ограниченно подвижного крепления излучателя показано на рис. 3, 6 и 10. Здесь диск 3 с отверстиями 4 для штанги, на которой крепится R-аппарат, вынесен на подвижное магнитное колесо.

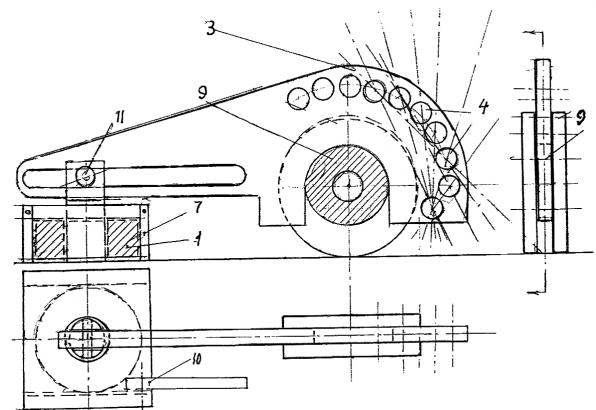


Рисунок 10 – Удерживающий магнитный рычаг

Ограниченно подвижное крепление R-аппарата обеспечивает расположение R-аппарата в любых пространственных положениях. Он может удаляться, приближаться, а также вращаться вокруг точки 11, центрального стержня удерживающего магнита. Для того, чтобы снять, переместить R-аппарат надо преодолеть силу его крепления, надо приподнять край удерживающего магнита рычагом 8 (рис. 10).

Устройство по рис. 3, 6, 10 позволяет крепить и перемещать R-аппарат по криволинейным поверхностям. Автономно перемещаемый R-преобразователь может иметь страховочный трос, как показано на рис. 5.

При реализации описанной R-технологии (рис. 5) с расположением на объекте независимо перемещаемых R-аппарата и R-преобразователя, процесс контроля будет состоять из следующих обязательных процедур:

- разметка на поверхности объекта мест, подлежащих просвечиванию;

- размещение подвижных магнитных платформ на поверхности объекта (трубы) для последующего крепления на них источника излучения и R преобразователя и проверка возможности получения их взаимных положений;

- перед включением излучения выполняются все мероприятия по технике безопасности, прописанные регламентом.

После начала излучения на экране монитора пульта управления высвечиваются три изображения: рентгеновское, которое дает R-преобразователь, и два оптических изображения от видеокамер R-аппарата и R-преобразователя.

Дистанционное перемещение R-аппарата и R-преобразователя в процессе просвечивания позволяет уточнить форму, размеры и глубину залегания несплошности в реальном времени, что можно сделать только при такой технологии радиационного контроля.

Обнаруженный недопустимый дефект фиксируется на электронных средствах записи информации и отмечается на поверхности объекта.

Далее R аппарат и твердотельный преобразователь на магнитных платформах перемещаются на следующее по регламенту место просвечивания.

Для кольцевых швов труб малого диаметра, просвечиваемых через две стенки, делается 2-3 экспозиции. Количество экспозиций [2 – 6] зависит от ответственности трубопровода, диаметра, возможностей используемой техники. Поэтому, чем ответственнее трубопровод, тем больше требуется экспозиций, тем больше преимуществ в практической эффективности мобильного способа радиационного контроля, автономности перемещения излучателя и R-преобразователя.

Для массовых многократно повторяющихся однотипных экспозиций, уменьшения вспомогательного технологического времени эффективно жесткое соединение магнитных платформ так, как показано на рис. 6. Это будет копией контроля, выполняемого с помощью устройства рис. 4. При этом исключаются ошибки в диаметрально противоположном расположении R-аппарата и R-преобразователя, исключается электропривод одной из платформ.

Жесткое объединение R-аппарата и R-преобразователя может быть выполнено с помощью троса, цепи (тонкой полосы металла). Возможность просвечивания во всех пространственных положениях с диаметрально противоположным расположением излучателя (рис. 6) и R детектора удобно и при пленочной радиографии. В этом случае кассета с R пленкой крепится на тросе, объединяющем R аппарат и R детектор.

Удобство работы с излучателем, располагаемым на внешней поверхности трубы, со временем изменит отношение к кроулерам и другим средствам панорамного внутритрубного излучения. Расширятся и другие возможности радиоскопического неразрушающего контроля, который будет выполняться только с помощью R-аппаратов, располагаемых на внешней поверхности трубы. Внутри трубы будут перемещаться не излучатели, а R-детекторы, подвижность которых внутри трубы даст много дополнительной информации о зоне просвечивания.

В Японии, странах Европы выпускаются малогабаритные высокочастотные рентгеновские аппараты непрерывного излучения. Импульсные R-аппараты с их ограниченными дефектоскопическими возможностями распространены только в постсоветских странах. Для перемещения по поверхности объекта важно иметь портативные R аппараты непрерывного излучения, при этом тип R детектора может быть любой, включая R пленку.

Для получения результата контроля в цифровом виде [1, 2, 3, 15] должна быть применена компьютерная программа. Схемы [4, 5, 6, 9, 11] получения цифровых изображений основаны на использовании идентичных компьютерных программ. Все они сводятся [7 – 10] к трем типам:

- традиционная пленочная радиография с последующей компьютерной цифровой обработкой;

- технологии с многократно используемыми промежуточными носителями информации, более совершенные, чем технологии с R-пленкой, но требующие специальных считывающих устройств;

- непосредственное радиоскопическое изображение на основе ПЗС и КМОП-матриц, развиваемое в ИЭС им.Е.О.Патона.

Эти три принципа получения цифровой информации [12] сильно отличаются по основным потребительским показателям. Так по расходу, времени и стоимости получения цифровой информации эти три технологических принципа приблизительно соотносятся, как 10:5:1, а стоимость используемого оборудования и расходных материалов, как 5:20:1. Это сугубо ориентировочные соотношения. В каждом из стран оно зависит от многих ситуативных обстоятельств. Эти соотношения непостоянны во времени из-за текущей конъюнктуры на рынке. Обсуждение этих цифр прошло [7] в США, Германии, Украине, Тайване. Они зависят и от технической культуры, от заинтересованности сторон и т.д. Не подлежит сомнению, что время, развитие техники работают на электронную радиоскопию, на рентген-телевидение, которое в этом сравнении взято за единицу. Без сомнений радиоскопия в реальном времени без расходных материалов должна заменить два других выше упомянутых цифровых принципов получения цифровой информации. Все технологии с промежуточными носителями будут все реже применяться, уступая радиоскопии (рентген-телевидению).

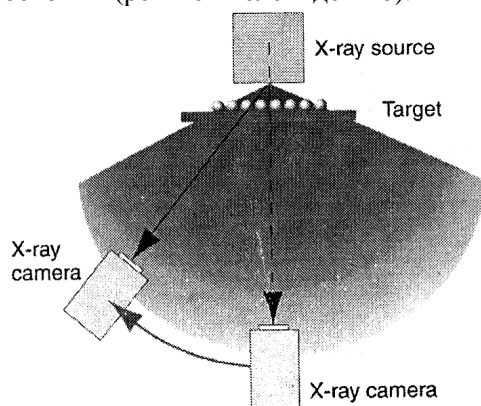


Рисунок 11 – Диаграмма излучения R аппарата и удаленные расположения R сенсоров для увеличенных изображений внутренних несплошностей объекта

Для того чтобы перейти от пленочной радиографии к автоматизированной высококачественной радиоскопии надо было создать соответствующее программное

обеспечение (ПО), которое уточняется под каждое конкретное техническое решение и функциональные требования. Была создана и апробирована целая серия модулей ПО: измерения, коррекции, фильтрации и улучшения качества изображений, модули документирования и архивирования, сшивания отдельных фрагментов в полное радиоскопическое изображение. Основой этой многолетней работы стала адаптация наработок по цифровой обработке рентгеновских пленок применительно к электронным радиоскопическим изображениям, получаемым от твердотельных ПЗС-сенсоров. Высокая разрешающая способность миниатюрных R-детекторов дала старт новым технологиям радиационного контроля. Например, [9, 10], сочетание контактного крупноформатного просвечивания, на котором намечаются зоны возможных скрытых дефектов, и удаленное от поверхности (рис. 11) расположение R сенсора высокого разрешения позволяет изучать в реальном времени сомнительную зону большого объекта, измерять размеры и расположение в ней внутренних дефектов.

В работе [14] описан R детектор ИЭС им.Е.О.Патона для контроля протяженных объектов, состоящий из миниатюрного ПЗС-сенсора типа S10810-11 (рис. 12) ф. «Hamamatsu» и гибкой направляющей, по которой перемещается этот сенсор внутри преобразователя. В процессе контроля сенсор выполняет остановки продолжительностью в несколько секунд. Так вдоль контролируемого объекта (сварного шва), по его поверхности, находясь в поле излучения (рис. 11) R-аппарата внутри R-преобразователя перемещается миниатюрный ПЗС-сенсор, например, показанный на рис. 12. На рис. 13а показаны 10 рентгенограмм размером 24×36 мм, соответствующих 10 экспозиционным остановкам сенсора (рис. 12) внутри R детектора, располагаемого на поверхности сварного соединения. На рис. 13б показан результат сшивания этих 10 отдельных радиограмм, размеры каждой из которых 24×36 мм соответствуют размерам активной зоны (рис. 12) миниатюрного сенсора S10810-11, в единую протяженную радиограмму (рис. 13б), соответствующую размерам объекта – сварного соединения. Данный R-преобразователь на

порядок дешевле, чувствительнее, чем крупнопанельные преобразователи с размерами 200×200 мм, например, примененные в устройстве, показанном на рис. 4. Малоформатные ПЗС-матрицы, примененные в сенсоре по рис. 12, 13, отличаются более высокой разрешающей способностью, чем возможности крупноформатных радиоскопических панелей.

■ CCD sensor

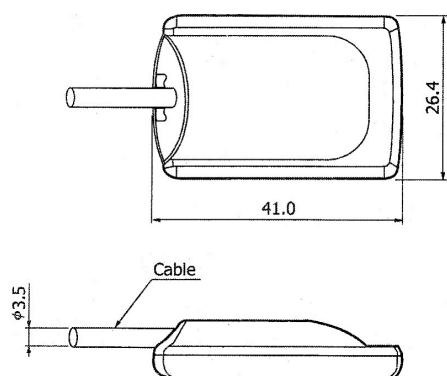


Рисунок 12 – Миниатюрный сенсор S10810-11 ф. «Hamamatsu», перемещаемый по металлической полосе внутри R преобразователя ИЭС им. Е.О.Патона

Основная стоимость такого протяженного высокочувствительного R-преобразователя определяется стоимостью миниатюрного ПЗС-сенсора (рис. 12), активная зона которого в 6-7 раз меньше чем избыточная площадь активной зоны крупнопанельных преобразователей, примененных в устройстве по рис. 4. Сенсор S10810-11 имеет размеры пикселя 25 мкм, разрядность АЦП 14 бит, имеет WiFi передачу, набор Программ для отчетов, улучшения качества изображений и пр.

Время получения одного цифрового рентгеновского снимка 36×24 мм по рис. 12, 13 не более одной минуты, разрешение 20 пар линий на 1 мм. Сенсор по рис. 12 адаптирован к постоянным и переменным X-ray полям.

В ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ изготавливают [13] другие еще более дешевые радиоскопические, рентгентелевизионные преобразователи, например, показанные на рис. 14а, б, основными элементами которых являются люминесцентный экран 3, видеокамера 4 оптического объектива. На рис. 14а,б показан такой R-преобразователь ИЭС им.Е.О.Патона с размерами 225×425×110 мм и результаты его применения для просвечивания кольцевого шва стальной трубы $\varnothing 57 \times 5$ мм. Подобные большие R-преобразователи с размерами активной зоны до 300×350 мм (существенно больше, чем 200×200 мм) создавались и успешно использовались в ИЭС им.Е.О.Патона для контроля качества пластин бронезилетов [11, 13]. Схема такого типа R-преобразователей поясняется на рис. 14а. Здесь на флуоресцентный экран 3 направлено зеркало, далее следуют оптический объектив и видеокамера 4. Внешний вид преобразователя показан на рис. 14б, а на рис. 14в,г – негативное и позитивное изображение сварного шва, просвеченного на эллипс. Для получения этих изображений был использован R-аппарат РАП-150/300, фокусное расстояние 60 см, анодные напряжение и ток – 120 кВ и 10 мА. Полученное качество просвечивания (рис. 14) соответствует 1 классу ГОСТ 7512-82, выявляются канавки глубиной 0,2 мм.

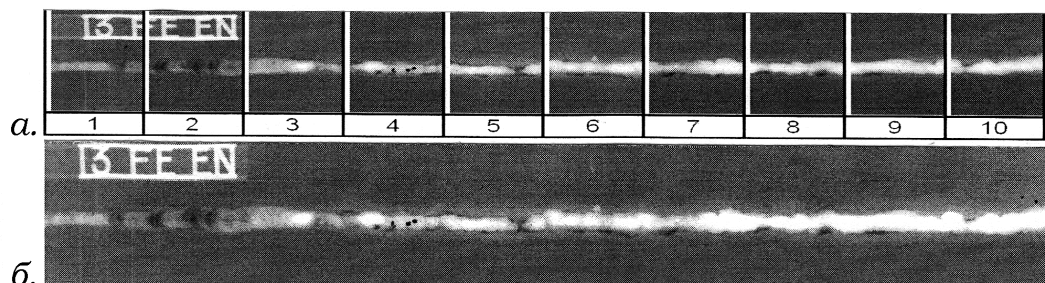


Рисунок 13 – R-снимки (а) десяти участков сварного шва и результаты их сшивания (б) в единую радиограмму

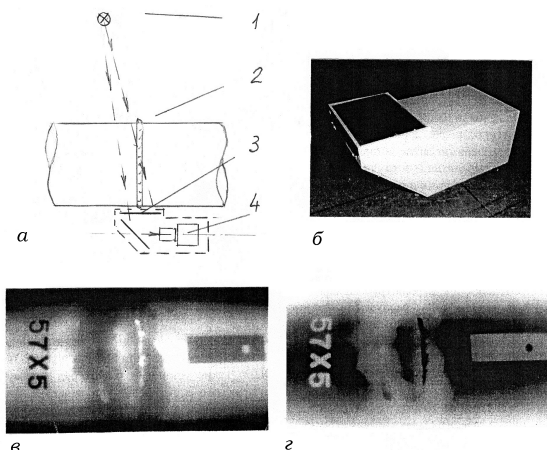


Рисунок 14 – Рентген-телевизионный контроль на основе радиоскопического преобразователя стальной трубы $\varnothing 57 \times 5$ мм: а – схема просвечивания: 1 – излучатель, 2 – сварной шов, 3 – флуоресцирующий экран, 4 – оптический объектив и видеокамера; б – R детектор $225 \times 125 \times 110$; в, г – негативное и позитивное изображение сварного шва, просвеченного на эллипс

На рис. 14 в,г приведены рентгенограммы стальной трубы диаметром 57×5 мм. В этом преобразователе была применена телекамера QHYSL-II, выпускаемая для астрономических съемок. Это недорогая (~ 150 \$) черно-белая моно

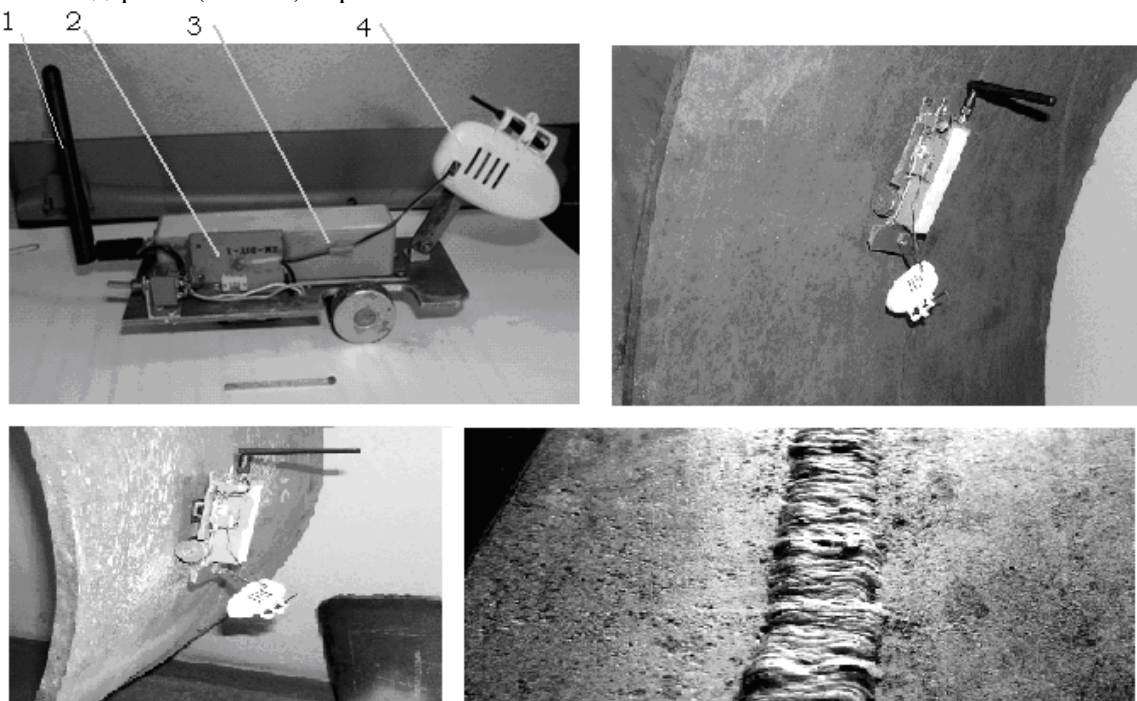


Рисунок 15 – Универсальная радиоуправляемая гибкая платформа: а – общий вид; б, в – потолочное и боковое положение на трубе диаметром 1200 мм; г – запись сварного шва; 1) антенна 2,4 ГГц; 2) блок радиоуправления; 3) аккумулятор; 4) Wi-Fi камера

матрица размером $4,83 \times 3,63$ мм с динамическим диапазоном 14 Bit. Подобные R-преобразователи, подходящие для контроля качества сварных соединений намного дешевле крупнопанельных R-преобразователей, производимых во многих странах.

Для просвечивания сварных швов могут быть использованы и линейные сенсоры, которые должны располагаться вдоль сварных швов (по оси шва и по околосшовным зонам).

Фирма «Hamamatsu» выпускает различные линейные сенсоры, активная зона которых составляет 256, 409, 512 мм на напряжения до 160 кВ. Кроме линейности для сварных соединений, в которых могут быть мало раскрытые трещины, важно иметь высокое разрешение, которое имеется в R преобразователях по рис. 12 – 14.

Малогабаритные сенсоры любого типа могут располагаться на радиоуправляемых гибких платформах (рис. 15), оборудованных WiFi камерами, способными перемещаться в любых направлениях, держаться в любых пространственных положениях, способных разворачиваться на месте на 360° .

Подвижное устройство по рис. 15 оборудовано видеокамерой для объективного визуально-измерительного контроля, для нахождения зон, подлежащих НК на наличие внутренних дефектов и зон повышенных напряжений. Подвижная платформа по рис. 15 обладает высокой проходимостью. Она имеет гибкое тело и только два магнитных колеса. Эта платформа может нести детекторы магнитного поля, лазерные измерители размеров, портативные R-преобразователи и т.п. средства НК. Сила отрыва от ферромагнитной поверхности этого транспортного средства составляет ~ 12 кг. Оно может нести миниатюрные R-преобразователи, производимые фирмами Hamamatsu, Teledyne Dalso, Dürg и др. Подвижные R-аппарат и R-преобразователь открывают новые технологические возможности R-контроля сварных конструкций.

Выводы

1. Развитие электронных и цифровых технологий с каждым годом будут все больше сокращать использование в промышленности пленочной радиографии и другие технологии радиационного контроля с промежуточными носителями информации.

2. Миниатюрные твердотельные R-сенсоры на основе ПЗС и КМОП-матриц обладают более высоким разрешением, чем аналогичные крупнопанельные R-преобразователи, и дают новые технологические решения в автоматизации и роботизации, получения дополнительной информации о внутренних несплошностях просвечиваемого объекта. Стоимость и размеры разработанных R-преобразователей на несколько порядков меньше.

3. Новые технологические возможности при промышленном радиационном контроле открываются при автономном перемещении R-аппарата и R-преобразователей по поверхности изучаемого объекта, каждый из которых может занять более информативное положение для оценки качества зоны просвечивания, а внутренняя несплошность в реальном времени может быть рассмотрена в разных ракурсах.

4. При массовом производстве однотипных дефектоскопических процедур, например при контроле качества большого количества кольцевых монтажных соединений, R-аппарат и

R-преобразователь, располагаемые на собственных магнитных платформах, с помощью троса, металлической ленты и т.п. объединяются в единую конструкцию.

5. Для протяженных объектов, например, сварных швов, удобно использовать линейные R-датчики или R-преобразователи, содержащие один миниатюрный датчик (34×24 мм), перемещаемый по гибкой металлической полосе внутри преобразователя. Протяженность таких преобразователей может быть большая.

6. С появлением высокочувствительных видеокамер появилась возможность изготавливать радиоскопические недорогие, чувствительные преобразователи на основе флюорографических экранов. Стоимость таких устройств наименьшая среди рассмотренных решений и она мало зависит от формата и размеров R-преобразователя.

7. Мобильная рентгенокопия (рентгено-телевидение) с использованием подвижных R-аппаратов и R-сенсоров более информативна, портативна, требует меньше времени и материальных средств, легче вписывается в основные технологические процедуры изготовления механизмов и сооружений, чем технологии с промежуточными носителями информации.

8. ИЭС им.Е.О.Патона по согласованным техническим условиям с Заказчиками изготавливает магнитные платформы для перемещения по поверхности металлоконструкции R-аппаратов и R-преобразователей, описанных в данной работе.

Список використаних джерел

1. Неразрушающий контроль: справочник в 8 т. / под ред. В.В. Клюева. Т. 1. Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. Радиационный контроль Ф.Р.Соснин. Изд. 2-е, перераб. и испр. М.: Машиностроение. 2008, 559 с.

2. Троицкий В.А. Флэш-радиография. *Территория NDT*. 2013. № 4. С. 44-49.

3. Майоров А.А. Цифровые технологии в радиационном контроле. *В мире неразрушающего контроля*. 2009. № 3. С. 5-12.

4. Усачев Е.Ю., Валиков В.В. и др. Комплекс цифровой радиографии для ревизии

сварных соединений трубопроводов. *Контроль. Диагностика*. 2014. № 6. С. 60-64.

5. Троицкий В.А. Развитие радиационного контроля сварных соединений. *Территория NDT*. 2015. № 3. С. 38-43.

6. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шило Д.С. Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 1. С. 23-35.

7. Troitskiy V.A. Quik Industrial X-ray Testing without Intermediate Data carriers of Information, ASNT. *The NDT Technician*. Vol 15, No 4.

8. Troitskiy V.A. Perspective of development of radiation testing of Welded joints, 19 th WCNDT-2016, Munich, Germany.

9. Troitskiy V.A. Digital radiographic systems for NDT of Welding joints. Труды 12-й Европейской конференции, Cothenburd–2018, June, 11-15.

10. Troitskiy V.A. Indust X-ray testing without intermediate data carriers of information. Польша. *Badanja Nieniszczace Diagnostyka*. 2018. No 2. P. 29-34.

11. Троицкий В.О., Михайлов С.Р. та ін. Патент на корисну модель «Пристрій для рентгентелевізійного контролю» № 135146 від 25.06.2019р., бюл. 12.

12. Durr NDT GmbH and Co. KG. URL: <http://duerr-ndt.de/ru/product> Panels NDT. html.

13. Троицкий В.А., Михайлов С.Р. и др. Высокочувствительные рентгентелевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. № 3. С. 41-46.

14. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Шевченко И. Я. Разработки Института электросварки им. Е. О. Патона в области неразрушающего контроля. *ТДНК*, № 4, 2019, с. 4-12.

References

1. Nerazrushayuschiy kontrol: spravochnik v 8 t. / pod red. V.V. Klyueva. T. 1. Kn. 1. Vizualnyiy i izmeritelnyiy kontrol. Kn. 2. Radiatsionnyiy kontrol F.R.Sosnin. Izd. 2-e, pererab. i ispr. M.: Mashinostroenie. 2008, 559 p. [in Russian]

2. Troitskiy V.A. Flesh-radiografiya. *Territoriya NDT*. 2013. No 4. P. 44-49. [in Russian]

3. Mayorov A.A. Tsifrovyye tehnologii v radiatsionnom kontrole. *V mire nerazrushayushego kontrolya*. 2009. No 3. P. 5-12. [in Russian]

4. Usachev E.Yu., Valikov V.V. i dr. Kompleks tsifrovoy radiografii dlya revizii svarnyih soedineniy truboprovodov. *Kontrol. Diagnostika*. 2014. No 6. P. 60-64. [in Russian]

5. Troitskiy V.A. Razvitie radiatsionnogo kontrolya svarnyih soedineniy. *Territoriya NDT*. 2015. No 3. P. 38-43. [in Russian]

6. Troitskiy V.A., Mihaylov S.R., Pastovenskiy R.O., Shilo D.S. Sovremennyye sistemy radiatsionnogo nerazrushayushego kontrolya. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2015. No 1. P. 23-35. [in Russian]

7. Troitskiy V.A. Quik Industrial X-ray Testing without Intermediate Data carriers of Information, ASNT. *The NDT Technician*. Vol 15, No 4.

8. Troitskiy V.A. Perspective of development of radiation testing of Welded joints, 19 th WCNDT-2016, Munich, Germany.

9. Troitskiy V.A. Digital radiographic systems for NDT of Welding joints. Trudy 12-y Evropeyskoy konferentsii, Cothenburd–2018, June, 11-15. [in Russian]

10. Troitskiy V.A. Indust X-ray testing without intermediate data carriers of information. Polsha. *Badanja Nieniszczace Diagnostyka*. 2018. No 2. P. 29-34. [in Polish]

11. Troitskiy V.O., Mihaylov S.R. та In. Patent na korisnu model «PristrIy dlya rentgentelevIzIynogo kontrolyu» No135146 of 25.06.2019r., byul. 12. [in Ukrainian]

12. Durr NDT GmbH and Co. KG. URL: <http://duerr-ndt.de/ru/product> Panels NDT. html.

13. Troitskiy V.A., Mihaylov S.R. i dr. Vvisokochuvstvitelnyie rentgentelevizionnyie sistemy na osnove rentgenovskih ekranov i PZS-kamer s nakopleniem izobrazheniy. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2019. No 3. P. 41-46. [in Russian]

14. Troitskiy V.A., Karmanov M.N., Shevchenko I.Ya. Razrabotki Instituta elektrosvarki im. E. O. Patona v oblasti nerazrushayushego kontrolya. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*, No 4, 2019, P. 4-12. [in Russian]

УДК 622.24+621. 694.2

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-16-23

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СВЕРДЛОВИННОГО СТРУМИННОГО НАСОСА

*Є. І. Крижанівський, Д. О. Паневник**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м.Івано-Франківськ,
вул.Карпатська, 15; тел.(0342) 727101; e-mail: den.panevnik@gmail.com*

На основі аналізу існуючих критеріїв гідравлічної подібності розглянуті правила перенесення результатів лабораторних досліджень струминних насосів на умови їх експлуатації в свердловині. Геометрична подібність проточної частини струминного насоса визначається діаметрами робочої насадки, камери змішування та дифузора, довжинами камери змішування та дифузора та відстанню між робочою насадкою та камерою змішування. Кінематична подібність змішуваних потоків визначається співвідношенням швидкостей або витрат інжектovanого та робочого потоків, а динамічна – відносним напором у вигляді співвідношення тисків змішаного, інжектovanого та робочого потоків. Для характеризування подібності режимів руху та фізичних властивостей потоків в проточній частині струминного насоса може використовуватись число Рейнольдса для робочої, інжектovanого та змішаної течій. Функціональний зв'язок між величинами, що характеризують процес змішування потоків, може бути представлений у вигляді залежності, між складеними з них критеріями подібності. Рівність будь-яких двох відповідних критеріїв подібності складених з основних параметрів і початкових граничних умов є достатньою ознакою подібності двох систем. Запропоновано узагальнений критерій Ейлера для моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса, який забезпечує взаємозв'язок між геометричними, кінематичними та динамічними безрозмірними комплексами. Зважаючи на конструктивні особливості ежекційних систем узагальнений критерій представлений у вигляді співвідношення критеріїв Ейлера змішаного та робочого потоків, числові значення якого не відрізняються від величини відносного напору струминного насоса. В результаті проведених досліджень встановлено значення безрозмірних комплексів, що визначають умови перенесення результатів експериментальних досліджень моделі струминного насоса на реальну конструкцію свердловинної ежекційної системи.

Ключові слова: свердловинний струминний насос, гідравлічне моделювання, критерії подібності, ежекційна система, модельні і натурні об'єкти.

На основе анализа существующих критериев гидравлического подобия рассмотрены правила переноса результатов лабораторных исследований струйных насосов на условия их эксплуатации в скважине. Геометрическое подобие проточной части струйного насоса определяется диаметрами рабочей насадки, камеры смешивания и диффузора, длинами камеры смешивания и диффузора и расстоянием между рабочей насадкой и камерой смешивания. Кинематическое подобие смешиваемых потоков определяется соотношением скоростей или расходов инжектированного и рабочего потоков, а динамическое - относительным напором в виде соотношения давлений смешанного, инжектированного и рабочего потоков. Для характеристики сходства режимов движения и физических свойств потоков в проточной части струйного насоса может использоваться число Рейнольдса для рабочего, инжектированного и смешанного течения. Функциональная связь между величинами, характеризующими процесс смешивания потоков может быть представлена в виде зависимости между сложными из них критериями подобия. Равенство любых двух соответствующих критериев подобия, составленных из основных параметров и начальных граничных условий является достаточным признаком сходства двух систем. Предложенный обобщенный критерий Эйлера для моделирования рабочего процесса скважинного струйного насоса, который обеспечивает взаимосвязь между геометрическими, кинематическими и динамическими безразмерными комплексами. Учитывая конструктивные особенности эжекционных систем, обобщенный критерий представлен в виде соотношения критериев Эйлера смешанного и рабочего потоков, числовые значения которого не отличаются от величины относительного напора струйного насоса. В результате проведенных исследований установлены значения безразмерных комплексов, определяющих условия переноса результатов экспериментальных исследований модели струйного насоса на реальную конструкцию скважинной эжекционной системы.

Ключевые слова: скважинный струйный насос, гидравлическое моделирование, критерии подобия, эжекционная система, модельные и натурные объекты.

On the basis of the analysis of the existing criteria of hydraulic similarity, the rules of transferring the results of laboratory tests of jet pumps to the conditions of their operation in the well are considered. The geometric similarity of the flow part of the jet pump is determined by the diameters of the working nozzle, the mixing chamber and the diffuser, the lengths of the mixing chamber and the diffuser, and the distance between the working nozzle and the mixing chamber. The kinematic similarity of mixed flows is determined by the ratio of the speeds or costs of the injected and the workflows, and the dynamic one by the relative pressure in the form of the pressure ratio of the mixed, injected and workflows. To characterize the similarity of motion modes and physical properties of flows in the flowing portion of a jet pump, a Reynolds number for working, injected, and mixed flows can be used. The functional relationship between the quantities that characterize the process of mixing threads can be represented as a relationship between the similarity criteria that are made of them. The equality of any two relevant similarity criteria made up of the basic parameters and initial boundary conditions is a sufficient sign of the similarity of the two systems. A generalized Eulerian criterion is proposed for modeling a wellbore jet pump workflow that provides a relationship between geometric, kinematic, and dynamic dimensionless complexes. Due to the structural features of the ejection systems, the generalized criterion is presented in the form of a ratio of Euler criteria of mixed and working flows, the numerical values of which do not differ from the magnitude of the relative pressure of the jet pump. As a result of the conducted researches, the values of dimensionless complexes are determined, which determine the conditions for transferring the results of experimental studies of the jet pump model to the real design of the well ejection system.

Keywords: downhole jet pump, hydraulic modeling, similarity criteria, ejection system, model and full scale objects.

Вступ

Зниження запасів вуглеводнів зумовлює необхідність удосконалення технологій розробки нафтогазових родовищ. Одним з нетрадиційних методів підвищення ефективності нафтогазовидобутку є застосування свердловинних струминних насосів, які сьогодні застосовують при бурінні [1], експлуатації [2] та ремонті [3] свердловин. Значною перевагою нафтогазових ежекційних технологій є можливість застосування свердловинних струминних насосів в складних гірничо-геологічних умовах, коли традиційні методи розробки покладів вуглеводнів є недостатньо ефективними. Обсяги використання нафтогазових ежекційних технологій зростають внаслідок поширення їх на розробку покладів нетрадиційних вуглеводнів та можливість продовжити тривалість експлуатації виснажених родовищ. Незважаючи на відсутність рухомих частин та просту конструкцію свердловинний струминний насос є складною гідромеханічною системою, гідравлічні зв'язки елементів якої моделюються за допомогою переважної більшості відомих на сьогоднішній день законів гідродинаміки. Складні гідромеханічні системи не піддаються точному розрахунку і при проектуванні для якісної і кількісної оцінки явищ та процесів потребують використання результатів модельних досліджень. Реальні умови роботи

свердловинного струминного насоса відрізняються від лабораторних, у зв'язку з чим необхідно встановити правила перенесення отриманих на моделі результатів на умови роботи ежекційної системи в свердловині.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Під час моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса приймаються критерії гідравлічної подібності у вигляді співвідношення площ перерізів змішаного та інжектваного потоків [4], змішаного та робочого потоків [5], діаметрів камери змішування та робочої насадки [6], їх взаємної орієнтації [7]. В роботі [8] показана залежність характеристик ежекційної системи від довжини камери змішування струминного насоса, що стало підставою введення критерію подібності у вигляді відносної довжини ділянки відновлювання швидкостей. Приведені в роботах [4] – [8] безрозмірні співвідношення визначають геометричну подібність проточної частини струминного насоса. Кінематична подібність змішуваних потоків визначається співвідношенням швидкостей або витрат інжектваного та робочого потоків [9], а динамічна – відносним напором у вигляді співвідношення тисків змішаного, інжектваного та робочого потоків [10]. Зважаючи на конструктивні особливості ежекційної системи залежність відносного напору від співвідношення витрат

інжектів та робочого потоків (від коефіцієнта інжекції) визначає напірну характеристику струминного насоса. Сукупність критеріальних параметрів доповнюється коефіцієнтами гідравлічного опору окремих елементів проточної частини струминного насоса та коефіцієнтами швидкостей в характерних перерізах ежекційної системи. В процесі експериментального та теоретичного дослідження робочого процесу струминного насоса, зазвичай, визначається його напірна характеристика.

Виділення частини невирішеної проблеми

Найбільш поширена методика визначення теоретичної напірної характеристики струминного насоса враховує величину його основного геометричного параметра, який визначається співвідношенням площ перерізів камери змішування та робочої насадки [11], [12]. Інші геометричні параметри, які визначають конструкцію проточної частини струминного насоса, при цьому не враховуються. Незважаючи на численність критеріїв подібності, які описують робочий процес струминного насоса, на сьогоднішній день не встановлено взаємозв'язку між безрозмірними комплексами, що характеризують конструкторські та режимні параметри свердловинних ежекційних систем. Значна кількість прийнятих різними авторами критеріїв подібності ускладнює застосування досвіду експлуатації струминних насосів при проектуванні їх конструкції та прогнозуванні режиму роботи. Теорія гідравлічного моделювання не містить універсального критерію подібності робочого процесу струминного насоса, який міг би з високою вірогідністю використовуватись для ежекційних систем різної конструкції та призначення. Недостатній рівень обґрунтування методів перенесення результатів моделювання робочого процесу струминного насоса на реальні конструкції свердловинних ежекційних систем обмежує ефективність їх застосування.

Мета досліджень

Мета роботи – аналіз критеріїв подібності режимів роботи та вдосконалення методів гідравлічного моделювання робочого процесу свердловинного струминного насоса.

Висвітлення основного матеріалу

Основними етапами моделювання робочого процесу струминного насоса є:

- побудова моделі насоса у вигляді образу об'єкта;
- дослідження побудованої моделі і об'єктивності;
- екстраполяція отриманої інформації на реальний об'єкт;
- практична перевірка екстраполяції.

Під час моделювання робочого процесу виникають складності наступного характеру [13]:

- 1) відомі не всі визначальні параметри процесу змішування потоків;
- 2) серед визначальних параметрів можна виділити такі, вплив яких на процес змішування є значний і такі, що впливають досить мало;
- 3) практично неможливо підібрати параметри реального насоса таким чином, щоб визначальні критерії моделі і натури були рівні;
- 4) при наявності змінних параметрів або анізотропії неможливо задовольнити додатковим умовам подібності.

Тому при моделюванні доводиться використовувати ті параметри, які відомі, чи виключати з розгляду параметри, вплив яких є незначним, нехтувати необхідністю рівності деяких критеріїв, користуватись середніми значеннями змінних величин. Тому подібність між моделями і побудованою на її основі натурою є наближеною. Намагання зберегти постійність окремих критеріальних параметрів може викликати появу додаткових похибок досліджень, зумовлених, наприклад, масштабним ефектом. Це призводить до необхідності моделювати процес зміни стану системи і, зокрема, законів, що встановлюють поведінку її елементів. При дослідженні роботи струминного насоса доцільно моделювати фізичні процеси, яким підпорядковується поведінка бурового розчину під час його руху в елементах проточної частини пристрою. Вдосконалення методів фізичного моделювання цих процесів дозволяє наблизити результати досліджень моделі струминного насоса до реальних показників його роботи.

Існує думка, що необхідна подібність процесу у потоці в'язкої рідини має місце лише у випадку дотримання геометричної, кінематичної і динамічної подібності.

Геометрична подібність полягає у збереженні форми при зміні розмірів лінії, плоскої фігури чи тримірного тіла (рисунок 1). Для вирішення суто геометричних завдань достатньо мати тільки одну основну одиницю – довжину. Під час моделювання необхідно також намагатись зберегти геометричну подібність

шорсткості поверхонь проточної частини насоса. Для вирішення завдань кінематики характерними поняттями є швидкість і прискорення, для побудови яких необхідні дві основні одиниці фізичних величин – довжина і час. В динаміці до понять часу приєднують ще поняття сили і маси.

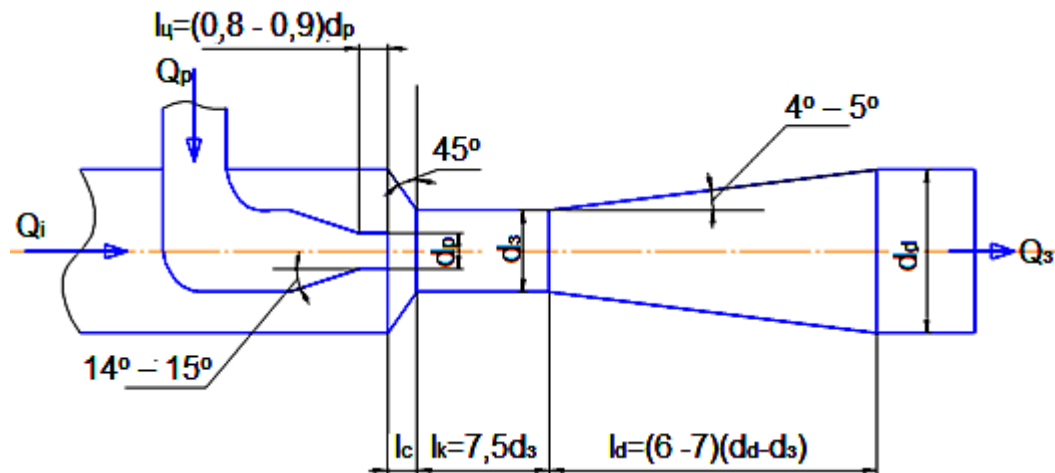


Рисунок 1 – Геометричні розміри проточної частини струминного насоса:

Q_s, Q_p, Q_i – витрати змішаного, робочого та інжектованого потоку, d_p, d_3, d_d – діаметри робочої насадки, камери змішування та дифузора, l_c, l_k, l_d – довжини циліндричної частини робочої насадки, камери змішування та дифузора, l_c – відстань між робочою насадкою та камерою змішування

Динамічна подібність може мати місце тільки при наявності кінематичної і геометричної подібності. Складність гідравлічного моделювання знайшла своє відображення, зокрема, у вигляді критеріальних параметрів, які визначають умови подібності модельних та натурних зразків свердловинного струминного насоса.

Розглянемо величину відносної площі або конструктивний параметр, що визначає геометричну подібність струминного насоса. В роботі [4] геометричний параметр струминного насоса визначений як відношення площ перерізів камери змішування f_3 та потоку підсмоктуваної рідини f_i біля зрізу сопла

$$K = \frac{f_3}{f_i}$$

Безрозмірний геометричний параметр визначають також [5] як відношення площ перерізів камери змішування f_3 та робочої насадки f_p струминного насоса. Сазонов Ю. А.

за основний критерій геометричної подібності пропонує приймати відношення площі перерізу камери змішування f_3 до площі стисненого перерізу f_c робочого струменя $K = \frac{f_3}{f_c}$.

Спрощений варіант визначення геометричного параметра передбачає розрахунок співвідношення діаметрів камери змішування d_3 та вихідного перерізу d_p робочого сопла

$$K = \frac{d_3}{d_p} \quad [6].$$

Як додаткові критерії геометричної подібності використовують також відносну відстань між камерою змішування та робочою насадкою $\bar{l}_p = \frac{l_c}{d_3}$ [7] та відносну довжину

$$\bar{l}_3 = \frac{l_k}{d_3} \quad [13].$$

Рівність співвідношень основних геометричних розмірів є недостатньою для подібності робочого

процесу моделі та оригіналу досліджуваного об'єкта [14]. Це пов'язано з наявністю різних величин витрати робочого та інжектваного потоків, відмінних режимів руху рідини та різних співвідношень тисків в характерних перерізах струминного насоса.

Кінематична подібність струминних насосів визначається величиною коефіцієнта інжекції, тобто співвідношенням витрати інжектваного та робочого потоків. Рівність коефіцієнтів інжекції, однак, не забезпечує однакових режимів руху потоків та співвідношень тисків в характерних перерізах струминного насоса.

Відмінності у визначенні критерію динамічної подібності – числа Рейнольдса – пояснюються особливостями конструкції гідравлічної системи струминного насоса, а саме – наявністю ліній робочого, змішаного та інжектваного потоків. Враховуючи конструкцію гідравлічної системи окремі автори, таким чином, розрізняють число Рейнольдса для робочого R_{ep} , змішаного R_{ez} та інжектваного R_{ei} [15], [16] потоків

$$\begin{aligned} R_{ep} &= \frac{V_p d_p}{\nu}, \\ R_{ez} &= \frac{V_z d_z}{\nu}, \\ R_{ei} &= \frac{V_i (d_z - d_i)}{\nu}, \end{aligned} \quad (1)$$

де V_p , V_z , V_i - швидкість робочого, змішаного та інжектваного потоків на вході у камеру змішування;
 ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості робочої рідини.

Для визначення числа Рейнольдса робочого потоку використовується також наступна формула

$$R_{ep} = \frac{d_p}{\nu} \sqrt{\frac{2(P_p - P_i)}{\rho}}, \quad (2)$$

де P_p , P_i - тиски відповідно робочого та інжектваного потоків;

ρ - густина робочої рідини.

Відомо що при моделюванні гідравлічних систем, втрати тиску для яких визначаються лінійним тертям, збереження критерію Рейнольдса означає автоматично рівність втрат тиску між характерними перерізами потоків. В

гідравлічній системі струминного насоса, однак мають місце додаткові втрати тиску в зосереджених гідравлічних опорах, а також гідравлічні втрати пов'язані із змішуванням потоків. Це призводить до необхідності залучення при моделюванні робочого процесу струминного насоса додаткового критерію динамічної подібності ежекційних систем.

Фізичне моделювання спирається на фізичні закономірності процесу і на відміну від, наприклад, геометричного моделювання має справу не тільки з лінійними величинами, а з цілим комплексом фізичних величин. Функціональний зв'язок між величинами, що характеризують процес змішування потоків може бути представлений у вигляді залежності між складеними з них критеріями подібності. Рівність будь-яких двох відповідних критеріїв подібності складених з основних параметрів і початкових граничних умов є достатньою умовою подібності двох систем.

Згідно сучасних уявлень робочий процес струминного насоса здійснюється під дією сил тертя та тиску. Наявність сил тиску викликає надходження низьконапірного інжектваного потоку в приймальну камеру струминного насоса, а сили тертя сприяють передачі енергії від робочого потоку інжектваному та їх змішуванню. Характер сил, які в окремих гідромеханічних системах є переважаючими порівняно з іншими визначає вигляд часткових критеріїв гідравлічної подібності. Зокрема, якщо основна роль належить силам тертя, для моделювання процесів руху рідини застосовують критерій Рейнольдса R_e . Переважаюча дія сил тиску передбачає використання критерію Ейлера E_u . Критерій Ейлера E_u для моделювання робочого процесу струминного насоса до цього часу не використовувався.

Відмінність у визначенні критерію Ейлера E_u для гідравлічної системи струминного насоса порівняно з напірним трубопроводом полягає у наявності в складі ежекційної системи трьох гідравлічних ліній. Враховуючи загальноприйнятий метод визначення різниці тисків у характерних перерізах струминного насоса доцільно розглядати критерії Ейлера відповідно для змішаного E_{uz} та робочого E_{ur} потоків

$$E_{уз} = \frac{\Delta P_3}{\frac{\rho V_i^2}{2}} = \frac{P_3 - P_i}{\frac{\rho V_i^2}{2}}; \quad (3)$$

$$E_{ур} = \frac{\Delta P_p}{\frac{\rho V_i^2}{2}} = \frac{P_p - P_i}{\frac{\rho V_i^2}{2}}, \quad (4)$$

де ΔP_3 , ΔP_p - враховуючи прийняту в теорії ежекційних систем термінологію відповідно напір, що створюється струминним насосом та його наявний напір.

Враховуючи різні значення швидкостей руху змішаного, робочого та інжектваного потоків значення швидкісного напору визначено для всмоктувальної лінії струминного насоса. Проводячи аналогію з послідовністю визначення відносного напору струминного насоса доцільним є застосування співвідношення двох отриманих величин. У такому випадку мова може йти про визначення узагальненого критерію Ейлера E_u^*

$$E_u^* = \frac{E_{уз}}{E_{ур}} = \frac{P_3 - P_i}{P_p - P_i}, \quad (5)$$

числові значення якого не відрізняються від значень відносного напору $E_u^* = h$.

Визначимо значення безрозмірних критеріальних параметрів моделі струминного насоса, що використовувалась при проведенні експериментальних досліджень [17].

Для діаметрів робочої насадки d_p : 16 мм; 18 мм; 22,5 мм та діаметра камери змішування $d_3 = 40$ мм геометричний параметр струминного насоса (який визначався як співвідношення площ $K_{сн} = \frac{f_3}{f_p}$) становить відповідно 6,25; 4,94

та 3,16. Розглянутий діапазон зміни геометричного параметра включає, таким чином, конструкцію струминного насоса, що забезпечує його роботу в зоні максимальних значень ККД, яка відповідає величині $K_{сн} = 4,0$. Додатковий критерій геометричної подібності характеризує відстань між робочою насадкою та камерою змішування струминного насоса l_p . У відносній формі цей параметр визначається співвідношенням відстані до камери змішування l_c та діаметра робочої насадки d_p .

Експериментальні дослідження моделі струминного насоса проводились для шести фіксованих значень відстані до камери змішування l_c : 16,5 мм; 21,5 мм; 26,5 мм; 31,5 мм; 36,5 мм; 41,5 мм. У відносній формі параметр $\bar{l}_p = \frac{l_c}{d_p}$ приймає значення в діапазоні

від 0,733 до 2,594. Оптимальним, як відомо, вважають значення відносної відстані $\bar{l}_p = 1,5$, яке входить у розглянутий діапазон зміни його параметра.

Критерій кінематичної подібності, який для струминного насоса приймається у вигляді коефіцієнта інжекції, визначається як співвідношення витрат інжектваного Q_i та робочого Q_p потоків $i = \frac{Q_i}{Q_p}$. В процесі

дослідження моделі струминного насоса з вищезгаданими геометричними параметрами коефіцієнт інжекції змінювався в діапазоні від $i = 0$ до $i = 1,1$. Приведений діапазон зміни коефіцієнта інжекції включає його величину, що відповідає максимальному значенню ККД струминного насоса, яка становить $i = 1,0$.

Визначимо величини критеріїв динамічної подібності. Критерій Рейнольдса визначимо для змішаного потоку струминного насоса, який додатково враховує значення двох інших критеріїв Рейнольдса – для робочого та інжектваного потоків. Враховуючи, що витрата потоку в камері змішування діаметром 40 мм змінювалась в межах від 8,6 л/с до 17,36 л/с для води отримаємо зміну значень числа Рейнольдса в діапазоні $0,27 \times 10^6 - 0,55 \times 10^6$. Узагальнений критерій Ейлера приймає граничні значення для нульових коефіцієнтів інжекції струминного насоса. За результатами проведених досліджень максимальне значення критерію Ейлера складає $E_u^* = 0,353$.

Підсумовуючи проведений аналіз запишемо значення безрозмірних комплексів, що визначають умови перенесення результатів експериментальних досліджень моделі струминного насоса на його використання в свердловині:

– відносна площа струминного насоса $K_{сн}$:
3,16 – 6,25;

– відносна відстань між робочою насадкою та камерою змішування \bar{l}_p : 0,733-2,594;

– число Рейнольдса змішаного потоку R_{e3} : (0,27-0,55)10⁶;

– узагальнений критерій Ейлера E_u^* : 0-0,353.

Дотримання при експлуатації реальної конструкції струминного насоса вищезгаданих значень критеріїв дозволяє з достатньою ймовірністю використовувати результати експериментальних досліджень.

Висновок

В процесі гідравлічного моделювання робочого процесу ежекційної системи визначена величина критеріїв подібності, які встановлюють умови перенесення результатів експериментальних досліджень моделі струминного насоса на його реальну конструкцію. Існуючий перелік безрозмірних комплексів, що визначають подібність робочих процесів струминних насосів, вперше доповнено узагальненим критерієм Ейлера. Дотримання при експлуатації реальної конструкції струминного насоса вищезгаданих значень критеріїв дозволяє з достатньою ймовірністю використовувати результати експериментальних досліджень.

Завданням наступних досліджень є промислова перевірка запропонованого критерію подібності та визначення вірогідності його використання для гідравлічного моделювання робочого процесу свердловинної ежекційної системи.

Список використаних джерел

1. Zhu H.-Y., Liu Q.-Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica B*. 2015. No 22 (3). P.792-803.

2. Khelifa B., Fraser K., Pug T. Subsea hydraulic jet pump optimizes well development offshore Tunisia. *World Oil*. 2015. No 11. P.71-76.

3. Shaiek S., Anres S., Valdenaire T. Sand management in subsea produced water separation unit – review of technologies and tests. 12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, March 25–27 2015. 13 p.

4. Дунчевский Г.М., Цабиев О.Н., Соломин В.С. Определение потерь в камере смешивания струйных насосов различного типа. *Известия*

вузов «Машиностроение». 1987. № 5. С. 29-32.

5. Фозао К.Ф. Методические рекомендации по проектированию параметров работы струйного насоса для интенсификации добычи нефти из фонтанных скважин. *Нефтепромысловое дело*. 2001. № 5. С. 25-29.

6. Кабдешева Ж.Е., Вербицкий В.С., Деньгаев А.В., Ламбин Д. Н. Исследование характеристик высоконапорного струйного аппарата при откачке струей жидкости газожидкостной смеси. *Нефтяное хозяйство*. 2003. №3. С.81-83.

7. Демьянова Л. А. Влияние расстояния от рабочего сопла до камеры смешивания на характеристики струйного аппарата при откачке газожидкостных смесей. *Нефтяное хозяйство*. 1998. № 9. С. 84- 85.

8. Подвидз Л.Г., Родимова А.М., Калачев В.В. Влияние длины камеры смешения на энергетические и кавитационные характеристики струйных насосов. *Известия вузов «Машиностроение»*. 1979. № 2. С. 66–69.

9. Подвидз Л.Г. Кавитационные свойства струйных насосов. *Вестник машиностроения*. 1978. № 3. С. 17–20.

10. Казак А.С., Росин И.И., Чичеров И.Г. Погружные безштанговые насосы в добыче нефти. М.: Недра, 1978. 232 с.

11. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение. 1988. 256 с.

12. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.

13. Онисько О.Р. Фізичне моделювання інженерних процесів. Івано- Франківськ: Факел, 2001. 39 с.

14. Мочернюк Д.Ю., Лівак І.Д., Костишин В.С., Концур І.Ф. Основи моделювання. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 216 с.

15. Кабдешева Ж.Е. Подбор рациональной геометрии проточной части высоконапорного струйного аппарата при откачке однородной жидкости. *Нефтепромысловое дело*. 2003. № 1. С.30-34.

16. Демьянова Л.А. Расчет характеристики высоконапорного струйного аппарата, работающего в оптимальном режиме. *Нефтепромысловое дело*. 2001. № 2. С. 20-29.

17. Крыжановский Е.И., Паневник Д.А. Экспериментальное исследование скважинного

струйного насоса. *Nauka I Studia. Nowoczesne Technologie Informacyjne* (Przemysl, Poland). 2019. No 5 (194). P. 30-40.

References

1. Zhu H.-Y., Liu Q.-Y. Pressure drawdown mechanism and design principle of jet pump bit. *Scientia Iranica B*. 2015. No 22 (3). P.792-803.

2. Khelifa B., Fraser K., Pug T. Subsea hydraulic jet pump optimizes well development offshore Tunisia. *World Oil*. 2015. No 11. P.71-76.

3. Shaiek S. , Anres S., Valdenaire T. Sand management in subsea produced water separation unit – review of technologies and tests. 12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, March 25–27 2015. 13 p.

4. Dunchevskiy G.M., Tsabiev O.N., Solomin V.S. Opredelenie poter v kamere smeshvaniya struynykh nasosov razlichnogo tipa. *Izvestiya vuzov «Mashinostroenie»*. 1987. No 5. P. 29-32. [in Russian]

5. Fozao K.F. Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu parametrov raboty struynogo nasosa dlya intensivatsii dobyichi nefi iz fontannykh skvazhin. *Neftepromyislovoe delo*. 2001. No 5. P. 25-29. [in Russian]

6. Kabdesheva Zh.E., Verbitskiy V.S., Dengaev A.V., Lambin D. N. Issledovanie harakteristik vyisokonapornogo struynogo apparata pri otkachke struey zhidkosti gazozhidkostnoy smesi. *Neftyanoe hozyaystvo*. 2003. No3. P. 81-83. [in Russian]

7. Demyanova L. A. Vliyanie rasstoyaniya ot rabocheho sopla do kameryi smeshvaniya na harakteristiki struynogo apparata pri otkachke gazozhidkostnykh smesey. *Neftyanoe hozyaystvo*. 1998. No 9. P. 84- 85. [in Russian]

8. Podvidz L.G., Rodimova A.M., Kalachev V.V. Vliyanie dliny kameryi smesheniya na

energeticheskie i kavitatsionnyie harakteristiki struynykh nasosov. *Izvestiya vuzov «Mashinostroenie»*. 1979. No 2. P. 66–69. [in Russian]

9. Podvidz L.G. Kavitsatsionnyie svoystva struynykh nasosov. *Vestnik mashinostroeniya*. 1978. No 3. P. 17–20. [in Russian]

10. Kazak A.S., Rosin I.I., Chicherov I.G. Pogruznyie bezshtangovyie nasosyi v dobyiche nefi. M.: Nedra, 1978. 232 p. [in Russian]

11. Lyamaev B.F. Gidrostruynnyie nasosyi i ustanovki. L.: Mashinostroenie. 1988. 256 p. [in Russian]

12. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struynnyie apparaty. M.: Energoatomizdat, 1989. 352 p. [in Russian]

13. Onysko O.R. Fizychni modeliuvannia inzhenernykh protsesiv. Ivano- Frankivsk: Fakel, 2001. 39 p. [in Ukrainian]

14. Mocherniuk D.Iu., Livak I.D., Kostyshyn V.S., Kontsur I.F. Osnovy modeliuvannia. Ivano- Frankivsk: Fakel, 2003. 216 p. [in Ukrainian]

15. Kabdesheva Zh.E. Podbor ratsionalnoy geometrii protochnoy chasti vyisokonapornogo struynogo apparata pri otkachke odnorodnoy zhidkosti. *Neftepromyislovoe delo*. 2003. No 1. P. 30-34. [in Russian]

16. Demyanova L.A. Raschet harakteristiki vyisokonapornogo struynogo apparata, rabotayuscheho v optimalnom rezhime. *Neftepromyislovoe delo*. 2001. No2. P. 20-29. [in Russian]

17. Kryzhanivskiy E.I., Panevnik D.A. Eksperimentalnoe issledovanie skvazhinnoho struynogo nasosa. *Nauka I Studia. Nowoczesne Technologie Informacyjne* (Przemysl, Poland). 2019. No 5 (194). P. 30-40.

УДК 667.64:678.02

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-24-34

МОДЕЛІ І СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ В СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

*А. О. Шарко**Херсонський національний технічний університет; 73008, м. Херсон, Бериславське шосе, 24,
e-mail: sharko_artem@ukr.net*

Необхідність розробки апаратних засобів технічної діагностики міцністних властивостей металевих конструкцій пояснюється потребами безперервного спостереження за станом промислових об'єктів в системах технічної діагностики, що дозволяють реєструвати силовий відгук на викликані зміною умов навантаження зміни структури матеріалу. Розглянуто сучасний стан апаратури технічної діагностики. Доведено, що головний принцип автоматизації керування в системах технічної діагностики міцністних властивостей матеріалів методами акустичної емісії зводиться до виявлення та ідентифікації сигналів, їх посиленню, частотної фільтрації, дискримінації та нормуванню імпульсів за тривалістю і амплітудою. Використання цих операцій дозволяє автоматизованій системі обробляти первинні дані в режимі реального часу та здійснювати інтегральну оцінку стану об'єкта на різних стадіях його життєвого циклу. Запропоновано структурну схему приймальної апаратури вимірювання параметрів акустичної емісії, ряд конструкцій акустичних датчиків і апаратного забезпечення обробки сигналів акустичної емісії, які гарантують високі якісні показники експлуатаційної надійності металевих конструкцій. На підставі аналізу сучасної і зарубіжної апаратури, яка набула поширення в практиці технічної діагностики методом акустичної емісії, сформульовані напрямки формування акустичного тракту діагностичного обладнання та основні вимоги до конструювання реєструючої апаратури. Встановлено, що інформаційне забезпечення автоматизованих систем контролю та діагностики металевих конструкцій вимагає визначення їх інформативних параметрів. Доведено, що основною характеристикою діагностики стану металевих конструкцій в процесі їх експлуатації є потік АЕ сигналів, який визначається середнім значенням амплітуди імпульсів, дисперсією амплітуди, амплітудним розподілом, амплітудно-частотним розподілом тимчасових інтервалів між імпульсами. Відновлення інформації, отриманої діагностичною системою від джерела АЕ, є основним принципом побудови автоматизованих систем контролю та діагностики металевих конструкцій.

Ключові слова: акустична емісія, технічна діагностика, автоматизація, рекомендації, вимоги.

Необходимость разработки аппаратных средств технической диагностики прочностных свойств металлических конструкций объясняется потребностями непрерывного наблюдения за состоянием промышленных объектов в системах технической диагностики, позволяющих регистрировать силовой отклик на вызванные изменением условий нагрузки изменения структуры материала. Рассмотрены современное состояние аппаратуры технической диагностики. Доказано, что главный принцип автоматизации управления в системах технической диагностики прочностных свойств методами акустической эмиссии сводится к выявлению и идентификации сигналов, их усилению, частотной фильтрации, дискриминации и нормированию импульсов по длительности и амплитуде. Использование этих операций позволяет автоматизированной системе обрабатывать первичные данные в режиме реального времени и осуществлять интегральную оценку состояния объекта на разных стадиях его жизненного цикла. Предложена структурная схема приемной аппаратуры измерения параметров акустической эмиссии, ряд конструкций акустических датчиков и аппаратного обеспечения обработки сигналов акустической эмиссии, которые гарантируют высокие качественные показатели эксплуатационной надежности металлических конструкций. На основании анализа современной и зарубежной аппаратуры, получившее распространение в практике диагностики методом акустической эмиссии, сформулированы направления формирования акустического тракта диагностического оборудования и основные требования к конструированию регистрирующей аппаратуры. Установлено, что информационное обеспечение автоматизированных систем контроля металлических конструкций требует определения их информативных параметров. Доказано, что основной характеристикой диагностики состояния металлических конструкций в процессе их эксплуатации является поток АЕ сигналов, который определяется средним значением амплитуды импульсов, дисперсией амплитуды, амплитудным

распределением, амплитудно-частотным распределением временных интервалов между импульсами. Восстановление информации, полученной диагностической системой от источника АЭ, является основным принципом построения автоматизированных систем контроля и диагностики металлических конструкций.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, техническая диагностика, автоматизация, рекомендации, требования.

The need to develop hardware for the technical diagnostics of the strength properties of metal structures is explained by the need for continuous monitoring of the state of industrial objects in the systems of technical diagnostics, which allow to record the force response to changes caused by changes in the loading conditions of the material structure. The current state of technical diagnostics equipment is considered. It is proved that the main principle of control automation in the systems of technical diagnostics of the strength properties of materials by acoustic emission methods is the detection and identification of signals, their amplification, frequency filtering, discrimination and normalization of pulses in duration and amplitude. The use of these operations allows the automated passport system to process the primary data in real time and to perform an integrated assessment of the state of the object at different stages of its life cycle. A structural diagram of the receiving equipment for measuring acoustic emission parameters, a number of designs of acoustic sensors and hardware for processing acoustic emission signals, which guarantee high quality performance of metal structures. On the basis of the analysis of modern and foreign equipment, which became widespread in the practice of technical diagnostics by the method of acoustic emission, the directions of formation of the acoustic tract of diagnostic equipment and the basic requirements for the design of the recording equipment are formulated. It is established that information support of automated systems of control and diagnostics of metal structures requires determination of their informative parameters. It is proved that the main characteristic of diagnostics of the state of metal structures in the course of their operation is the flow of AE signals, which is determined by the average value of the pulse amplitude, the dispersion of the amplitude, the amplitude distribution, the amplitude frequency distribution of time intervals between pulses. The recovery of information obtained by the diagnostic system from the AE source is the basic principle of the construction of automated control systems and diagnostics of metal structures.

Keywords: acoustic emission, technical diagnostics, automation, recommendations, requirements.

Постановка проблеми. Серед методів оцінки стану різноманітних за формою і розмірами металевих конструкцій особливе місце належить методу акустичної емісії (АЕ), якій дозволяє за допомогою спеціальних процедур і методів неруйнівного контролю оцінити перспективи експлуатаційної надійності конструкцій за вимірюванням фізико-механічних властивостей матеріалу без розбирання самої конструкції.

Апаратне забезпечення вимірів сигналів АЕ потребує подолання труднощів, пов'язаних з різноманітністю вирішуваних завдань, відсутністю єдиних принципів побудови і класифікації апаратури, нормативних документів і стандартів на методики вимірів змін механічних властивостей матеріалів.

Через складність взаємозв'язків структурних параметрів і фізико-механічних характеристик матеріалу не можна покладатися на апріорні відомості про їх зміну. Для цього необхідне проведення технічної діагностики зміни визначення міцнісних характеристик матеріалів як на різних стадіях технологічних процесів виготовлення виробу, так і в процесі

його експлуатації для своєчасного виявлення місць із зниженою механічною міцністю і запобігання аваріям.

Прогнозування структурних станів матеріалів на основі встановлення зв'язку між еволюцією дефектної структури і кінетикою накопичення пошкоджень на різних стадіях пластичної деформації і руйнування представляє не тільки наукову, а й технічну задачу але може служити основою підвищення надійності функціонування складних технічних об'єктів при розробці апаратних засобів, алгоритмів і методів реєстрації сигналів АЕ в системах технічної діагностики металевих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання інструментарію АЕ надає можливість знайти невідомі раніше характеристики структури матеріалів, простежити динаміку їх розвитку, стійкість, цілісність і забезпечити прогнозування розвитку дефектів матеріалу [1-6].

Амплітуда і енергія початкового імпульсу АЕ може змінюватися в широкому діапазоні в залежності від типу джерела АЕ. Форма хвилі,

зазнає істотні зміни в міру наближення до приймача АЕ. Для встановлення початкової форми сигналу використовують широкополосні датчики. Для докладного аналізу зареєстрованого сигналу використовується узкополосна апаратура, що дозволяє вимірювати окремі параметри форми сигналів і реєструвати їх великі потоки. Ці два підходи становлять сутність апаратурною реалізації методу АЕ [7,8].

Для вироблення практичних рекомендацій по конструюванню і автоматизації апаратури технічної діагностики міцнісних властивостей металевих конструкцій необхідно проведення комплексних досліджень в напрямках автоматизації вимірювань, що включають схеми, методи та конструкторські рішення та автоматизації засобів обробки інформації, яка включає алгоритми, прийоми і методики виділення корисної інформації на фоні шумів.

Формулювання мети дослідження.

Визначення напрямків формування акустичного тракту діагностичного обладнання та основних вимог до конструювання реєструючої апаратури.

Викладення основного матеріалу дослідження. На формування сигналів АЕ основний вплив надає енергія, що виділяються при деформації. Величина і швидкість деформації побічно пов'язані з енергією і частотою пружних хвиль. Тому при встановленні взаємозв'язку зміни механічних властивостей при деформації металів і генерації виникнення АЕ сигналів в основу ставлять дослідження спектральних характеристик АЕ з метою оцінки можливості їх використання для вирішення завдань діагностики.

Для адекватного опису динамічних процесів, що відбуваються в матеріалах під навантаженням необхідно розглянути математичні моделі основних характеристик сигналів акустичної емісії (АЕ), реалізація яких може бути покладена в основу конструювання пристроїв автоматизації процесів технічної діагностики.

Амплітудний розподіл імпульсів $n(A)$ – функція, яка вказує кількість імпульсів з амплітудою від A до $A + dA$. Вона визначає загальну кількість зареєстрованих імпульсів N_{Σ} за час спостереження

$$N_{\Sigma} = \int_0^{\infty} n(A) dA.$$

Динаміку фізичних процесів, які супроводжують випромінювання АЕ, відображає амплітудно-часовий розподіл АЕ $n(A,t)$, тобто функція, яка вказує кількість імпульсів АЕ dN , зареєстрованих в проміжку часу від t до $t + dt$, амплітуда яких укладена в інтервалі від A до $A + dA$:

$$dN = n(A,t) dA dt.$$

Накопичення відомостей о дефектах міститься в інформації про розподіл часових інтервалів між окремими імпульсами. При взаємній незалежності елементарних подій, що призводять до АЕ, і однаковою ймовірності протікання подій, потік АЕ сигналів описується законом Пуассона, згідно з яким ймовірність зареєструвати N імпульсів за час t визначається співвідношенням

$$P(N, t) = \left\{ \frac{(vt)^N}{N!} \right\} \exp\{-vt\},$$

де v – інтенсивність потоку, тобто середнє число імпульсів АЕ в одиницю часу.

Імпульс АЕ володіє широким частотним спектром, будучи суперпозицій пружних хвиль різної частоти. Дисперсія призводить до фазового зсуву між частотними складовими імпульсу. В результаті форма реєстрованого імпульсу спотворюється пропорційно відстані між джерелом і приймачем АЕ сигналу.

Амплітуда і енергія початкового імпульсу АЕ може змінюватися в широкому діапазоні в залежності від типу джерела АЕ. Форма хвилі, зазнає істотні зміни в міру наближення до приймача АЕ. Для встановлення початкової форми сигналу використовують широкополосні датчики. Для докладного аналізу зареєстрованого сигналу використовується узкополосна апаратура, що дозволяє вимірювати окремі параметри форми сигналів і реєструвати їх великі потоки. Ці два підходи становлять сутність апаратурною реалізації методу АЕ [7,8].

Крім власних шумів апаратура тракту прийому і обробки інформації може бути схильна до зовнішніх шумів. Для зменшення їх дії застосовуються активні і пасивні методи.

Активні - полягають в зменшенні джерела шуму механічного характеру, створюваного

самим випробувальним обладнанням, механічними і гідравлічними навантажувальними пристроями. Це досягається розробкою спеціальних елементів в контрольованих конструкціях, призначених для зменшення тертя в сполучених ланках, введенням прокладок і шумопоглиначів.

Пасивні методи використовують із застосуванням таких прийомів:

- амплітудна дискримінація для відсічення шумів шляхом порівняння сигналів АЕ з деяким наперед заданим значенням.
- частотна фільтрація, для обмеження частоти пропускання підсилювального тракту. Обмеження в області низьких частот лежать в межах 20-200 кГц, в області високих –2,5 МГц.
- тимчасова селекція, яка полягає в замиканні каналів реєстрації сигналів АЕ на час дії перешкод.
- параметрическая селекція, що містить у обробці сигналів з певними значеннями їх параметрів.

До складу апаратури АЕ входять наступні блоки:

- перетворювачі АЕ;
- попередні і основні підсилювачі;

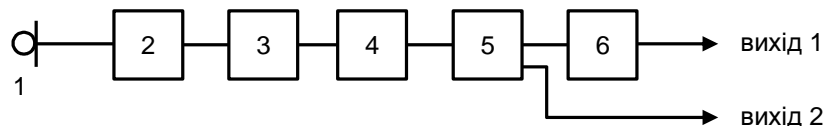
- засоби ідентифікації і обробки сигналів, включаючи порогові пристрої, пристрої виділення і вимірювань параметрів сигналів АЕ, пристрої реєстрації і представлення інформації;
- засоби вимірювання допоміжних параметрів;
- контролери.

Побудова апаратури для виявлення і реєстрації сигналів АЕ вимагає вирішення низькі технічних завдань. До них відносяться:

- реєстрація сигналів АЕ;
- аналогова і цифрова обробка електричних сигналів;
- представлення і накопичення інформації;
- ідентифікація джерел і прийняття рішень;
- вироблення оповіщення у разі виходу параметрів АЕ за межі встановленого інтервалу.

В технічній діагностиці методами АЕ в якості параметрів, вибирають інтенсивність і активність сигналів АЕ. Під активністю розуміють – число актів АЕ в одиницю часу, під інтенсивністю – число перетворень встановленого порогу дискримінації в одиницю часу на виході приймальної системи.

Приймальна апаратура реалізації параметрів АЕ в блоково-модульному виконанні може будуватися за наступною схемою (рис. 1).



**Рисунок 1 – Структурна схема приймної апаратури для виміру параметрів АЕ:
 1- п'єзоперетворювач, 2 – попередній підсилювач, 3 – блок фільтрів, 4 – основний підсилювач,
 5 – дискримінатор, 6 - детектор**

Вхідні ланцюги приймального пристрою мають резонансні властивості, що приводить до формування на виході основного підсилювача затухаючого імпульсу. Сигнали з АЕ датчиків посилюються передпідсилювачами і поступають в блоки аналогової обробки сигналів, в яких піддаються подальшому посиленню, двонапівперіодному детектуванню і амплітудній дискримінації [9].

Дискримінатор виробляє імпульси фіксованої амплітуди в кількості, що дорівнює числу перетинів детектованим сигналом порогового рівня. При цьому число перетинів порогу на виході 2 істотно перевищуватиме число зареєстрованих імпульсів на виході 1.

При такій локалізації дефектів кількість подій в одиницю часу на виході 1 характеризує активність АЕ, а число пересічень порогу дискримінації в одиницю часу на виході 2 характеризує інтенсивність АЕ.

В чотирьохканальній схемі контролю сигнал, що прийшов першим, запускає відлік часу в трьох каналах, до тих пір, поки на ці канали не прийдуть інші сигнали групи. Послідовність сигналів АЕ поступає на центральний процесор, що координує зберігання, відображення і обробку даних.

Широко відома проблема низького рівня вхідного сигналу АЕ, яка обумовлена низьким рівнем вихідного сигналу пьезоперетворювача

(до 1 мВ). При роботі п'єзоелектричного датчика необхідно забезпечити режим роботи його виходу, близький до холостого ходу, оскільки навантаження на виході пьезопреобразователя може вплинути на характеристики датчика із-за зворотного п'єзоефекту. Це висуває високі вимоги до вхідного опору передпідсилювача і його вхідної ємності, а також накладає обмеження на довжину інформаційних каналів від датчика до підсилювача.

Серед різноманіття датчиків АЕ слід зазначити ряд винаходів автора в цьому напрямку [10-12].

Конструкція акустичного датчика описана в патенті на корисну модель [11]. На точність визначення механічних властивостей металів за допомогою метода АЕ впливають похибки акустичних вимірювань, в наслідок високої площі акустичного контакту. Найближчим аналогом запропонованого винаходу є пристрій, який містить п'єзоелемент, демпфер, призму хвилеводу, контактний пристрій, корпус випромінювача [12]. Однак цим пристроєм неможливо підвищити точність визначення механічних властивостей випробовуваних виробів.

Головний недолік використання датчиків з великою площиною акустичного контакту полягає в у тому що, розміри виробів можуть коливатися в межах допусків і тому для різних виробів є різні зони контакту, в яких найбільш ефективно утворюється зсувна поперечна хвиля, котра може перебувати в різних точках виробів. Внаслідок цього, шлях проходження акустичним імпульсом по поверхні виробу також може змінюватися в межах розміру зони контакту, тобто в межах близько 10 мм. Пов'язаний з цим відносний розкид часу проходження імпульсу становить близько 4%, що більше ефекту зміни характеристик акустичного імпульсу, викликаного зміною його властивостей.

Запропонована конструкція датчика з локалізацією зони (рис.2) містить п'єзоелемент, демпфер, призму хвилеводу, контактний пристрій, корпус випромінювача, хвилевод, виконаний у вигляді рівнобедреної піраміди і розташований по відношенню до контрольованого матеріалу так щоб і кут між висотою хвилеводу, співпадаючою з віссю ультразвукового проміння і нормаллю до поверхні виробу був дорівняв першому

критичному куту для межі розділу матеріалу хвилеводу і виробу $\beta_{кр}$. Датчик додатково забезпечений противагою, центр тяжіння котрою розташований зовні піраміди хвилеводу для дотримання постійності кута введення ультразвукових коливань при контролі.

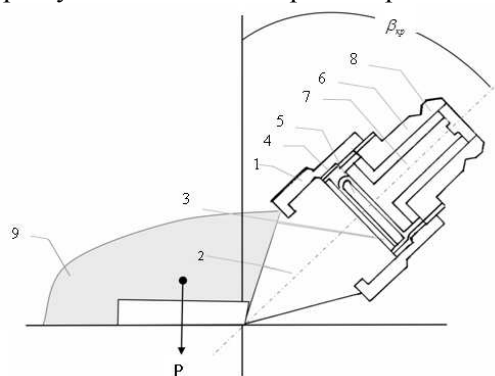


Рисунок 2 – Акустичний датчик з локалізацією зони акустичного контакту

Закони відображення ефекту зміни розповсюдження і переломлення пружних хвиль аналогічні законам геометричної оптики. Першим критичним кутом $\beta_{кр}$ називається найменший кут падіння поздовжня хвилі, при якому заломлена поздовжня хвиля не проникає в друге середовище і в середовищі поширюватиметься тільки поперечна хвиля.

Акустичний датчик складається з корпусу 1 в якому розміщений хвилевод 2, виконаний у вигляді рівнобедреною піраміди, п'єзоелемент 3 сполучений з хвилеводом 2 через ізоляційне кільце 4. Інша сторона п'єзоелемента 3 сполучена з демпфером 5 через ізоляційну втулку 6 і контактний штир 7, що фіксуються затискною гайкою 8, а датчик додатково забезпечений противагою 9, з'єднаною з хвилеводом 2. При поданні електричного імпульсу на п'єзоелемент 3 відбуваються деформація його поверхонь. За рахунок цього випромінюються ультразвукові коливання, які через піраміду хвилеводу 2 поступають до контрольованого виробу. При контролі вершина кута хвилеводу 2 притиснута до поверхні виробу. На вершину хвилеводу 2 наноситься контактна рідина, що утворює прошарок.

Запропонований акустичний датчик контролю фізико-механічних властивостей матеріалів дозволяє підвищити точність контролю за рахунок локалізації зони акустичного контакту.

Конструкція відомих датчиків АЕ, складеться з п'єзоелектричного активного елемента, ізоляторів його бічних пластин, компаунда, що виконує роль демпфера, металевого корпусу і контактної пристрою не дозволяє виключити можливі перешкоди, які знижують якість АЕ [14].

В конструкції запропонованого датчика АЕ [10] додатково розміщено передпідсилювач і блок фільтрів, які виконані в одному корпусі 1 з п'єзоелектричним активним елементом та контактним пристроєм (рис.3). П'єзоелектричний активний елемент 2 перетворює сигнал напружено-деформованого стану контрольованого об'єкта 5 в електричні імпульси, які подаються на вхід передпідсилювача 3 і далі подаються на блок фільтрів 4, який здійснює перетворення отриманої інформації в сигнал АЕ. Використання даної конструкції датчика АЕ знижує: рівень шумів і підвищує якість контролю при оцінці міцних властивостей металів в конструкціях, що працюють в умовах навантажень.

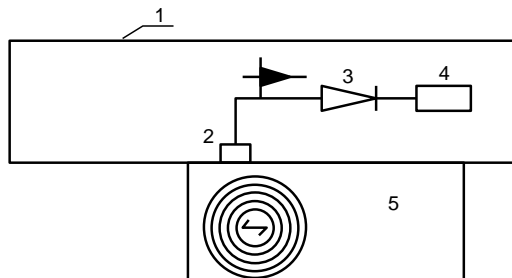


Рисунок 3 – Конструкція акустичного датчика з пониженим рівнем шумів

Апаратне забезпечення обробки сигналів АЕ викладено в [13]. Найближчим аналогом є система акустико-емісійного контролю, що складеться з приймальних перетворювачів АЕ, підсилювачів і смугових фільтрів, пристрою для регулювання порогу дискримінації пристрою для вимірювання параметрів сигналу АЕ, пристрою реєстрації [14]. Недоліком аналога є технічна складність компоновки основних блоків і динаміки їх взаємодії, та неможливість

підвищення точності оцінок працездатності контрольованих виробів.

Запропоновано апаратне забезпечення обробки сигналів АЕ [13], яке додатково включає пристрої, що містять інформаційний канал, що включає приймальну антену, яка складеться з датчиків АЕ, сполучених з блоком фільтрів через систему передпідсилювачів; канал аналогової обробки сигналів, що складається з модуля АЕ і компаратора, амплітудного дискримінатора і детектора; канал відображення і аналізу інформації, що включає центральний процесор, сполучений з мікрокомп'ютером і системою виведення інформації на периферійний пристрій; канал оцінки технічного стану об'єкта, що відповідає за аналіз працездатності системи і ухвалення, а також канал акумуляції накопичених даних, що забезпечує оперативну обробку і відображення інформації в режимі реального часу (рис.4).

Корисна модель працює наступним чином. Сигнал з чотирьохточкової антени 1.1, представленої набором датчиків 1.2, розташованих на контрольованому об'єкті, посилюються передпідсилювачами 1.3 і далі надходить в блок фільтрів 1.4 і канал аналогової обробки сигналів 2, де піддається подальшому посиленню, двонапівперіодному детектуванню і амплітудній дискримінації 2.3.

Канал відображення і аналізу інформації 3 включає наступні операції: ідентифікацію вихідного сигналу, визначення послідовності часу приходу АЕ сигналу від датчиків, вимірювання тимчасових інтервалів, визначення координат джерела. Діагностика оцінки придатності контрольованого виробу до подальшої експлуатації здійснюється каналом технічного стану об'єктів 4, де здійснюються аналіз працездатності, і акумуляція накопичених даних.

Використання апаратного забезпечення обробки сигналів АЕ значно скорочує час проведення діагностичних робіт, економить засоби, що витрачаються на їх проведення за рахунок виведення устаткування з експлуатації.

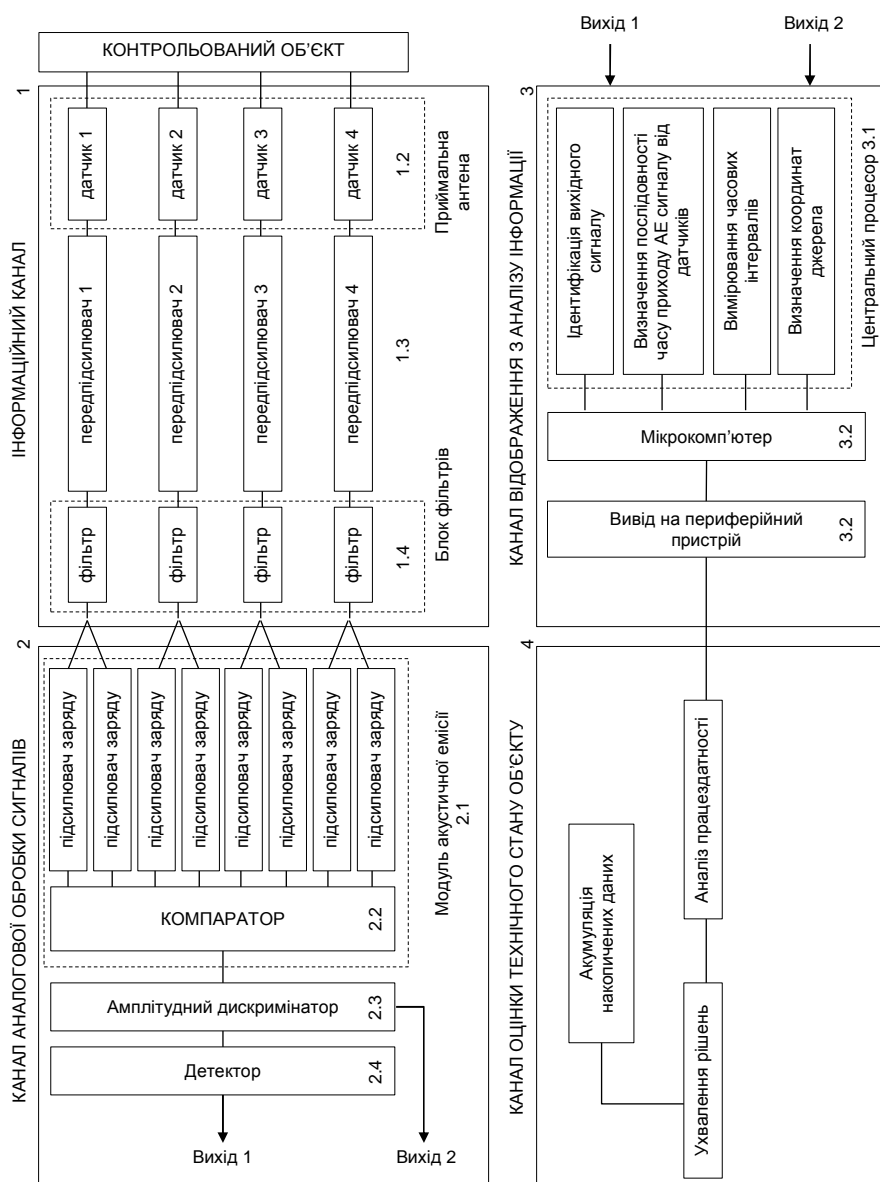


Рисунок 4 – Апаратне забезпечення обробки сигналів АЕ

Загальної спрямованістю розглянутих патентів є створення і вдосконалення засобів технічного забезпечення, які гарантують високі якісні показники експлуатаційної надійності металевих конструкцій.

З метою визначення вимог до реєструючої апаратури АЕ наведено аналіз сучасної зарубіжної та вітчизняної апаратури систем акустико-емісійного контролю, які набула поширення в практиці технічної діагностики.

Системи акустико-емісійного контролю є багатоканальними складними пристроями, що є сукупністю апаратних засобів, обчислювальних

пристроїв і спеціалізованого програмного забезпечення [15].

Прилади серії "Малахіт" використовують при контролі трубопроводів, судин під тиском, резервуарів для нафтопродуктів, устаткування хімічного, нафтохімічного і нафтопереробного виробництва. АЕ системи "Малахіт" відрізняє модульність. На будь-якому етапі контролю є можливість додати необхідну кількість каналів до функціонуючої системи. "Малахіт АС-12А" - модульна багатоканальна система. Кількість каналів в одному блоці від 8 до 16. Частотний діапазон 10-300 кГц. Рівень шуму, приведеного

до входу, - 3 мкВ. "Малахіт АС-15А" - модульна багатоканальна система. Кількість каналів в одному блоці залежить від модуля (2,12,18, 40 каналів). Частотний діапазон 1-500 кГц. Середня швидкість реєстрації сигналів до 156000 сиг/с. Рівень шуму, приведенного до входу, - 3 мкВ. Експерт 2014. Кількість каналів в одному блоці залежить від модуля (8, 16, 64 каналів). Частотний діапазон 4-700 кГц. Рівень шуму, приведенного до входу до 5 мкВ. Експерт 2020. Частотний діапазон 5-600 кГц. Середня швидкість реєстрації сигналів не менше 15 000 сиг на канал. Рівень шуму, приведенного від 3 мкВ. Експерт 2100. Зв'язок між датчиком і блоком обробки здійснюються по радіоканалу. Частотний діапазон від 15 до 500 кГц. Рівень шуму від 3 мкВ. Ресурс 2000. Комплекс інтегрального моніторингу для проведення стаціонарного контролю. Кількість каналів комплексу вибирається під об'єкт контролю. Акустико-емісійний прилад ГСП АРГУС-7 АФ-15 - двоканальний реєстратор, що забезпечує вимір сумарної АЕ і інтенсивності в діапазоні частот від 20 кГц до 2,5 МГц. Прилад оснащений набором п'єзоелектричних перетворювачів П113 - (0.6-1.0) з коефіцієнтом перетворення по напруженню $18 \pm 0.8 \text{ мВс}^2 / \text{м}$, володіє власною частотою 160кГц і нерівномірністю частотної характеристики 0,3 дБ. UNISCOPE. Портативна система універсального призначення: течеискання, тензометрія, віброметрія. Частотний діапазон 0,5-1 МГц [16]. Лель/a-line 32D(DDM). Багатоканальна модульна система з послідовним цифровим каналом передачі даних. Частотний спектр від 30 до 500кГц. Рівень шуму не більш 5 мкВ. Лель/a-line 32D(PCI-8E).

Багатоканальна цифрова система. Частотний діапазон від 30 до 500кГц. Рівень шуму не більше 5 мкВ. А-line DDM-2 – модифікація систем архітектури А-line PCI совмещает централизованную схему обработки данных и цифровую передачу первичной информации на базе сбора и обработки данных. Сигнал от преобразователя АЭ усиливается и оцифровывается в конверторе DS (Dsgstal Sensor) с передачей информацией на компьютер [17]. АЕ система DISP (Digitals Partan) є декількома платами PCI / DSP-4 - 4-канальний платою спроектованої на основі цифрових сигнальних процесорів (DSP), реєструючих параметри сигналів АЕ і їх форму. Всі плати АЕ систем складаються з аналогової і цифрової частин. Аналогові частини всіх плат ідентичні, і розрізняються тільки вживаними фільтрами високих і низьких частот. Блок-схема аналогової частини, з таблицями частот зрізу фільтрів зверху і знизу для різних плат, приведена на рис. 5. На всіх платах є виходи для підключення індикаторних світлодіодів, виходи на звуковий монітор, і по 8 цифрових входів і виходів, що використовуються для управління. Після установки плат в каркас, вони об'єднуються загальною шиною (рис.6). За рахунок застосування такої архітектури досягається швидкість передачі даних на шину PCI до 132 Мбайт/с.

Існують робочі станції на базі плат РАС, де кожна робоча станція містить повністю функціональну систему АЕ, що включає сучасний комп'ютер з жорстким, гнучким і компакт-диском, USB портами, паралельним портом, мережевим контролером.

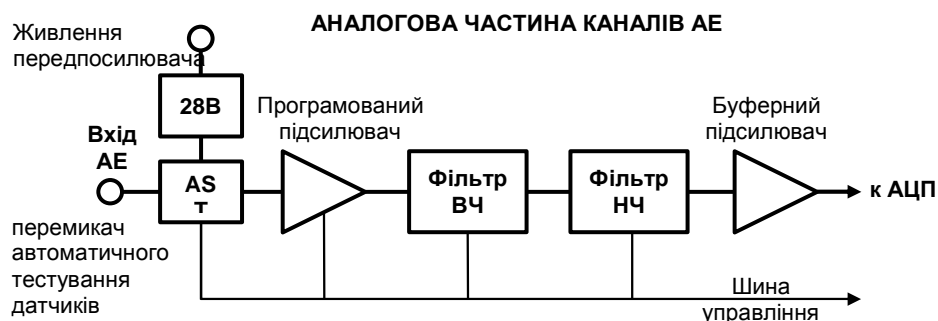


Рисунок 5 – Блок-схема аналогової частини плат

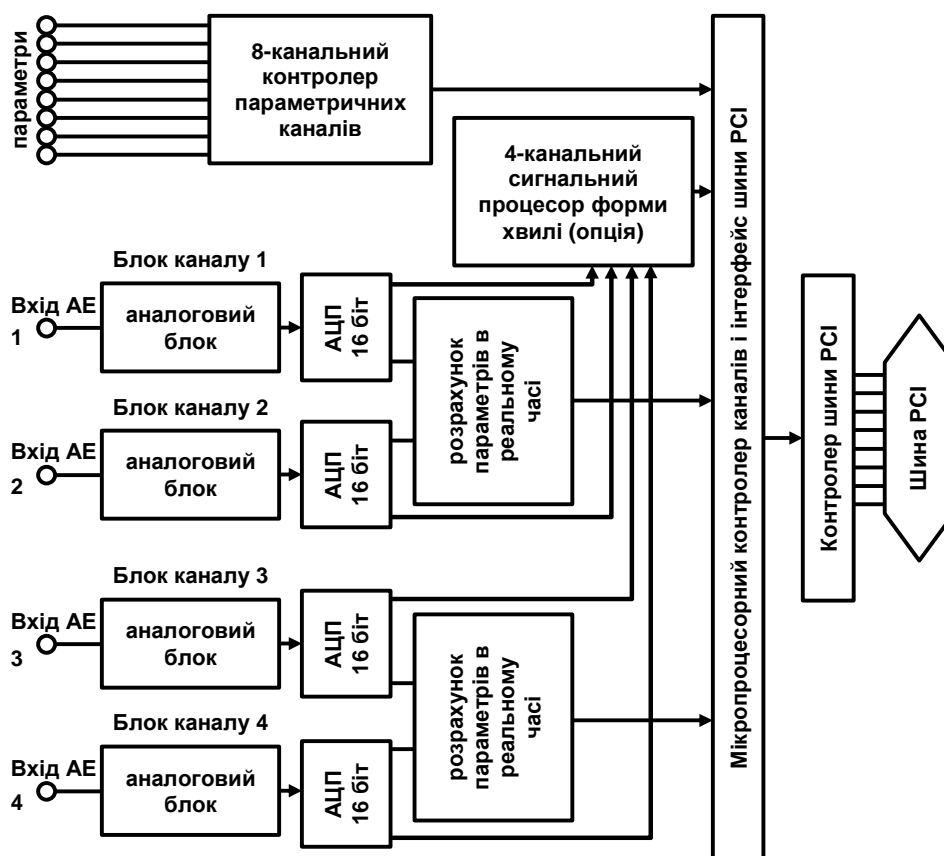


Рисунок 6 – Блок-схема плати PCI/DSP-4

Система «Iron-Box» є портативним комп'ютером в міцному металевому корпусі. Існують дві модифікації комп'ютерів цього типу - на 2 і на 3 роз'єму PCI для установки плат. Для настройки АЕ системи, збору і обробки отриманих даних використовується програмний пакет АЕwinTM, що забезпечує швидку реєстрацію і обробку параметрів і форм сигналів АЕ в операційному середовищі Windows.

На підставі аналізу сучасної вітчизняної і зарубіжної апаратури АЕ сформульовані вимоги до реєструючої апаратури:

- робочий частотний діапазон апаратури повинен змінюватися в межах від 10кГц до 2,5 МГц. Такий діапазон частот обумовлений тим, що ширина смуги частот, приймального тракту повинна бути такою, щоб в її межах можна було б нехтувати нерівномірністю спектральної щільності перешкоди і сигналу;

- сигнали АЕ випромінюються в широкому спектрі частот, тому смуга пропускання апаратури повинна бути максимальній при мінімумі нерівномірності

амплітудно-частотній характеристиці підсилювального і перетворюючого тракту;

- амплітудна селекція, повинна мати значний динамічний діапазон, оскільки наряду з сигналами малої амплітуди здійснюється реєстрація сигналів великої амплітуди;

- при контролі виробничих об'єктів рекомендується використання резонансних приймачів АЕ, що мають вищу чутливість в порівнянні з широкосмуговими;

- оскільки, контрольовані об'єкти мають кінцеві розміри, хвилі, зазнають багатократні віддзеркалення, які зашумляють корисну інформацію. Це вимагає введення широкосмугових фільтрів;

- при використанні апаратури з великим діапазоном частот необхідне використання перетворювачів з амплітудно-частотною характеристикою, близькою до лінійної в робочим діапазоні частот;

- апаратура для АЕ-контроля повинна володіти максимальною чутливістю до реєстрації сигналів малої амплітуди.

Висновки

Автоматизація процесів управління в системах технічної діагностики металевих конструкцій відбувається в двох напрямках: автоматизація вимірювань, що включає схеми, методи та конструкторські рішення, автоматизація обробки інформації, що включає алгоритми, моделі, прийоми і методики виділення корисної інформації.

Напрямки формування акустичного тракту АЕ діагностичного обладнання зводяться до виявлення та ідентифікація сигналів, їх посиленню, частотної фільтрації, дискримінації та нормуванню імпульсів по тривалості і амплітуди.

Основні вимоги до реєструючої апаратури АЕ повинні відображати наступні моменти: ширина смуги частот приємного тракту має бути максимальною при мінімуме перетворюючого тракту, необхідна наявність амплітудної селекції, рекомендується використання резонансних приймачів АЕ з амплітудно-частотною характеристикою близькою до лінійної та широкосмугових фільтрів для реєстрації сигналів малої амплітуди.

Список використаних джерел

1. Назарчук З.Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. К. Наукова думка, 2009. 263с.
2. Обнаружение и исследование акусто-эмиссионных эффектов при пластической деформации сталей в магнитном поле / И.И. Папилов, П.И. Стоев. *Доповіді Національній академії наук України*. 2014. №1. С. 81-89.
3. О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии / Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашева Л.И., Кушнарева У.С. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2016. №4. С.9-13.
4. Carpinteri A. Structural damage diagnosis and lifetime assessment by acoustic emission monitoring / A. Carpinteri, G. Lacedogna, N. Pugno. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. №74. P. 273-289.
5. Pollok A. Acoustic Emission Inspection. *Metals Handbook. Ninth Edition ASM International*. 1989. Vol.17. P. 278-294.
6. Информативные параметры и схемы

акустико-эмиссионного контроля / Марасанов В.В., Шарко А.В., Коберский В.В., Шарко А.А. *Проблемы информационных технологий*. 2016. №01(019). С.182-191.

7. Скальський В.Р. До проблеми автоматизації діагностування конструкцій методом акустичної емісії. *Технічна діагностика і неразрушающий контроль*. 2000. №4. С.3-9

8. Стахова А.П. Приборная система для измерения механических нагружений на основе явления акустической эмиссии Диссертация канд. техн. наук. 05.11.01 Приборы и методы для измерения механических величин. Национальный авиационный университет. Киев 2017.

9. Марасанов В.В., Шарко А.А. Визначення координат джерел за об'ємної локалізації дефектів методом акустичної емісії. *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія Комп'ютерні науки і інформаційні технології*. 2016. № 843. С.43-48.

10. Марасанов В.В., Шарко А.О. Датчик акустичної емісії. Патент на корисну модель №116757 від 12.06.2017 Бюл. №11

11. Марасанов В.В., Погребняк І.Ф., Шарко А.О. Акустичний датчик контролю фізико-механічних властивостей матеріалів. Патент на корисну модель №122797 від 25.01.2018 Бюл. №2.

12. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник под ред. Г.С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. С. 292-327.

13. Коберський В.В., Марасанов В.В., Шарко А.О. Шарко О.В. Апаратурне забезпечення обробки сигналів акустичної емісії. Патент на корисну модель №116405 від 25.05.2017 р. Бюл. №10.

14. Грешніков В.А., Дробот Ю.Б. Акустична емісія. М.: Изд-во стандартів, 1976. 68 с.

15. Иванов В.И. Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справочник М.: Издательский дом «Спектр». 2017. 368с.

16. Бардаков В.В. Елизаров С.В., Барат В.А., Терентьев Д.А., Шуманский А.Г. UNISCOPE. Расширение границ метода АЭ. Сборник материалов Всероссийской конференции «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018).

Издательство Тольятти. 2018. С.39-40.

17. Елизаров С.В., Аликритский А.Л., Трифимов П.Н., Шиманский А.Т. Буганков А.А. Обзор новых аппаратных решений в системах акустической эмиссии семейства A-Line. Сборник материалов Всероссийской конференции «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018)». Издательство Тольятти. 2018. С.10.

References

1. Nazarchuk Z.T. Akustyko-emisiine diahnostuvannia elementiv konstruktsii. Naukovo-tekhnichnii posibnyk. K. Naukova dumka 2009. 263p. [in Ukrainian]

2. Papirov I.I., Stoev P.I. Obnaruzhenie i issledovanie akusto-emissionnykh effektov pri plasticheskoy deformatsii staley v magnitnom pole. *Dopovidi Natsionalnii akademii nauk Ukrainy*. 2014. No 1. P. 81-89. [in Russian]

3. Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., Markasheva L.I., Kushnareva U.S. O raspoznavanii izmeneniy struktury materialov pri razrushenii po dannyim akusticheskoy emissii. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*. 2016. No 4. P. 9-13. [in Russian]

4. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnosis and lifetime assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. No 74. P. 273-289.

5. Pollok A. Acoustic Emission Inspection. *Metals Handbook. Ninth Edition ASM International*. 1989. Vol.17. P.278-294.

6. Marasanov V.V., Sharko A.V., Koberskiy V.V., Sharko A.A. Informativnyye parametry i shemy akustiko-emissionnogo kontrolya. *Problemy Informatsylnih tehnologiy*. 2016. No 01(019). P. 182-191. [in Russian]

7. Skalskiy V.R. Do problemy avtomatyzatsii diahnostuvannia konstruktsii metodom akustychnoi emisii. *Tekhnichna diahnostyka i nerazrushaiushchiy kontrol*. 2000. No 4. P. 3-9. [in Ukrainian]

8. Stahova A.P. Pribornaya sistema dlya izmereniya mehanicheskikh nagruzheniy na osnove yavleniya akusticheskoy emissii. Dissertatsiya kand. tehn. nauk. 05.11.01 Pribory i metody dlya

izmereniya mehanicheskikh velichin. Natsionalniy aviatsionniy universitet. Kiev 2017. [in Russian]

9. Marasanov V.V., Sharko A.A. Vyznachennia koordynat dzherel za ob'ємnoi lokalizatsii defektiv metodom akustychnoi emisii. *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika» Seriya Kompiuterni nauky i informatsiini tekhnolohii*. 2016. No 843. P.43-48. [in Ukrainian]

10. Marasanov V.V., Sharko A.O. Datchik akustichnoi emisii. patent na korysnu model No 116757. 12.06.2017 Byul. No11 [in Ukrainian]

11. Marasanov V.V., Pohrebniak I.F., Sharko A.O. Akustychnyi datchyk kontroliu fizyko-mekhanichnykh vlastyvostei materialiv. patent na korysnu model No122797 vid 25.01.2018 Biul. No2. [in Ukrainian]

12. Nerazrushayushchiy kontrol metallov i izdelyi. Spravochnik pod red. G.S. Samoylovicha. M.: Mashinostroenie, 1976. P. 292-327. [in Russian]

13. Koberskiy V.V., Marasanov V.V., Sharko A.O. Sharko O.V. Aparaturne zabezpechennia obrobky syhnaliv akustychnoi emisii. patent na korysnu model No116405 vid 25.05.2017 r. Biul. No10. [in Ukrainian]

14. Hreshnikov V.A., Drobot Yu.B. Akustychna emissiya. M.: Yzd-vo standartiv, 1976. 68 p. [in Ukrainian]

15. Ivanov V.I. Barat V.A. Akustiko-emissionnaya diagnostika: spravochnik. M.: Izdatelskiy dom «Spektr», 2017. 368p. [in Russian]

16. Bardakov V.V. Elizarov S.V., Barat V.A., Terentev D.A., Shumanskiy A.G. UNISCOPE. Rasshirenie granits metoda AE. Sbornik materialov Vserosiyskoy konferentsii «Aktualnyi problemyi metoda akusticheskoy emissii (APMAE-2018)». Izdatelstvo Tolyatti. 2018. P.39-40. [in Russian]

17. Elizarov S.V., Alikritskiy A.L., Trifimov P.N., Shimanskiy A.T. Bуганков А.А. Obzor novyih apparatnykh resheniy v sistemah akusticheskoy emissii semeystva A-Line. Sbornik materialov Vserosiyskoy konferentsii «Aktualnyi problemyi metoda akusticheskoy emissii (APMAE-2018)». Izdatelstvo Tolyatti. 2018. P.10. [in Russian]

УДК 667.64:678.02

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-35-45

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКОЙ

О. В. Паливода, Ю. А. Лебеденко

Херсонський національний технічний університет, 73008, м. Херсон Бериславське шосе, 24; e-mail: pov81@ukr.net, lebedenko@kntu.net.ua

Зазначено труднощі автоматизації управління, які пов'язані з варіабельністю вхідних параметрів і складністю математичного опису внутрішніх динамічних процесів в контрольованому об'єкті. Сформульовано і позначено особливості категоріальних понять автоматизації управління акустико-емісійної діагностикою: об'єкта управління, системи управління, функцій управління. Представлено математичний формалізм моделювання енергетичного спектра сигналів акустичної емісії. Використано дискретний і континуальний підхід до опису осциляторних властивостей внутрішньої структури матеріалу під навантаженням. Запропоновано структурну модель основних етапів управління, що включає багатовимірну вхідну інформацію діагностування, забезпечення контролепридатності виробів, інформатизацію діагностичних параметрів, безпосередні вимірювання, ідентифікацію поточного стану об'єкта. Визначено функціональні призначення системи акусто-емісійної діагностики. На підставі узагальнення відомостей про експериментальні дослідження впливу напружень при одновісьовому навантаженні і чотирихточковому вигині на параметри сигналів акустичної емісії досліджено і систематизовано дані про вплив процесів деформації на інформаційні параметри АЕ сталей і композиційних матеріалів. Встановлено області їх застосування та раціонального використання. Відзначено, що більшість експериментальних робіт у вітчизняній і зарубіжній практиці присвячено впливу на матеріал одного виду деформаційних вимірювань структури матеріалів, в той час як при експлуатації конструкцій матеріал піддається комплексному впливу складних навантажень. Розроблено алгоритм ідентифікації систем автоматичного управління акустико-емісійної діагностики, що відрізняється урахуванням різноманіття факторів, що впливають на вихідні змінні, складністю їх взаємодій і оцінок з використанням експертного оцінювання, системного аналізу та імітаційного моделювання.

Ключові слова: автоматизація, діагностика, управління, акустична емісія.

Отмечено трудности автоматизации управления, связанные с вариабельностью входных параметров и сложностью математического описания внутренних динамических процессов в контролируемом объекте. Сформулированы и обозначены особенности категориальных понятий автоматизации управления акустико-эмиссионной диагностикой: объекта управления, системы управления, функции управления. Представлены математический формализм моделирования энергетического спектра сигналов акустической эмиссии. Используются дискретный и континуальный подход к описанию осцилляторных свойств внутренней структуры материала под нагрузкой. Предложена структурная модель основных этапов управления, включая многомерную входную информацию диагностирования, обеспечение контролепригодности изделий, информатизации диагностических параметров, непосредственные измерения, идентификацию текущего состояния объекта. Определены функциональные назначения системы акусто-эмиссионной диагностики. На основании обобщения сведений об экспериментальных исследованиях влияния напряжений при одноосевой нагрузке и четырехточечном изгибе на параметры сигналов акустической эмиссии исследованы и систематизированы данные о влиянии процессов деформации на информационные параметры АЭ сталей и композиционных материалов. Установлены области их применения и рационального использования. Отмечено, что большинство экспериментальных работ в отечественной и зарубежной практике посвящено воздействию на материал одного вида деформационных измерений структуры материалов, в то время как при эксплуатации конструкций материал подвергается комплексному воздействию сложных нагрузок. Разработан алгоритм идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностики, отличающийся учетом многообразия факторов, влияющих на выходные переменные, сложностью их взаимодействий и оценок с использованием экспертной оценки, системного анализа и имитационного моделирования.

Ключевые слова: автоматизация, диагностика, управление, акустическая эмиссия.

The difficulties of automation control, which are connected with variability of input parameters and complexity of mathematical description of internal dynamic processes in the controlled object, are noted. The features of categorical concepts of automation of control of acoustic-emission diagnostics control are formulated and marked: control object, control system, control functions. The mathematical formalism of modeling the energy spectrum of acoustic emission signals is presented. A discrete and continuous approach to describing the oscillatory properties of the internal structure of a material under load is used. The structural model of the basic stages of management is offered, which includes multidimensional input of diagnostics information, ensuring the controllability of products, informatization of diagnostic parameters, direct measurements, identification of the current state of the object. Functional purposes of the acoustic emission diagnostics system have been determined. On the basis of generalization of information on experimental studies of the effect of stresses under uniaxial loading and four-point bending on the parameters of acoustic emission signals, data on the influence of deformation processes on the information parameters of AE steels and composite materials were investigated and systematized. Areas of their application and rational use are established. It is noted that most of the experimental works in domestic and foreign practice are devoted to the influence on the material of one type of deformation measurements of the structure of materials, while during the operation of structures the material is subjected to a complex effect of complex loads. An algorithm for identification of systems for automatic control of acoustic emission diagnostics has been developed, which differs taking into account the variety of factors affecting the initial variables, the complexity of their interactions and estimates using expert evaluation, system analysis and simulation modeling.

Keywords: automation, diagnostics, control, acoustic emission.

Вступ. Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации волн напряжений при изменениях структуры материалов, является в настоящее время наиболее перспективным средством мониторинга ответственных производственных объектов.

Управление системой акустико-эмиссионной диагностики определяется путем поиска новых информативных параметров и разработки методических приемов изучения явления акустической эмиссии. Оценка качества объектов контроля производится путем выявления в материале акустически активных зон или локальных групп АЭ – источников с высокой степенью их опасности.

Наиболее сложным моментом изучения изменений структуры материалов под нагрузкой является идентификация акустических сигналов и определение механических свойств материалов в источнике инициирования АЭ. Тесная связь между процессами разрушения и наличием АЭ позволяет при помощи регистрации АЭ сигналов определять степень приближения состояния материала к разрушению. Решение этих задач на современном этапе развития средств технической диагностики требует обязательного использования информационных технологий, компьютерных программ и интеллектуальных ресурсов.

Анализ современных зарубежных и отечественных публикации по обозначенной проблеме обнаруживает постоянный интерес к автоматизации систем акустико-эмиссионной диагностики конструкций. Вопросы автоматизации управления потенциально опасных объектов, работающих под влиянием изменяющихся условий эксплуатации, отражены в работах [1-4]. Создание методологических основ автоматизации и алгоритмов функционирования систем управления отражено в работах [5-7], исследование и закономерностей повышения эффективности систем технической диагностики отражено в работах [8-10]. Методы и методики, используемые большинством авторов, имеют ряд ограничений, так как предназначены для решения частных вопросов автоматизации и не учитывают большого разнообразия параметров и условий, которые имеют место при эксплуатации оборудования. Неопределённость и неточность в определении условий эксплуатации резко усложняет возможности автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой.

К нерешенным задачам общей проблемы идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностики относятся построение структурной модели этапов управления и алгоритма ее функционирования с учетом сложных взаимосвязей между информационными параметрами.

Целью работы является выявление особенностей автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой сложных производственных объектов.

Изложение основного материала.

Трудность автоматизации управления акустико-эмиссионной диагностикой определяется большим многообразием задач и определяющих признаков. Наиболее очевидной интерпретацией категориальных понятий автоматизации управления акустико-эмиссионной диагностикой является объект управления, включающий структурные модели, методики идентификации, программное и математическое обеспечение и система управления которая осуществляет непосредственное измерение, прогнозирование, экстраполяцию, поддержку принятия решений и распознавание полезных сигналов на фоне шумов.

В функции управляющей системы входят идентификация состояния объекта управления, разработка методологических принципов сбора и обработки информации, реализация аппаратного и программного обеспечения. Применительно к автоматизированному управлению акустико-эмиссионной диагностикой в эти функции входят дополнительно – выделение полезного сигнала на фоне шумов при нагружении производственных объектов и распознавание образов дефектной структуры материала.

Автоматизированная система управления традиционно базируется на принципах сохранения неизменными известных параметров

$$L = \frac{1}{2} \sum m_j \dot{w}^2(n, j) - \frac{1}{2} \sum w(n, j) \Phi(n - n', j, j') w(n', j') + \sum f(n, j) w(n, j). \quad (2)$$

где n – номер ячейки, $m_j (j = 1, 2)$ – масса частиц в ячейке, $w(n, j)$ – смещение частиц j в ячейке n , $\Phi(n - n', j, j')$ – силовые константы, $f(n, j)$ – внешняя сила, которая определяет возникновение вибрационных сигналов.

Физический смысл модели, становится ясным, если перейти к новым переменным:

- смещение центра масс ячейки:

$$u(n) = \frac{1}{m} [m_1 \omega(n, 1) + m_2 \omega(n, 2)], \quad (3)$$

- относительное смещение частиц в ячейке:

динамических процессов и взаимодействий между ними, что отражается в математических моделях и соответствующих коэффициентах. При высокой стабильности и незначительной интенсивности динамических процессов управление ограничивается линейным приближением. Однако, при автоматизированном управлении акустико-эмиссионной диагностической системой приходится сталкиваться с вариабельностью входных параметров. Причины возникновения источников АЭ аналитически представляются в виде дискретных моделей изменений микроструктуры материала под нагрузкой и континуальных моделей распространения акустических волн [11].

Моделирование энергетического спектра АЭ сложной структуры предполагает выделение в массиве контролируемой среды структурной ячейки, отображающей основные черты поведения материала. Каждая частица имеет три степени свободы: смещение центра масс частицы по осям x и y и ее поворот.

В [12] выражение для потенциальной энергии приходящейся на одну ячейку, имеет вид:

$$U_n = \frac{1}{2} (K_1 \Delta u_n^2 + K_2 \Delta w_n^2 + K_3 l^2 \Delta \varphi_n^2) \quad (1)$$

где u_n, w_n – трансляционные степени свободы, φ_n – ротационная степень свободы.

В [13] показано что уравнения движения ячейки являются уравнениями Эйлера для уравнения лагранжиана

$$\eta(n) = \frac{m_1 \xi_1 \omega(n, 1) + m_2 \xi_2 \omega(n, 2)}{I}, \quad (4)$$

где m_1 и m_2 – массы атомов в ячейке, I – момент инерции ячейки, а ξ_1 и ξ_2 – координаты частиц в ячейке относительно координаты центра масс.

Обозначив через $q(n)$ и $\mu(n)$ обобщенные силы, соответствующие $u(n)$ и $\eta(n)$, имеем уравнения движения всей ячейки в среде, инициирующей распространение акустического сигнала:

$$m\ddot{u}(n) + \sum_{n'} \Phi^{00}(n-n')u(n') + \sum_{n'} \Phi^{01}(n-n')\eta(n') = q(n) \quad (5)$$

$$I\ddot{\eta}(n) + \sum_{n'} \Phi^{10}(n-n')u(n') + \sum_{n'} \Phi^{11}(n-n')\eta(n') = \mu(n) \quad (6)$$

В случае, когда радиус дальности действия упругих волн много больше размеров ячейки, можно перейти от дискретной к континуальной модели.

Сложность математического описания и анализа внутренних динамических процессов в эксплуатируемом объекте определяет проблему развития технической диагностики. Практически это проявляется в разнообразии входных параметров АЭ, соответствующих разным типам деформации под нагрузкой и их оптимизации, исходя из информативности параметров для каждого вида нагружения, дискретностью или непрерывностью АЭ сигналов. Поэтому автоматизированные системы управления, принцип действия которых основан на поддержании постоянства параметров управления, оказываются малоэффективными для управления сложными акустико-эмиссионными системами с активными детерминированными входными сигналами.

Моделирование сложных систем на основе взаимодействий с комплексом диагностических параметров, необходимо для познания структуры и свойств контролируемых объектов и разработки управляющих воздействий на соответствие нормативным значениям, определения остаточного ресурса и норм допустимых дефектов.

Большое разнообразие измеряемых параметров АЭ усложняет выбор наиболее информативных из них, поэтому представляется целесообразным провести обобщение и систематизацию сведений о влиянии процессов деформации на информационные параметры материалов под нагрузкой.

В таблице 1 представлена систематизация пригодности информационных параметров АЭ при одноосном нагружении и изгибе, составленная на основе обобщения экспериментальных данных с указанием причин неоднозначности их использования.

Таблица 1 – Информационные параметры АЭ при различных видах нагружения

Информационные параметры АЭ	Виды нагружения		
	Одноосное растяжение	Четырехточечный изгиб	
	сталь [14-18]	сталь [19,20]	композит [21,22]
Общее число импульсов	рекомендуется	нет сведений	нет сведений
Интенсивность импульсов	рекомендуется	нет сведений	нет сведений
Пиковая амплитуда	нет сведений	рекомендуется	рекомендуется
Плотность АЭ сигнала	нет сведений	качественные оценки	нет сведений
Амплитудно-временное распределение	затруднения в идентификации	неоднозначность результатов	нет сведений
Амплитудно-частотное распределение	нет зависимости от времени	нечеткость зависимости от нагрузки	наличие значительных осцилляций для узкополосных АЭ датчиков
Энергетический спектр	нет сведений	рекомендуется	затруднения в идентификации для широкополосных АЭ датчиков

Как следует из таблицы 1, при ее рассмотрении наблюдается неоднозначность приоритетов использования характеристик

материалов в различных видах силового воздействия. Следует отметить, что большинство работ, касающихся воздействия на

материал с фиксацией сигналов АЭ, посвящено одному виду деформационных изменений структуры, в то время как при эксплуатации конструкции материал подвергается воздействию знакопеременных, тепловых, радиационных и других сложных нагрузок. Отмеченные аспекты диагностирования требуют использования новой методологии, основанной на комплексном применении характеристик АЭ сигналов со всеми присущими особенностями.

В основу методологии автоматизированного управления акустико-эмиссионной диагностикой должна быть положена формализация управленческих решений представленная в виде процедур, обладающих внутренней организацией структурой и иерархией. Процедура управления считается формализованной, если определена и однозначно представлена последовательность элементарных актов ее реализации. Формализация управленческих решений предполагает возможность многократного повторения операций для некоторого множества исходных данных.

Предлагается создание специальной структуризации блоков построения основных этапов управления акустико-эмиссионной диагностикой (рис.1).

На первом этапе модели управления акустико-эмиссионной диагностикой формируется набор возможных характеристик, связанных с изменением прочностных свойств материалов. Учитываются силовые воздействия на материал, связанные с изменением условий эксплуатации, диапазон их отклонений от технических условий, сведения о возможных структурных превращениях и причинно-следственные связи с диагностическими параметрами. Все это определяет входную информацию диагностирования.

На втором этапе модели производится анализ и конкретизация объектов контроля, выбор из всего множества элементов оборудования эксплуатируемого в условиях нагружения наиболее опасного с точки зрения влияния на функционирование всей системы в целом. Определяются условия контроля, места для установки датчиков, качество контролируемой поверхности, доступ к

измерениям. Это определяет контролепригодность продукции.

На третьем этапе определяются информативные признаки АЭ диагностики, устанавливаются диагностические параметры сигналов АЭ, пороги выявления дефектов, согласуются нормы допустимых дефектов.

На следующем этапе выполняется непосредственное измерение диагностических параметров органолептическими методами, с использованием органов чувств, инструментальными методами с замерами отклонений геометрических параметров, активных методов неразрушающего контроля, связанных с возбуждением и регистрацией тепловых, магнитных, ультразвуковых полей, рентгеновских и проникающих излучений и пассивных методов АЭ диагностики.

Далее производится оценка текущего состояния конструкции, включающая оценку степени опасности выявленного дефекта, определение уровня его развития, принятие заключения о результатах комплексных испытаний, определение остаточного ресурса.

Последний этап структурной модели основных этапов управления акустико-эмиссионной диагностикой посвящается определению функциональных назначений АЭ диагностики в решении конкретных производственных задач выявления дефектов, непрерывном наблюдении и контроле, диагностике состояний, периодическому наблюдению и диагностированию.

Диагностика дефектности затруднена необходимостью обработки и идентификации больших потоков акустических импульсов в том числе помех.

В настоящее время наметилось две группы идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой:

– автоматизация измерений, заключающаяся в регистрации волновой формы АЭ сигналов и вычислении большого числа ее параметров;

– автоматизация обработки результатов измерений, заключающаяся в аппаратных обработках АЭ сигналов, методиках моделирования и идентификации.

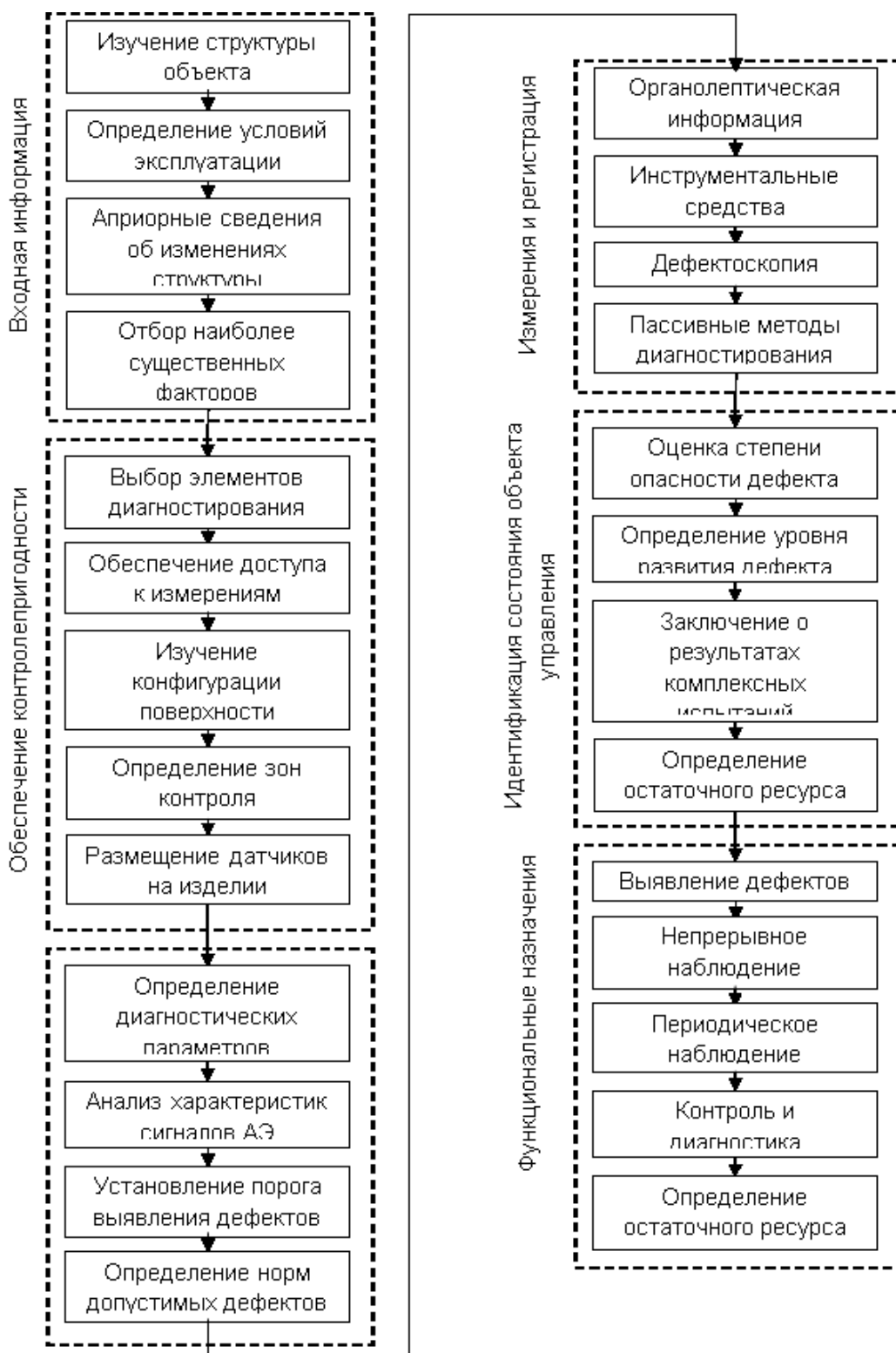


Рисунок 1 – Структурная модель основных этапов управления акустико-эмиссионной диагностикой

В состав перспективных систем управления, которые обеспечивают устойчивое управление акустико-эмиссионной диагностикой, должны

входить подсистемы идентификации и прогнозирования структурных состояний материала в объекте управления. Такие системы разрабатывают, используя методы искусственного интеллекта, методы поддержки решений и теорию информации.

Прогнозирование изменений структурных состояний материала в дефектных зонах наблюдений базируется на основе существующей априорной информации и выборе соответствующей модели долгосрочного либо краткосрочного прогнозирования. Если интервал прогнозирования небольшой рассматривается физическая модель изменений структуры материала при силовых воздействиях. Если же интервал прогнозирования значительный к используемой физической модели структуры следует добавить вероятностные оценки возможных изменений эксплуатационных факторов.

Конкретные алгоритмы функционирования системы управления создаются с учетом прогнозов результатов влияния различных трудно учитываемых факторов на выходные параметры системы. Многообразие факторов, влияющих на выходные параметры системы управления и сложные взаимосвязи между информационными параметрами АЭ, послужили обоснованием создания специального алгоритма идентификации систем автоматического управления акустико-эмиссионной диагностикой (рис.2).

Алгоритм основан на декомпозиции целевой функции на ряд локальных целей, этапов их достижения, выборе акустических характеристик, чувствительных к процессам деградации структуры исследуемых материалов, их измерению и оценкам с использованием экспертных заключений, системного анализа и имитационного моделирования. Разработанный алгоритм может быть использован при создании АЭ аппаратуры и программного обеспечения.

Автоматизация управления технической диагностикой позволяет существенно повысить надежность и безотказность работы оборудования за счет выполнения требований к качеству диагностирования, стабильности и воспроизводимости результатов. Это может быть достигнуто лишь при одновременном использовании методов дефектации, основанных на измерениях отклонений контролируемых параметров от нормативных значений и методов неразрушающего контроля, включающих кроме измерений физических характеристик так же и выборочные разрывные испытания. Обработка результатов таких комплексных измерений с выдачей практических рекомендаций по корректировке условий эксплуатации и определению остаточного ресурса оборудования составляет сущность автоматизированного управления акустико-эмиссионной диагностики.

Выводы

Доказана возможность идентификации источника АЭ и стадий деградации структуры материала на основе анализа информационных параметров АЭ при различных стадиях нагружения. Обоснован выбор параметров сигналов АЭ, который используется для принятия решающих правил АЭ диагностики.

Усовершенствована идентификация процедуры определения источника АЭ, которая достигается за счет переноса основной части обработки информации из аппаратурной части АЭ системы в область методологического и программного обеспечения.

Существенное повышение точности результатов определения дефектной структуры при сложных видах деформации обеспечивается измерением нескольких разнородных информационных параметров сигналов АЭ с использованием многоуровневого алгоритма управления.

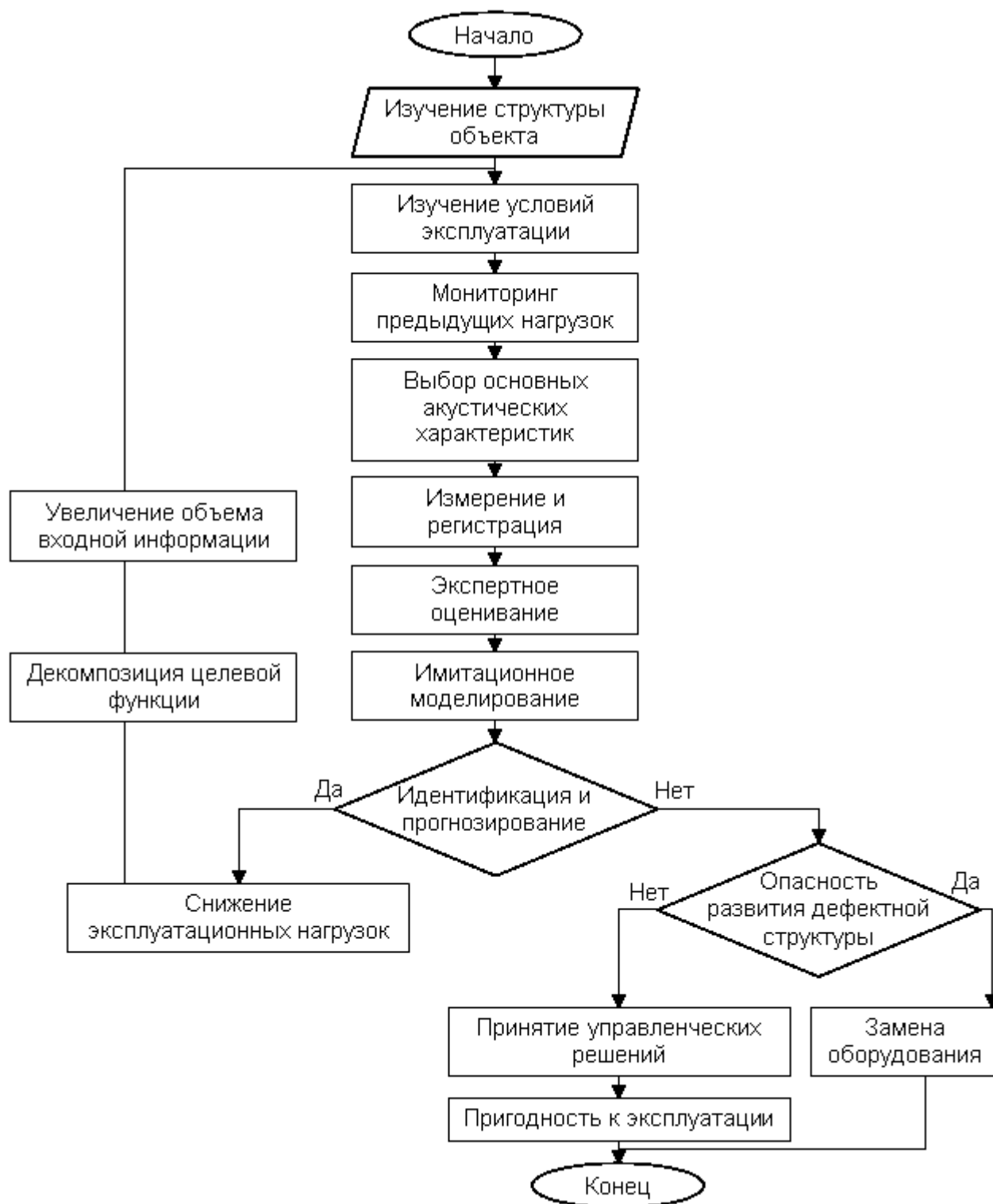


Рисунок 2 – Алгоритм идентификации системы автоматического управления акустико-эмиссионной диагностики

Дальнейшее повышение точности и достоверности диагностики может быть достигнуто рациональным использованием совокупности активных и пассивных методов неразрушающего контроля, выборочных разрывных испытаний, спектрального и металлографического анализа, рентгеновской и электронной микроскопии.

Список використаних джерел

1. Прахова М.Ю., Хорошавина Е.А., Краснов А.Н., Емец С.В. Система автоматизации в нефтяной промышленности. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 304 с.
2. Омаров К.А., Столстовских И.Н., Кольга А.Д. Автоматизация проектирования систем контроля и технической диагностики конвейерных линий. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2012. №2. С. 67-74.
3. Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Проблемы диагностирования автотранспортных средств и пути их решения. *Вестник Белорус-Росс ун-та*. 2007. №1. С. 57-66.
4. Рынкевич С.А. Автоматизация управления и диагностирование гидромеханических передач. *Вестник Белорус-Росс ун-та*. 2009. №1(22). С. 22-29.
5. Баданина В.Л. Алгоритмы автоматизированного формирования детализированных программ диагностических обследований технического состояния паровых котлов теплоэлектростанций. *Вестник Южно-Уральского университета*. 2015. Т.15. №1. С. 113-116.
6. Яковлев А.В., Соснин В.А. Цифровая обработка акустических импульсов в системе акустико-эмиссионной диагностики КАЭМС. *Техническая акустика*. 2018. №3. С.12-18.
7. Дубов А.В. Автоматизация технического диагностирования аналоговых устройств. *Молодой ученый*. 2010. №5(16). С. 18-22.
8. Кузьмин А.Э. Автоматизация диагностики инженерно-технического состояния потенциально опасных объектов на основе комплексирования методов и средств неразрушающего контроля. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных*

ситуаций. 2012. №2. С.57-62.

9. Литвиненко В.И., Лур'є І.А., Боскин О.О. Автоматизация процесів управління акустико-емісійними діагностичними системами *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2020. №1.

10. Sharko A. Models and methods of processing of information of loads of acoustic signals in technical diagnostic systems. *Informatyka, Automatyka, Pomiar*. Politechnika Lubelska, Lublin Polska IAPGOS. 2018. No 3. P. 15-18.

11. Кунин И.А. Теория упругих сред с микроструктурой. Нелокальная теория упругости. М.: Наука, 1982. 424с.

12. Лисина С.А. Континуальные и структурно-феноменологические модели в механике сред с микроструктурой. Автореф. дис. канд. физ-мат. наук. Нижний Новгород, 2009. 20 с.

13. Marasanov V., Sharko A. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals. V. Marasanov. *International Fronter Science Letters*. 2016. Vol.10. P. 37-44

14. Surace C., Bovsunovsky A. The use of frequency ratios to diagnose structural damage in varying environmental conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. No 106523/ P. 136.

15. Kumar J., Sarmah R., Ananthakrishna G. General framework for acoustic emission during plastic deformation. *Physical Review*. 2015. Vol. 92. P.1441.

16. Папилов И.И., Стоев П.И. Обнаружение и исследование акусто-эмиссионных эффектов при пластической деформации сталей в магнитном поле. *Доповіді Національній академії наук України*. 2014. №1. С. 81-89.

17. Недосека А.Я., Недосека С.А., Маркашева Л.И., Кушнарева У.С., О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2016. №4. С.9-13.

18. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnostic and lifetime assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. №74. P. 273-289.

19. Liu S, Li X, Li Z, Chen P., Yang X., Liu Y., Meas J. Energy distribution and fractal characterization of acoustic emission (AE) during coal deformation and fracturing. *Int Meas Confederation*. 2019.No 136. P.122-131.

20. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А., Степанчиков Д.М., Юренин К.Ю. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2019. №1. С. 32-39.

21. Алексенко В.Л., Шарко А.А., Сметанкин С.А., Степанчиков Д.М., Юренин К.Ю. Применение акустико-эмиссионных и тензометрических измерений к процессам диагностики деформационного упрочнения композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы. *Техн. диагностика и неразрушающий. Контроль*. 2019. №3. С.49-54.

22. Mi, Y., Chen, Z., Wu, D. Acoustic Emission Study of Effect of Fiber Weaving on Properties of Composite Materials IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2018-October, art. no. 8579807(2018)

References

1. Prahova M.Yu., Horoshavina E.A., Krasnov A.N., Emets S.V. Sistema avtomatizatsii v neftyanoy promyshlennosti. M.: Infra-Inzheneriya, 2019. 304 p. [in Russian]

2. Omarov K.A., Stolstovskih I.N., Kolga A.D. Avtomatizatsiya proektirovaniya sistem kontrolya i tehnikeskoy diagnostiki konveyernykh liniy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2012. No 2. P. 67-74. [in Russian]

3. Tarasik V.P., Rynkevich S.A. Problemy diagnostirovaniya avtotransportnykh sredstv i puti ih resheniya. *Vestnik Belorus-Ross universiteta*. 2007. No 1. P. 57-66. [in Russian]

4. Rynkevich S.A. Avtomatizatsiya upravleniya i diagnostirovanie gidromekhanicheskikh peredach. *Vestnik Belorus-Ross universiteta*. 2009. No1(22). P. 22-29. [in Russian]

5. Badanina V.L. Algoritmy avtomatizirovannogo formirovaniya detalizirovannykh programm diagnosticheskikh obsledovaniy tehnikeskogo sostoyaniya parovykh kotlov teploelektrostantsiy. *Vestnik Yuzhno-*

Uralskogo universiteta. 2015. Vol.15. No1. P. 113-116. [in Russian]

6. Yakovlev A.V., Sosnin V.A. Tsifrovaya obrabotka akusticheskikh impulsov v sisteme akustiko-emissionnoy diagnostiki KAEMS. *Tekhnicheskaya akustika*. 2018. No3. P.12-18. [in Russian]

7. Dubov A.V. Avtomatizatsiya tehnikeskogo diagnostirovaniya analogovykh ustroystv. *Molodoy ucheniy*. 2010. No 5(16). P. 18-22. [in Russian]

8. Kuzmin A.E. Avtomatizatsiya diagnostiki inzhenerno-tehnikeskogo sostoyaniya potentsialno opasnykh ob'ektov na osnove kompleksirovaniya metodov i sredstv nerazrushayushego kontrolya. *Sovremennyye tehnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvyichaynykh situatsiy*. 2012. No2. P.57-62. [in Russian]

9. Lytvynenko V.I., Lurie I.A., Boskyn O.O. Avtomatizatsiya protsesiv upravlinnia akustiko-emissionnykh diaagnostichnykh systemamy *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2020. No1. [in Russian]

10. Sharko A. Models and methods of processing of information of loads of acoustic signals in technical diagnostic systems. *Informatyka, Avtomatika, Pomiry*. Politechnika Lubelska, Lublin Polska IAPGOS. 2018. No 3. P. 15-18.

11. Kunin I.A. Teoriya uprugih sred s mikrostrukturoy. Nelokalnaya teoriya uprugosti. M.: Nauka, 1982. 424p. [in Russian]

12. Lisina S.A. Kontinualnyie i strukturno-fenomenologicheskie modeli v mehanike sred s mikrostrukturoy. Avtoref. dis. kand. fiz-mat. nauk. Nizhniy Novgorod, 2009. 20 p. [in Russian]

13. Marasanov V., Sharko A. Mathematical Models for Interrelation of Characteristics of the Developing Defects with Parameters of Acoustic Emission Signals. V. Marasanov. *International Frontier Science Letters*. 2016. Vol.10. P. 37-44.

14. Surace C., Bovsunovsky A. The use of frequency ratios to diagnose structural damage in varying environmental conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. No 106523. P. 136.

15. Kumar J., Sarmah R., Ananthakrishna G. General framework for acoustic emission during plastic deformation. *Physical Review*. 2015. Vol. 92. P.1441.

16. Papirov I.I., Stoev P.I. Obnaruzhenie i issledovanie akusto-emissionnyh effektov pri plasticheskoy deformatsii staley v magnitnom pole. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2014. No 1. P. 81-89. [in Russian]
17. Nedoseka A.Ya., Nedoseka S.A., Markasheva L.I., Kushnareva U.S., O raspoznavanii izmeneniy struktury materialov pri razrushenii po dannyim akusticheskoy emissii. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2016. No 4. P.9-13. [in Russian]
18. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnostic and lifetime assessment by acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007. No74. P. 273-289.
19. Liu S, Li X, Li Z, Chen P., Yang X., Liu Y., Meas J. Energy distribution and fractal characterization of acoustic emission (AE) during coal deformation and fracturing. *Int Meas Confederation*. 2019.No 136. P.122-131.
20. Aleksenko V.L., Sharko A.A., Smetankin S.A., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Identifiatsiya strukturnykh osobennostey mekhanizmov deformirovaniya pri izgibe metodom akusticheskoy emissii. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayuschiy kontrol*. 2019. No1. P. 32-39. [in Russian]
21. Aleksenko V.L., Sharko A.A., Smetankin S.A., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Primenenie akustiko-emissionnykh i tenzometricheskikh izmereniy k protsessam diagnostiki deformatsionnogo uprochneniya kompozitsionnykh materialov na osnove epoksidnoy matritsyi. *Tekhn. diagnostika i nerazrushayuschiy. Kontrol*. 2019. No 3. P. 49-54. [in Russian]
22. Mi Y., Chen Z., Wu D. Acoustic Emission Study of Effect of Fiber Weaving on Properties of Composite Materials IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2018-October, art. no. 8579807

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 622.673.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-46-53

ДОСВІД РОЗРАХУНКУ, РОЗРОБКИ І ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕНЗОДАВАЧА

В. В. Лопатін

*Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук
України; 49005, м Дніпро, вул. Сімферопольська 2а, тел. (0562) 46-01-51, факс (0562) 46-
24-26; e-mail: nanu@igtm.dp.ua*

У гірничій галузі часто виникає необхідність в безпосередньому вимірюванні зусиль з істотними обмеженнями до давачів, тому використання номенклатури існуючих давачів неможливо. Крім того давач зусилля і навантаження, який призначений для експлуатації у важких гірських умовах повинен володіти: з розширеним діапазоном робочих температур, ступенем захисту IP67, вологостійкістю в агресивному середовищі і конструктивно виконаний так, щоб не порушувати вимоги безпеки в гірських виробках. Дослідженнями були визначені функціональні обмеження давача зусиль для гірничої виробки - максимальна деформація, мінімальні габаритні розміри і максимальні напруги. Визначальними при виборі конструкції давача були точна фіксація, надійність, адаптивність до гірських технологічних процесів із забезпеченням безпеки і відповідності умовам експлуатації, і прийнятна вартість. За вимогами, галузевих стандартів України (СОУ) були обрані геометричні розміри давача з метою знаходження оптимального рішення. На основі цієї інформації за допомогою багатопараметричного підходу отримано безліч Парето-допустимих рішень. На безлічі паретооптимальних рішень був обраний варіант давача, для якого після застосування вищевикладеного підходу вдалося знизити нелінійність і зменшити площу між кривими прямого і зворотного ходу, а також отримати близьку до знайденого значенням деформацію в зоні наклепки. На основі дослідної партії виготовлених давачів було виконано їх доведення в умовах реальної гірничої виробки. Розроблений датчик типу 4201 ДСТ-10 відповідає умовам безпеки ПБ ТБ в гірничій виробці і забезпечує більш високу метрологічну точність, ніж аналогічні давачі, розроблені іншими авторами. У 4201 ДСТ-10 використані методи багатокритеріальної оптимізації при проектуванні пружних елементів датчика зусиль на навантаження 10 тонн. Допускається можливість його застосування в аналогічних жорстких умовах експлуатації на інших об'єктах.

Ключові слова: гірнича виробка, тензорезисторний давач, гістерезис, пружний елемент, багатокритеріальна оптимізація, безліч Парето, нелінійне деформування.

В горной отрасли часто возникает необходимость непосредственного измерения усилий с существенными ограничениями к датчикам, поэтому использование номенклатуры существующих датчиков невозможно. Кроме того, датчик усилия и нагрузки, который предназначен для эксплуатации в тяжелых горных условиях, должен обладать: с расширенным диапазоном рабочих температур, степенью защиты IP67, влагостойкостью в агрессивной среде и конструктивно не нарушать требования безопасности в горных выработках. Исследованиями были определены функциональные ограничения датчика усилий для горной выработки - максимальная деформация, габаритные размеры и максимальные напряжения. Определяющими при выборе конструкции датчика были точная фиксация, надежность, адаптивность к горным технологическим процессам с обеспечением безопасности и соответствия условиям эксплуатации, и приемлемая стоимость. По требованиям, отраслевых стандартов Украины (СОУ) были выбраны геометрические размеры датчика с целью нахождения оптимального решения. На основе этой информации с помощью многопараметрического подхода получено множество Парето допустимых решений. На основе множества паретооптимальных решений был выбран вариант датчика, для которого после применения вышеизложенного подхода удалось снизить нелинейность и уменьшить площадь между кривыми прямого и обратного хода, а также получить близкую к найденному значению деформации в зоне наклепки. На основе

опытной партии изготовленных датчиков была выполнена их доводка в условиях реальной горной выработки. Разработанный датчик типа 4201 ДСТ-10 отвечает условиям безопасности ПБ ТБ в горной выработке и обеспечивает более высокую метрологическую точность, чем аналогичные датчики, разработанные другими авторами. В 4201 ДСТ-10 использованы методы многокритериальной оптимизации при проектировании упругих элементов датчика усилий на нагрузку 10 тонн. Допускается возможность его применения в аналогичных жестких условиях эксплуатации на других объектах.

Ключевые слова: горная выработка, тензорезисторный датчик, гистерезис, упругий элемент, многокритериальная оптимизация, множество Парето, нелинейное деформирование.

In the mining industry, it is often necessary to directly measure forces with significant restrictions on the sensors, so the use of the range of existing sensors is not possible. In addition, the force and load sensor, which is designed for operation in severe mountain conditions, must be: with an extended range of operating temperatures, degree of protection IP67, moisture resistant in an aggressive environment and structurally designed so as not to violate safety requirements in mine workings. Studies have identified the functional limitations of the force sensor for mining - maximum deformation, overall dimensions and maximum stresses. The decisive factors in choosing a sensor design were precise fixation, reliability, adaptability to mining technological processes with safety and compliance with operating conditions, and reasonable cost. According to the requirements of industry standards of Ukraine, the geometric dimensions of the sensor were chosen in order to find the optimal solution. Based on this information, using a multi-parameter approach, many Pareto valid solutions are obtained. Based on many Pareto optimal solutions, a sensor variant was chosen for which, after applying the above approach, it was possible to reduce non-linearity and reduce the area between the forward and backward curves, as well as to get close to the found strain value in the sticker area. On the basis of an experimental batch of manufactured sensors, their refinement was performed in real mining. The developed sensor type 4201 DST-10 meets the safety requirements of the safety control system in mining and provides higher metrological accuracy than similar sensors developed by other authors. In 4201 DST-10, multicriteria optimization methods were used in designing the elastic elements of the force sensor for a load of 10 tons. The possibility of its use in similar harsh operating conditions at other facilities is allowed.

Keywords: mining, strain gauge sensor, hysteresis, elastic element, multicriteria optimization, Pareto set, nonlinear deformation.

Формулювання проблеми

У гірничій виробці часто виникає необхідність безпосереднього вимірювання зусиль з істотними обмеженнями що до давача, тому використання номенклатури існуючих давачів не можливе. Для відмірювання зусиль необхідний електричний перетворювач – давач. В даний час домінують тензорезисторні давачі зусиль з фольговими тензорезисторами, які наклеюються і сприймають деформацію пружного елемента в місці наклейки.

Його переваги:

- взаємозамінність;
- зручний діапазон виміру, який визначається середнім рівнем напруги пружинних сталей в діапазоні $0 \div 3.0 \times 10^8$ Па, при якому гарантовані лінійно-пружні властивості;
- великий вибір різноманітності пружних елементів дозволяє знайти раціональний елемент для розв'язуваної задачі.

Як відомо, тензометричний давач - наукомісткий виріб, створення якого проблематичним без раціонального вибору

конструкції пружного елемента, ревнового проведеного розрахунку і вивіреного науково-обґрунтованого доведення. Найвідповідальнішою ланкою тензометричного давача є пружний елемент. З точки зору автора, основні проблеми давача пов'язані з забезпеченням метрологічних характеристик стосовно залежності між деформацією пружного елемента і величиною навантаження. В ході виконаного дослідження було виявлено, що відмінність робочої характеристики давача від лінійної виникає з причини, пов'язаної зі зміною форми пружного елемента в процесі деформування, що оцінюється за формулою $\epsilon = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_{\max}} \times 100\%$, а також пов'язана з температурною похибкою робочого коефіцієнту передачі, неспівпадання характеристики при навантаженні - «петлі гистерезису».

Гістерезис буває двох видів: фізичний - через недосконалість пружних властивостей матеріалу виготовлення і конструктивний, що виникає внаслідок наявності тертя і розсіювання енергії між частинами конструкції пружного

елементу. Величина гістерезису оцінюється різницею показань при прямому і зворотному ході.

Як відомо, тензометричні давачі - основний первинний пристрій перетворення фізичної величини в нормований електричний сигнал. У нашому випадку це давач зусилля і навантаження, який призначений для експлуатації у важких гірничих умовах: з розширеним діапазоном робочих температур, ступенем захисту IP67, вологостійкий в агресивному середовищі і конструктивно виконаний так щоб не порушувати вимоги безпеки в гірничих виробках. Визначальними при виборі конструкції датчика були точна фіксація, надійність, адаптивність до гірничих технологічних процесів з забезпеченням безпеки і відповідності умовам експлуатації, та прийнятна вартість.

Виклад основного матеріалу і результати дослідження.

Були визначені функціональні обмеження давача зусиль для гірничої виробки - це параметри, які служать обмеженнями при створенні давачі. До них належать: максимальна деформація, габаритні розміри та максимальні напруги. Варіювачі обмеженими параметрами, ми отримали безліч допустимих рішень, які відповідають всім зазначеним обмеженням. За вимогами, галузевих стандартів України (СОУ) були обрані геометричні розміри давача з метою знаходження оптимального рішення. На основі цієї інформації за допомогою багатопараметричного підходу було сформульоване остаточне рішення. Багатопараметричний підхід полягав у отриманні множені Парето допустимих рішень [1-4], і на основі аналізу, за допомогою експертної думки визначено найкращого результату. Тому, що, як відомо множену Парето можна визначити як множену, в якій значення будь-якого з критеріїв якості можна поліпшити тільки за рахунок погіршення інших критеріїв якості - будь-яке з рішень, яке належить множені Парето, не може бути покращено одночасно по всім приватним критеріям. На основі множені паретооптимальних рішень був обраний варіант датчика, для якого після застосування вищевикладеного підходу вдалося знизити нелінійність і зменшити площу між кривими

прямого і зворотного ходу, а також отримати близьке до знайденого значення деформації в зоні наклепки.

Автором спільно з представником підприємства "Метриком" Є.С. Сідаш були розроблені технічні умови на тензометричний давач для роботи в гірничій виробці.

Технічні умови давача

- верхня межа вимірювання 100 кН;
- перевантажувальна здатність допустима по метрології 120;
- допустима по міцності 200;
- коефіцієнт передачі не менше мВ/В $0,8 \pm 2\%$;
- чутливість Н 200;
- похибка 0,2%;
- компенсований діапазон температур $^{\circ}\text{C}$ від +10 до +50;
- робочий діапазон температур $^{\circ}\text{C}$ від - 20 до +70;
- електричний опір, Ом:
 - вхідний 380 ± 2 ;
 - вихідний 400 ± 4 ;
- максимальна допустима напруга
- живлення, В 12;
- довжина кабелю давача, м 0,5;
- габаритні розміри в зборці, мм:
 - діаметр до 90;
 - висота до 22.

Обраний мембранний пружний елемент давача є деталь, що виготовляється з цільного шматка металу з наступною механічною обробкою для формування контуру перетину, що забезпечує потрібний напружено-деформований стан пружного елемента (рис. 7). З теорії відомо, що в центрі рівномірно навантаженої мембрани радіальні і тангенціальні напруги рівні за величиною. У міру віддалення від центру мембрани напруги зменшуються, доходячи до нуля, а потім, змінивши знак, збільшуються до максимуму. Виходячи з цього, ми наклеювали тензорезистори по краю мембрани, орієнтуючи в радіальному, а не тангенціальному напрямку. Орієнтовно характеристика перетворення давача може бути визначена з формули, наведеної в роботах [5-9]:

$$f = \frac{(3 - \mu)^2 \cdot p \cdot D^4}{E \cdot h^2},$$

де p - вимірюваний тиск; D - діаметр мембрани; h - товщина мембрани; μ - коефіцієнт Пуассона; E - модуль пружності матеріалу мембрани.

Для виготовлення мембрани нами дослідним шляхом використовувалися різні сплави з границею текучості понад 900 МПа.

В результаті спільної роботи з "Метриком" був створений давач типу 4201 ДСТ-10 [10]. Цей давач відповідає умовам безпеки ПБ ТБ в гірничій виробці та забезпечує вищу метрологічну точність ніж аналогічні давачі, що розроблені іншими авторами [11-15]. Його технічні характеристики:

- діапазон вимірювань D_{\max} , кН 100;
- номінальне значення робочого коефіцієнту передачі електричного кола (РКП), що визначається як відношення вихідного сигналу до напруги живлення під впливом силового навантаження, рівного D_{\max} , при прискоренні земного тяжіння $g = 9,8107$ м/с, мВ/В від 0,5 до 3,0;
- значення початкового коефіцієнту передачі (ПКП) (для нового давача) $\pm 1,5\%$;
- зміна значення ПКП протягом 12 місяців від моменту виготовлення давача $\geq \pm 5\%$;
- ймовірність безвідмовної роботи протягом 2000 годин 0,9;
- середній строк служби, років 4;
- виконання за захистом від зовнішніх дій згідно ГОСТ 12997-84.

Основу розробленого давача складає пружний елемент у вигляді конусної мембрани. Мембрана сприймає силове навантаження вершиною конуса, що закінчується сферичною поверхнею радіусом $R = 10$ мм. На неї з одного боку діє рівномірне навантаження, а з іншого боку - чотири наклеєних тензорезистора і нормуючі перетворювачі, закріплені на круглій кришці. У центрі мембрани радіальна і тангенціальна напруга кола рівні і однакові за знаком. У міру віддалення від центру вони зменшуються, доходячи до нуля, а потім, змінивши знак, знову збільшуються, досягаючи максимуму в місцях закріплення. Тангенціальна напруга біля краю мембрани у декілька разів

менша за радіальну, тому при проектуванні робочою напругою прийняте радіальне її значення. З цієї причини тензорезистори орієнтовані в радіальному, а не тангенціальному напрямку. При проектуванні давача максимально використані останні досягнення науки і техніки, зокрема перетворювачі нормовані фольгові (ПНФ) для робочих тензорезисторів типу КФ5П1. Тензорезистори КФ5П1 призначені для вимірювання деформацій як проміжні вимірювальні перетворювачі, в умовах мікрокліматичних районів з помірним і холодним кліматом, що відповідає умовам України. Діапазон вимірюваної деформації 3000 мкм/м і струм не більш 20 мА.

Принципова електрична схема давача 4201 ДСТ - 10 приведена на рис. 1.

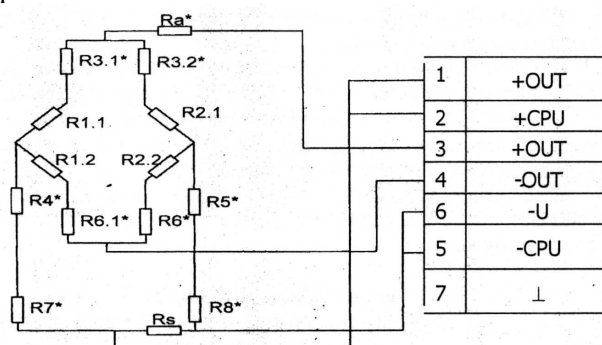


Рисунок 1 – Принципова електрична схема давача 4201 ДСТ – 10

Резистори R 1.1, R 1.2, R 2.1, R 2.2 - (чотири активних тензорезистора типу КФ5П1) спільно з резисторами R 3.1, R 3.2, R 6.1, R 6.2 сполучені за класичною мостовою схемою Уітстона (М), підключені до електричного джерела постійної напруги (клема 1 і 6). Отже, напруга на виході М (клема 3 і 4) буде пропорційна деформації пружного елемента, тобто пропорційна вимірюваній масі. При цьому R 3.1, R 3.2 є нормуючим фольговим перетворювачем НКП типу ПНФ-Б і служить для правильного балансування плечей моста, а R 6.1, R 6.2 є нормуючим фольговим перетворювачем температури НКП типу ПНФ-1Т. У розробленому давачі перетворювачі ПНФ-Б і ПНФ-1Т виконані з двох половин, які включені в суміжні плечі моста, що дозволяє нормувати НКП і компенсувати зміну температури для гірничої виробки незалежно від знаку

розбалансу. Резистори R 4 і R 5 є нормуючим перетворювачем температури РКП типу ПНФ-2Т. Резистори R 7 і R 8 є нормуючим перетворювачем РКП типу ПНФ-С. Необхідність перетворювачів ПНФ-С і ПНФ-2Т в схемі давача полягає в тому, що їх включення дає змогу відстежувати напругу електричного живлення на вхідній діагоналі моста Уїтстона, нормуючи РКП і компенсуючи температурні зміни під час вимірювань для гірничої виробки.

Давач 4201 ДСТ-10 пройшов метрологічну атестацію у складі МСК "МАК-2" Рис. 2.

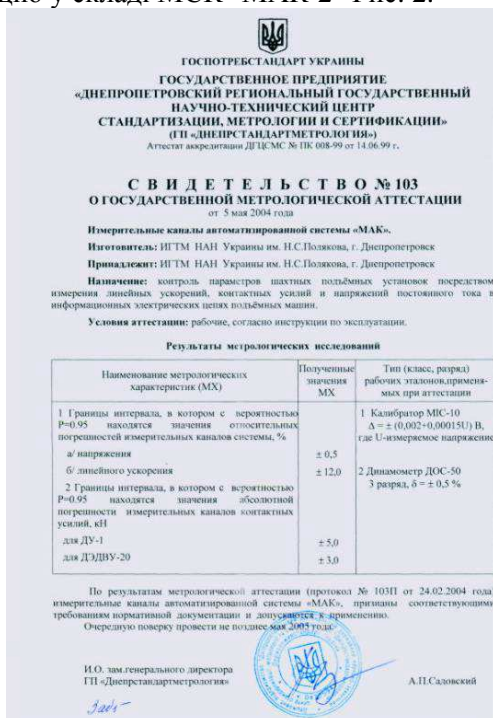


Рисунок 2 - Державна метрологічна атестація

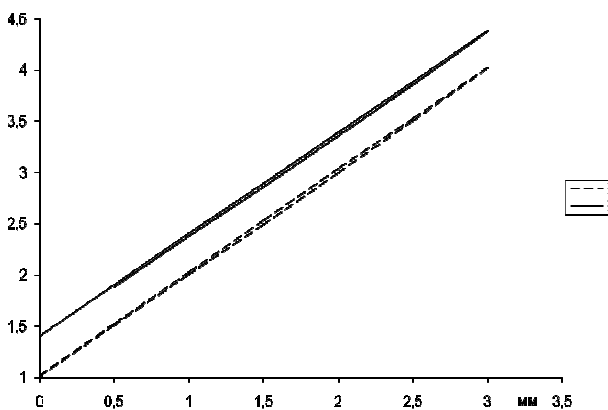


Рисунок 3 – Градувальна характеристика експериментального зразка давача 4201 ДСТ-10 на гістерезис

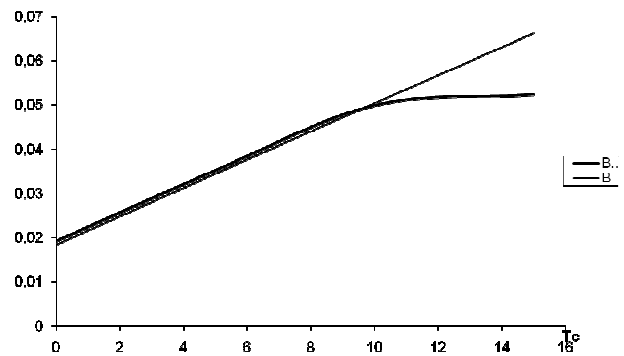


Рисунок 4 – Характеристики експериментального зразка давача 4201 ДСТ-10 без прогрівання (В.) і з попереднім прогріванням (В)



Рисунок 5 – Зразок запобіжного ковпачка давача 4201 ДСТ - 10, зношений в результаті шахтних вимірювань на п'ятидесятитонному скіповому підйомі шахти "Ювілейна" ВАТ "Суха Балка"

Паспортні дані перших експериментальних давачів 4201ДСТ-10 наведено в табл. 1.

В ході натурних робіт було виявлено, якщо градувальна характеристика кожного давача має лінійну залежність, а градувальні криві давача, зняті при однаковій чутливості, то кожен давач спочатку має бути проградуїований зі своїм запобіжним ковпачком. Кожен давач як під час градуювання, так і під час шахтних вимірювань на підйомній посудині має бути закріплений за одним і тим же каналом. Градуювання давача 4201 ДСТ - 10 виконується статичним способом за допомогою гідравлічного пресу. Динамічне градуювання, на наш погляд, зайве, оскільки нижня частота корисного сигналу набагато вища вимірюваної максимальної частоти.

Таблиця 1 – Паспортні дані перших експериментальних давачів 4201ДСТ-10.

№п/п	Параметр	Давач №1	Давач №2	Давач №3
1.	Діапазон вимірювань, D,т	10	10	10
2.	РКП, мВ/В	2,26	2,25	2,25
3.	ПКП, мВ/В	0,061	0,042	0,007
4.	Максимальна похибки % D_{max}	1.3	1,3	1,3
5.	Вхідний опір, Ом,	404,4	403,3	431,9
6.	Вихідний опір, Ом,	404,4	403,3	402,8
7.	Напруга живлення максимальна, В	12	12	12
8.	Опір ізоляції, МОм	50	50	50

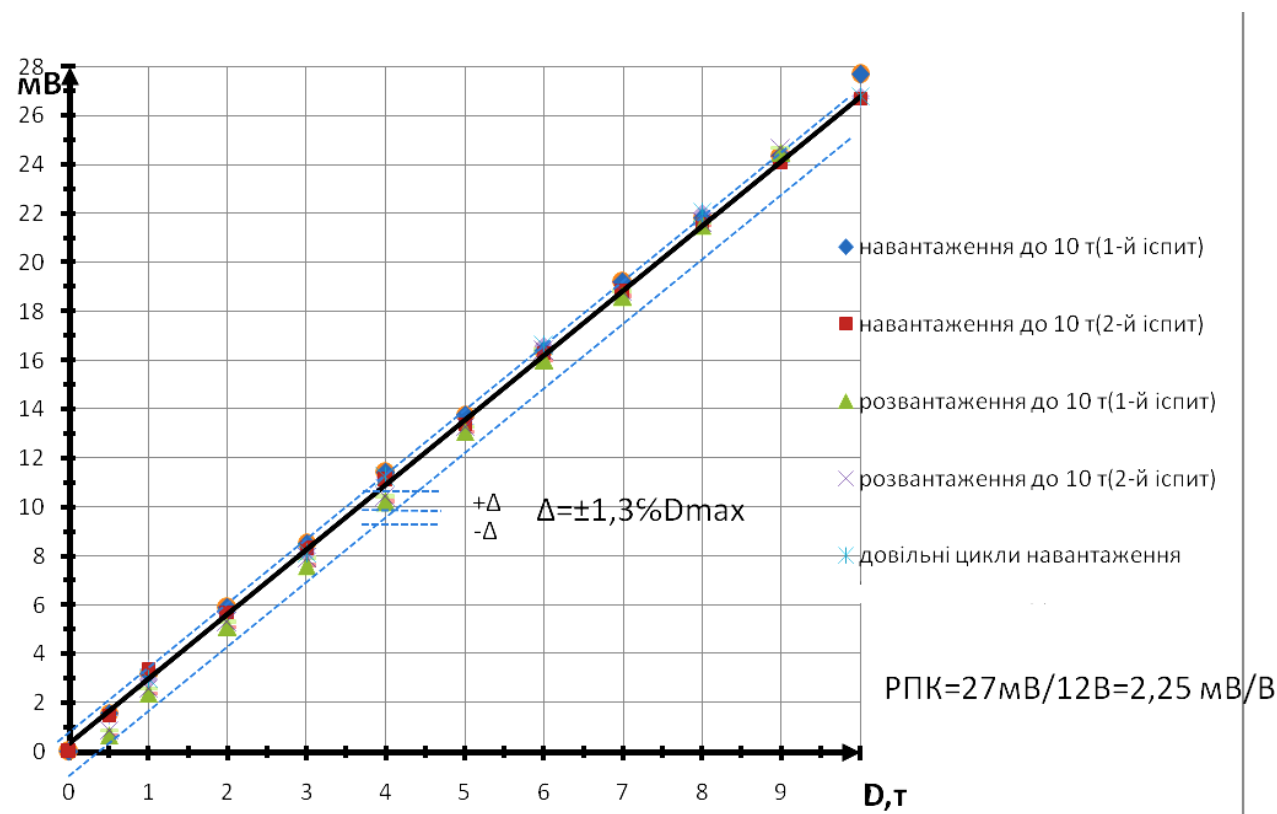


Рисунок 6 – Градувальна характеристика експериментального зразка давача 4201 ДСТ-10

Експлуатація давачів 4201 ДСТ-10 в складних умовах шахт Кривбасу виявила їх надійність табл. 2.

На теперішній час давачами 4201 ДСТ-10 досліджено жорстке армування шахти "Експлуатаційна" стовбурів: вантажний №1, №2 і допоміжний ЗЖРК (термін служби 43 роки,

глибина 940 метрів), шахти "Ювілейна" (термін служби 31 рік, глибина 1340 метрів) і шахти ім. М. Фрунзе (термін служби 50 років, глибина 1135 метрів) ВАТ "Суша Балка" (рис. 7-8).

Таблиця 2 – Характеристики експериментальних давачів 4201ДСТ-10, отримані при лабораторних і шахтних випробуваннях

№п/п	Заводський №	НКП мВ/В	РКП мВ/В
1	0106	0,012	2,15
2	0206	0,069	1,90
3	0306	0,007	2,25
4	0406	0,011	2,51
5	0506	0,010	1,86
6	0606	0,002	2,02
7	0706	-0,047	2,38
8	0806	0,012	2,15



Рисунок 7 – Експериментальний зразок давача 4201 ДСТ – 10, зруйнований в результаті шахтних випробувань на шахті «Експлуатаційна» ЗЗРК



Рисунок 8 – Експериментальний зразок запобіжного ковпака давача 4201 ДСТ-10, зруйнований в результаті шахтних випробувань на шахті «Експлуатаційна» ЗЗРК

Висновки

На основі досліджень був створений давач зусилля і навантаження, призначений для експлуатації у важких гірничих умовах: з розширеним діапазоном робочих температур, ступенем захисту IP67, вологостійкий в агресивному середовищі і конструктивно

виконаний так, щоб не порушувати вимоги безпеки в гірничих виробках. З цих критеріїв, обрано найкраще рішення для кожного набору обмежень.

Виконані дослідження і впровадження в гірничій галузі дозволяють при наявності зацікавленості та фінансування поширити отриманий досвід вирішення проблеми на аналогічні давачі.

Список використаних джерел

1. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 176 с.
2. Статников Р.Б., Матусов И.Б. О недопустимых, допустимых и оптимальных решениях в задачах проектирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2012. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://naukarus.com/o-nedopustimyh-dopustimyh-i-optimalnyh-resheniyah-v-zadachah-proektirovaniya.html>
3. Greco, Salvatore, Ehrgott, Matthias, Figueira, José Rui. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis. Berlin: Springer. 2010. 412 p.
4. How many different types of force transducer are there? (FAQ - Force). URL: [http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-\(faq-force\)#straingaugelcs.html](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-(faq-force)#straingaugelcs.html).
5. Шушкевич В.Я. Основы электротензометрии. Минск: Высшая школа 1975. 352с.
6. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. М. Машиностроение, 1979. 480с.
7. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: МАШГИЗ, 1962. 456 с.

8. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. М. Издательство МГТУ им. И.Э. Баумана, 2014. 480с.

9. Сахневич С.Ю., Алтухова Е.И. Использование бесконтактных устройств контроля в схемах защиты шахтных подъемных установок. *Республ. межвед. науч. техн. сб.* 2016. Вып. 97. С. 17-21.

10. Датчики силоизмерительные тензорезистивные 4201 ДСТ (МК 150. 420. 000 ТЕ). Днепропетровск: Метриком, 2003. 8с.

11. Gotzman W. Beschleunigungsmesser zur Prufung von Schachtfuhungen. Dortmund: Bellman H., 1962. P. 156-168.

12. Sebel Z. Tensometrike mereni dynamiky viceianovych teznich zarizeni. *UHLI.* 1981. No 20. P. 453-461.

13. А.с. 594000 СРСР, МКИ В66 В 7/02. Направляющий башмак подъемника / А.Е. Гавруцкий, Г.Н. Мушинский, В.И. Костогриз, Ю.М. Гречуха. (СССР). № 2412991/29-11; Заявлено 19.10.76; Оpubл. 25.02.78, Бюл. №7. 2с.

14. А.с. 644705 СРСР, МКИ В66 В 7/02. Направляющий башмак подъемника / А.Е. Гавруцкий, Г.Н. Мушинский, В.И. Костогриз. (СССР).- № 2469703/29-11; Заявлено 04.04.77; Оpubл. 30.01.79, Бюл. №4. 2 с.

15. Stefanescu D. M. Handbook of force transducers. *Principles and components.* Berlin: Springer. 2011. 612 с.

References

1. Sobol I.M., Statnikov R.B. Vyibor optimalnyh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami. М.: Drofa, 2006. 176p. [in Russian]

2. Statnikov R.B., Matusov I.B. O nedopustimiyh, dopustimiyh i optimalnyh resheniyah v zadachah proektirovaniya. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin.* 2012. No 4. [in Russian] URL: <http://naukarus.com/onedopustimiyh-dopustimiyh-i-optimalnyh-resheniyah-v-zadachah-proektirovaniya.html>

3. Greco Salvatore, Ehrgott Matthias, Figueira Jose Rui. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis. Berlin: Springer. 2010. 412 p.

4. How many different types of force transducer are there? (FAQ - Force). URL: [http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-(faq-force)#strainingaugelcs.html)

[different-types-of-force-transducer-are-there-\(faq-force\)#strainingaugelcs.html](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-(faq-force)#strainingaugelcs.html).

5. Shushkevich V.Ya. Osnovyi elektrotenzometrii. Minsk: Vyisheyshaya shkola 1975. 352p. [in Russian]

6. Osadchiy E.P. Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mehanicheskikh velichin. М.: Mashinostroenie, 1979. 480p. [in Russian]

7. Andreeva L.E. Uprugie elementy priborov. М.: MASHGIZ, 1962. 456 p. [in Russian]

8. Gavryushin S.S., Baryishnikova O.O., Boriskin O.F. Chislennyiy analiz elementov konstruksiy mashin i priborov. М.: Izdatelstvo MGTU im. I.E. Baumana, 2014. 480 p. [in Russian]

9. Sahnevich S.Yu., Altuhova E.I. Ispolzovanie beskontaktnykh ustroystv kontrolya v shemah zaschityi shahtnykh pod'emnykh ustanovok. *Respubl. mezhved. nauch. tehn. sb.* 2016. Vol. 97. P. 17-21. [in Russian]

10. Datchiki siloizmeritelnyie tenzorezistivnyie 4201 DST (МК 150. 420. 000 ТЕ). Dnepropetrovsk: Metrikom, 2003. 8p. [in Russian]

11. Gotzman W. Beschleunigungsmesser zur Prufung von Schachtfuhungen. Dortmund: Bellman H., 1962. P. 156-168.

12. Sebel Z. Tensometrike mereni dynamiky viceianovych teznich zarizeni. *UHLI.* 1981. No 20. P. 453-461.

13. А.с. 594000 SRSR, МКИ В66 В 7/02. Napravlyayuschiy bashmak pod'emnika / А.Е. Gavrutskiy, G.N. Mushinskiy, V.I. Kostogriz, Yu.M. Grechuha. (SSSR). No 2412991/29-11; Заявлено 19.10.76; Оpubл. 25.02.78, Byul. 7. 2p. [in Russian]

14. А.с. 644705 SRSR, МКИ В66 В 7/02. Napravlyayuschiy bashmak pod'emnika / А.Е. Gavrutskiy, G.N. Mushinskiy, V.I. Kostogriz. (CSCR). No 2469703/29-11; Заявлено 04.04.77; Оpubл. 30.01.79, Byul. 4. 2 p. [in Russian]

15. Stefanescu D. M. Handbook of force transducers. Principles and components. Berlin: Springer. 2011. 612 p.

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 006.91:681.121

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-54-64

МЕТОДИКА МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ПОБУТОВИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ ЗА ОБМЕЖЕНИМ ДІАПАЗОНОМ РОБОЧИХ ВИТРАТ

О. Є. Середюк, Т. В. Лютенко, А. Г. Винничук, О. С. Криницький

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

Здійснено аналіз діючих нормативних документів, які регламентують види, умови і технічні засоби перевірки метрологічних характеристик побутових лічильників газу при їх первинній і періодичній повірках. Обґрунтовано доцільність контролю метрологічних характеристик побутових лічильників за місцем експлуатації з використанням природного газу як робочого середовища. Розроблено нову патентозахищену методику експериментально-розрахункового методу метрологічного оцінювання побутових лічильників за обмеженим діапазоном контрольованих витрат, яка забезпечує реалізацію бездемонтажного метрологічного перевіряння лічильників у всьому діапазоні робочих витрат. Вона передбачає експериментальне визначення похибки лічильників на мінімальній робочій витраті і витраті, яка відповідає 20 % від максимальної, а також розрахункове визначення похибки лічильника на максимальній витраті з використанням статистично встановлених закономірностей зміни похибок побутових лічильників при їх експлуатації з конкретизацією типорозміру і моделі лічильника. Такий підхід дає можливість здійснювати метрологічні дослідження лічильників газу на природному газі і одночасно бездемонтажно на місці експлуатації. Розкрито можливість застосування запропонованої методики для демонтажного метрологічного контролю побутових лічильників при функціонуванні повірочних установок на повітрі, до яких зменшуються вимоги щодо верхнього діапазону робочих витрат. Наведені результати апробації розробленої методики метрологічного контролю побутових лічильників газу за обмеженим діапазоном робочих витрат, які підтвердили правильність методичного підходу для його практичного застосування. Обґрунтовано доцільність розроблення і затвердження відповідного нормативного документу для практичної реалізації розробленої методики метрологічних досліджень побутових лічильників газу, яка буде відповідати нормативним документам України і забезпечить реалізацію метрологічного контролю побутових лічильників на природному газі в умовах експлуатації.

Ключові слова: побутовий лічильник газу, метрологічний контроль, природний газ, повітря, робочі витрати, похибка, еталонна установка, експериментально-розрахунковий метод.

Осуществлен анализ действующих нормативных документов, регламентирующих виды, условия и технические средства проверки метрологических характеристик бытовых счетчиков газа при их первичной и периодической поверках. Обоснована целесообразность контроля метрологических характеристик бытовых счетчиков на месте эксплуатации с использованием природного газа в качестве рабочей среды. Разработана новая патентозащищенная методика экспериментально-расчетного метода метрологического оценивания бытовых счетчиков при ограниченном диапазоне контролируемых расходов, который обеспечивает реализацию бездемонtajной метрологической проверки счетчиков во всем диапазоне рабочих расходов. Она предусматривает экспериментальное определение погрешности счетчиков на минимальном рабочем расходе и расходе, который соответствует 20% от максимального, а также расчетное определение погрешности счетчика на максимальном расходе с использованием статистически установленных закономерностей изменения погрешностей бытовых счетчиков при их эксплуатации с конкретизацией типоразмера и модели счетчика. Такой подход дает возможность осуществлять метрологические исследования счетчиков газа на природном газе и одновременно без демонтажа на месте эксплуатации. Раскрыты возможности применения предложенной методики для демонтажного метрологического контроля бытовых счетчиков при функционировании поверочных установок на воздухе, для которых снижаются требования относительно

верхнього діапазона робочих расходов. Приведенные результаты апробации разработанной методики метрологического контроля бытовых счетчиков газа с использованием ограниченного диапазона рабочих расходов, которые подтвердили правильность методического подхода для его практического применения. Обоснована целесообразность разработки и утверждения соответствующего нормативного документа для практической реализации разработанной методики метрологических исследований бытовых счетчиков газа, которая будет соответствовать нормативным документам Украины и обеспечит реализацию метрологического контроля бытовых счетчиков на природном газе в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: бытовой счетчик газа, метрологический контроль, природный газ, воздух, рабочие расходы, погрешность, эталонная установка, экспериментально-расчетный метод.

The analysis of the current regulatory documents governing the types, conditions and technical means of domestic gas meters metrological characteristics checking during their initial and periodic verification was carried out. The expediency of monitoring the domestic meters metrological characteristics with using of natural gas was substantiated. A new patent-protected methodology has been developed for the experimental-calculation method of metrological assessment of domestic meters with a limited work flow range, which ensures the implementation of dismountable metrological verification of gasmeters in the entire range of operating flow was work out. It provides of the experimental determination of the gasmeters error at the minimal work flow rate and the flow rate, which corresponds to 20% of the maximum, as well as the calculated determination of the gasmeter error at the maximum flow rate using statistically established patterns of change in the errors of domestic gasmeters during their operation with specification of the size and model of the meter. This approach makes it possible to carry out metrological studies of gas meters using natural gas and at the same time without dismantling at the place of operation. The possibilities of applying the proposed methodology for dismantling metrological control of domestic gasmeters during the operation of calibration facilities in the air were revealed, for which the requirements for the upper range of operating flows were reduced. The results of testing the developed methodology for metrological control of domestic gas meters using a limited range of operating flows, which confirmed the correctness of the methodological approach for its practical application. The expediency of developing and approving the relevant regulatory document for the practical implementation of the developed methodology for the metrological research of domestic gas meters, which will comply with the regulatory documents of Ukraine and ensure the implementation of metrological control of natural gas meters in operating conditions, was substantiated.

Keywords: domestic gas meter, metrological control, natural gas, air, operating flow, error, reference installation, experimental-calculation method.

Актуальність. Побутові лічильники газу (ПЛГ) у відповідності до Закону України “Про метрологію та метрологічну діяльність” [1] відносяться до законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, внаслідок чого при їх випуску і експлуатації в повній мірі повинні дотримуватися вимоги чинних нормативних документів, в тому числі у сфері метрологічного забезпечення. Це стосується не тільки документів, які супроводжують виготовлення ПЛГ і оцінювання відповідності при затвердженні типу [2, 3], але і документів, дотримання яких необхідне при експлуатації. Вони необхідні, зокрема для здійснення періодичної повірки, яка проводиться впродовж періоду експлуатації лічильників газу через встановлений проміжок часу, який визначається міжповірочним інтервалом.

З врахуванням тієї обставини, що на сьогодні в Україні знаходиться в експлуатації близько 10 млн. ПЛГ [4] актуальним є

розширення бази еталонних та повірочних установок, яка на даний час в Україні є недостатньою. Сприятливі покращенню метрологічного забезпечення ПЛГ можуть також нові методики повірки ПЛГ, які би дозволяли підвищити продуктивність повірочних операцій на установках при одночасному дотриманні необхідних метрологічних вимог з врахуванням чинної повірочної схеми [5] у сфері вимірювання об’єму та об’ємної витрати газу.

Як відомо, повірка ПЛГ передбачає встановлення придатності до застосування лічильника газу на підставі результатів контролю його метрологічних характеристик, що здійснюється в установленому законодавством порядку [6], і повинна здійснюватися у відповідності до чинних нормативних документів. Тому нові або вдосконалені методи її реалізації повинні базуватися на розробленні нових і

вдосконалених методик метрологічного контролю ПЛГ.

Такий метрологічний контроль також може бути використаний при діагностуванні ПЛГ впродовж міжповірочного інтервалу [7].

Поряд з цим, на сьогоднішній час в офіційних коментарях щодо практичних аспектів проведення періодичної повірки ПЛГ [8] запроваджується поняття “повірка лічильника газу на місці його встановлення” і конкретизується необхідність її проведення у присутності “споживача (власника або наймача об’єкта побутового споживача)”. При цьому очевидно є наявність необхідних чинних нормативних документів, які на даний час в Україні відсутні. Практична реалізація такого підходу може здійснюватися з використанням різних видів робочого середовища - повітря або природного газу [9]. Використання останнього суттєво підвищує достовірність метрологічного контролю ПЛГ і звичайно може бути реалізовано за умови функціонування еталонних установок на такому робочому середовищі.

Тому розроблення нових методик метрологічного контролю ПЛГ є актуальним напрямом наукових досліджень.

Аналіз відомих досліджень. Методи та засоби перевірки метрологічних характеристик ПЛГ конкретизуються відповідними чинними нормативними документами. При випробуванні лічильників на підприємстві-виробнику згідно національного стандарту [2] передбачається визначення похибки мембранних лічильників при випробуваннях на кожній із таких семи витрат $q_{min}; 3q_{min}; 0,1q_{max}; 0,2q_{max}; 0,4q_{max}; 0,7q_{max}; q_{max}$ при використанні повітря як робочого середовища.

Визначення відносної похибки лічильників у відповідності до вимог [10] під час прийнятно-здавальних випробувань проводять на витратах: $q_{min}; 0,2q_{max}; q_{max}$ і на витратах $q_{min}; 3q_{min} (2q_{min}), 0,1q_{max}, 0,2q_{max}, 0,4q_{max}, 0,7q_{max}, q_{max}$ за всіх інших випробувань. При цьому використовується повітря як робоче середовище.

Відповідно до [10] повірочні установки повинні забезпечувати повірку лічильників і працювати в діапазоні витрат, які відповідають робочим витратам лічильників, а також на витратах, рівних порогу чутливості ПЛГ. Границі допустимої відносної похибки

еталонної установки повинні бути не менш ніж у три рази вужчі за границі допустимої відносної похибки лічильників у відповідному діапазоні витрат при повірці з використанням робочого середовища повітря температурою від 18°C до 22°C, яка відповідає допустимій температурі навколишнього повітря еталонної установки і температурі робочого середовища еталонної установки.

Відносна похибка ПЛГ δ_L визначається експериментально шляхом пропуску через нього певного значення контрольного об’єму газу і обчислюється за формулою [2, 11]:

$$\delta_L = \frac{V_L - V_E}{V_E} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де V_L – об’єм газу, який виміряв ПЛГ; V_E – об’єм газу, який переданий від еталонного засобу вимірювальної техніки (робочого еталону).

За результатами кількісного визначення відносної похибки ПЛГ за різних значень робочого діапазону витрат будується крива залежності відносної похибки лічильника від значення витрати, яка подається в його паспорті. Це проводиться з метою оцінювання відповідності згідно вимог технічного регламенту на ПЛГ, як на засоби вимірювальної техніки законодавчо регульованої сфери [3] і при первинній повірці ПЛГ на підприємстві-виробнику [1].

При метрологічних дослідженнях ПЛГ з врахуванням умов повірки і типу еталонних установок відносну похибку δ_L для ПЛГ згідно [10, 11] з урахуванням витрат тиску та різниці температури на вході лічильника і на виході робочого еталона обчислюють за формулою:

$$\delta_L = \left[\frac{V_L}{V_E} \cdot \frac{p_L}{p_E} \cdot \frac{T_E}{T_L} - 1 \right] \cdot 100\%,$$

або

$$\delta_L = \delta_V + K_p + K_T, \quad (3)$$

де p_E, p_L – значення абсолютного тиску в робочому еталоні та лічильнику відповідно, Па; T_E, T_L – значення абсолютної температури в робочому еталоні та лічильнику відповідно, К; K_p – поправка до відносної похибки лічильника, спричинена різницею тисків між входом

лічильника і виходом робочого еталона, %; K_T – поправка до відносної похибки лічильника, спричинена різницею температур вздовж випробувальної лінії на виході робочого еталона та на вході лічильника, %; δ_L – похибка ПЛГ без врахування зміни тиску і температури у випробувальній лінії робочого еталона.

Значення поправок обчислюється за формулами:

$$K_p = \frac{P_L - P_E}{P_E} \cdot 100\% , \quad (4)$$

$$K_T = \frac{T_L - T_E}{T_E} \cdot 100\% . \quad (5)$$

При періодичній повірці ПЛГ згідно [11] перевіряють основні метрологічні та технічні характеристики ПЛГ, а відносну похибку визначають тільки на трьох витратах q_{min} ; $0,2q_{max}$; q_{max} з повітряним робочим середовищем.

Згідно [12] для технічних об'єктів, якими є ПЛГ, може бути застосоване поняття діагностування і контролю технічного стану. Їх реалізація можлива шляхом проведення періодичного контролю ПЛГ. Техніко-метрологічні засади створення установок для реалізації такого підходу для перевіряння метрологічних характеристик ПЛГ відображені в [7]. Вони передбачають здійснення перевірки ПЛГ за обмеженою кількістю параметрів, наприклад, для обмеженого діапазону робочих витрат лічильників. Також можуть визначатися окремі технічні і метрологічні характеристики, які стосуються правильності функціонування ПЛГ, наприклад, визначення витрат тиску на лічильнику і визначення його порогу чутливості.

Незважаючи на відсутність на даний час нормативного документа щодо проведення технічного діагностування ПЛГ в Україні набув практичного застосування нормативно дозволений метод експрес-контролю ПЛГ [13]. Схема проведення експрес-контролю ПЛГ передбачає послідовне приєднання до діагностованого ПЛГ контрольний лічильник за допомогою спеціальних з'єднувальних шлангів через кран перед газоспоживним обладнанням. На вході контрольний лічильник манометром вимірюється надлишковий тиск природного газу і термометром його температура. Похибка ПЛГ обчислюється шляхом порівняння відлічених об'ємів

природного газу контрольним лічильником і ПЛГ згідно алгоритму (1).

Процедура проведення експрес-контролю передбачає визначення відносного відхилення результатів вимірювань контрольний об'єму газу тільки при витратах $2q_{min}$ і $0,1q_{max}$. В залежності від типорозміру лічильника (G1,6, G2,5, G4 чи G6) пропускається контрольний об'єм газу величиною від 15 до 40 дм³ при витраті $2q_{min}$ та від 50 до 150 дм³ при витраті $0,1q_{max}$. За результатами проведених вимірювань робиться висновок про можливість подальшої експлуатації ПЛГ. Однак юридично така операція не може бути використаною при періодичній повірці ПЛГ, оскільки контрольний лічильник повинен бути метрологічно атестованим на природному газі, що на сьогодні в Україні не здійснюється внаслідок відсутності еталонних установок з функціонуванням на природному газі, за допомогою яких могли би бути метрологічно атестовані еталонні лічильники.

Відомим є закордонний (Російська Федерація) нормативний документ [14], який стосується методики повірки ПЛГ на місці експлуатації за допомогою еталонного лічильника. Цей нормативний документ з описаною методикою повірки за своєю суттю відображає технічне рішення української методики експрес-контролю [13] так як застосовується еталонний лічильник (а в [14] контрольний лічильник). Для під'єднання еталонного лічильника у двох нормативних документах передбачено застосування гнучких шлангів, а при визначенні похибки здійснюють відлік показів з досліджуваного і контрольний лічильника в статичному режимі, тобто при відсутності потоку газу через ПЛГ. Також відтворення об'єму газу через ПЛГ, який проходить через обидва лічильники (контрольний і досліджуваний), реалізують методом спалювання газу у газоспоживних апаратах. Відмінність полягає у досліджуваних відтворюваних витратах: в українському документі [13] – це витрати $2q_{min}$; $0,1q_{max}$, а в російському [14] похибку визначають за мінімальної і максимальної можливих відтворюваних витрат, кількісні значення яких не конкретизовані. Однак головна відмінність – результат перевірки метрологічної характеристики: в українському [13] – це

контроль придатності до експлуатації, а в російському [14] – отримання результату проведення повірки. Також в [14] не конкретизовано, на якому середовищі повинен бути метрологічно атестованим еталонний лічильник, тільки сказано, що він повинен мати чинне свідоцтво про повірку.

Метою дослідження є розроблення та апробація нової методики метрологічного контролю побутових лічильників газу за обмеженим діапазоном робочих витрат.

Основний матеріал. Авторами розроблена нова методика для здійснення метрологічного контролю ПЛГ [15], яка дозволяє оцінити похибку ПЛГ у всьому діапазоні робочих витрат, завдяки чому такий підхід може відповідати чинним вимогам при розробленні нормативного документу для періодичної повірки ПЛГ. Ця методика базується на застосуванні експериментально-розрахункового методу визначення похибки ПЛГ у всьому діапазоні робочих витрат за обмеженим діапазоном контрольованих витрат. Суть методики полягає у використанні результатів експериментально визначених похибок ПЛГ на мінімальній витраті q_{\min} і на витраті 20% від максимальної витрати $0,2q_{\max}$, а похибку ПЛГ за максимальної витрати q_{\max} визначають розрахунковим методом із застосуванням статистично встановленої інтерполяційної залежності зміни похибки ПЛГ. Наукове обґрунтування цієї методики та її метрологічний аналіз викладені в [16].

При практичній реалізації метрологічного контролю попередньо необхідно статистично встановити усереднені фактичні значення похибок ПЛГ на витратах q_{\min} , $0,2q_{\max}$, q_{\max} за даними їх періодичної повірки після міжповірочного терміну експлуатації, який на сьогодні становить 8 років [17]. Далі перевіряють, щоб похибка кожного ПЛГ із контрольної вибірки на витраті q_{\min} знаходилася в межах від плюс 3% до мінус 6%. Значення цієї похибки характеризує побутовий лічильник як придатний до подальшої експлуатації [2, 11]. У випадку, якщо кількість лічильників з похибкою до мінус 6% на витраті q_{\min} буде меншою від тринадцяти, то число досліджуваних лічильників збільшують до досягнення необхідної вибірки в кількості тринадцяти лічильників.

Після цього розраховують середні значення похибок за формулами:

$$\bar{\delta}_{0,2q_{\max}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{0,2q_{\max}i}, \quad (6)$$

$$\bar{\delta}_{q_{\max}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{q_{\max}i}, \quad (7)$$

де $\bar{\delta}_{0,2q_{\max}}$, $\bar{\delta}_{q_{\max}}$ – статистично розраховані середні значення похибок лічильника на витратах $0,2q_{\max}$ і q_{\max} відповідно; $\delta_{0,2q_{\max}i}$, $\delta_{q_{\max}i}$ – експериментально визначені за допомогою еталонної установки похибки окремих i -тих ПЛГ із вибірки кількості N лічильників.

Далі статистично встановлюють різницю між похибками на витраті $0,2q_{\max}$ і на максимальній витраті q_{\max} за формулою:

$$\bar{\Delta\delta} = \bar{\delta}_{0,2q_{\max}} - \bar{\delta}_{q_{\max}} \quad (8)$$

де $\bar{\Delta\delta}$ – статистично встановлене середнє значення зміни похибок лічильників за витрат $0,2q_{\max}$ і q_{\max} .

Кількість лічильників ($N=13$) згідно теорії похибок при метрологічному аналізі вимірювань забезпечує досягнення достовірності результату з довірчою імовірністю 95%, яка є достатньою для більшості практичних вимірювань робочими засобами вимірювань, до яких відносяться побутові лічильники.

На основі отриманих статистичних даних для метрологічного оцінювання експериментально-розрахункового методу визначення похибки лічильника на максимальній витраті здійснюють розрахунок числового значення похибки при q_{\max} для кожного i -го досліджуваного лічильника:

$$\delta_{q_{\max}i} = \delta_{0,2q_{\max}i} - \bar{\Delta\delta}, \quad (9)$$

де $\delta_{q_{\max}i}$ – розраховане значення похибки i -го ПЛГ на витраті q_{\max} ; $\delta_{0,2q_{\max}i}$ – експериментально визначена похибка i -го ПЛГ при його дослідженні на витраті $0,2q_{\max}$; $\bar{\Delta\delta}$ – середнє значення зміни похибки лічильника при витраті q_{\max} порівняно з витратою $0,2q_{\max}$ для конкретного типорозміру ПЛГ (G1,6; G2,5; G4; G6) і конкретного підприємства-виробника ПЛГ.

Таким чином без проведення експериментального визначення похибки ПЛГ

за алгоритмом (1) стає можливим її визначення за алгоритмом (6)÷(9).

Основною перевагою такого підходу є те, що визначення експериментальним шляхом похибки ПЛГ тільки на мінімальних витратах і на витраті, яка становить 20% від максимальної робочої, дозволяє визначити реальну похибку ПЛГ бездемонтажно за робочих умов експлуатації. Як наслідок, зменшується тривалість проведення метрологічних досліджень і підвищується точність і достовірність отриманих результатів, оскільки дослідження ПЛГ здійснюються без їх демонтажу і транспортування до еталонної установки, при застосуванні реального робочого середовища – природного газу. При цьому також зменшуються вимоги щодо діапазону робочих витрат еталонних установок, адже практично неможливо на місці експлуатації ПЛГ відтворити максимальне значення витрат через досліджувані ПЛГ без застосування спеціальних пристроїв, наприклад, компресора.

Поряд з цим для реалізації вказаного методу бездемонтажного метрологічного контролю необхідне застосування повірочних установок з еталонними лічильниками на малі витрати природного газу. З цією метою може бути застосована розроблена за участю авторів мобільна установка, яка реалізує метод вимірювання витрати газу з використанням торцевих звужувальних пристроїв, похибка якої за умови їх індивідуального градування може не перевищувати $\pm 0,6\%$ [18]. Технічним засобом для градування звужувальних пристроїв може слугувати, наприклад, робочий еталон об'єму газу дзвонового типу Темпо-1 (Інженерно-впровадницька фірма ТЕМПО, м. Івано-Франківськ) з границею сумарної відносної похибки передавання одиниці об'єму газу $\pm 0,15\%$ в діапазоні витрат (0,016...10) м³/год.

Для перевірення правильності розробленої методики метрологічного контролю ПЛГ була проведена її апробація в умовах АТ «Івано-Франківськгаз» (м. Івано-Франківськ).

Експериментальне визначення похибок ПЛГ моделей САМГАЗ G4 і METRIX G4 здійснювалося з використанням установки повірочної дзвонового типу ІФЗ-2 з діапазоном вимірювань від 0,016 м³/год до 16 м³/год, яка призначена для визначення та

контролю метрологічних характеристик лічильників газу типорозмірів від G1,6 до G10 з використанням повітря як робочого середовища. Метрологічні характеристики установки: границя допустимої похибки $\pm 0,27\%$; розширена невизначеність вимірювань при коефіцієнті охоплення $k=2$ становить $\pm 0,27\%$.

Першим етапом експериментальних досліджень було визначення за допомогою повірочної установки похибок ПЛГ на трьох витратах (q_{\min} , $0,2q_{\max}$, q_{\max}) з метою статистичного встановлення закономірностей зміни похибок ПЛГ $\Delta\delta$ при q_{\max} відносно її значення при $0,2q_{\max}$ для вибірок по 13 лічильників моделей САМГАЗ G4 і METRIX G4 (табл.1, 2). Похибка ПЛГ $\delta_{q_{\min}}$ при мінімальній витраті визначалася тільки для придатних для подальшої експлуатації лічильників, тобто ця похибка повинна була знаходитися в межах від мінус 6% до плюс 3%.

Розрахунки середніх значень похибок здійснювалися за формулами (6)÷(7). При цьому для витрати q_{\min} при розрахунку $\bar{\delta}_{q_{\min}}$ використовувалася аналогічна формула.

Для кожної вибірки на вказаних вище трьох витратах розраховувалися середні квадратичні відхилення середніх значень похибок:

$$\sigma_{q_{\min}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{q_{\min i}} - \bar{\delta}_{q_{\min}})^2}{N(N-1)}}, \% \quad (10)$$

$$\sigma_{0,2q_{\max}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{0,2q_{\max i}} - \bar{\delta}_{0,2q_{\max}})^2}{N(N-1)}}, \% \quad (11)$$

Таблиця 1 – Статистичні метрологічні дослідження вибірки ПЛГ моделі САМГАЗ G4 для обчислення зміни похибки на витраті q_{\max}

Модель ПЛГ	Порядковий номер у вибірці	Рік виготовлення ПЛГ	Похибка, %			$\Delta\delta$
			$\delta_{q \max}$	$\delta_{0,2q \max}$	$\delta_{q \min}$	
САМГАЗ G4	1	2007	-0,04	0,98	-4,34	1,02
САМГАЗ G4	2	2008	-0,67	1,15	-3,57	1,82
САМГАЗ G4	3	2005	-1,30	0,44	-1,15	1,74
САМГАЗ G4	4	2011	0,40	2,58	-0,68	2,18
САМГАЗ G4	5	2012	1,91	2,94	0,77	1,03
САМГАЗ G4	6	2012	1,03	2,63	-4,92	1,60
САМГАЗ G4	7	2008	0,27	1,80	-3,68	1,53
САМГАЗ G4	8	2011	0,20	2,54	-2,81	2,34
САМГАЗ G4	9	2012	0,06	0,89	-2,82	0,83
САМГАЗ G4	10	2011	1,07	1,59	-5,04	0,52
САМГАЗ G4	11	2005	-0,68	1,53	-3,17	2,21
САМГАЗ G4	12	2011	-0,54	1,39	1,19	1,93
САМГАЗ G4	13	2008	-0,18	0,64	-1,42	0,82
$\bar{\delta}, \%$			0,12	1,62	-2,43	1,51
$\sigma, \%$			$\pm 0,238$	$\pm 0,228$	$\pm 0,563$	$\pm 0,166$

Таблиця 2 – Статистичні метрологічні дослідження вибірки ПЛГ моделі METRIX G4 для обчислення зміни похибки на витраті q_{\max}

Модель ПЛГ	Порядковий номер у вибірці	Рік виготовлення ПЛГ	Похибка, %			$\Delta\delta$
			$\delta_{q \max}$	$\delta_{0,2q \max}$	$\delta_{q \min}$	
METRIX G4	1	2009	-0,90	0,43	-1,68	1,33
METRIX G4	2	2004	0,58	2,11	-5,64	1,53
METRIX G4	3	2012	-0,93	0,45	1,64	1,38
METRIX G4	4	2001	-0,41	0,98	-4,34	1,39
METRIX G4	5	2008	0,22	0,79	-3,00	0,57
METRIX G4	6	2012	0,28	1,36	-1,69	1,08
METRIX G4	7	2007	-1,41	0,70	1,18	2,11
METRIX G4	8	2004	1,24	2,03	-1,73	0,79
METRIX G4	9	2010	-0,77	0,08	-2,45	0,85
METRIX G4	10	2004	1,38	2,51	0,28	1,13
METRIX G4	11	2005	0,67	1,76	-1,39	1,09
METRIX G4	12	2007	-0,03	1,05	-5,88	1,08
METRIX G4	13	2007	-1,73	0,25	-1,27	1,98
$\bar{\delta}, \%$			-0,14	1,12	-2,00	1,254
$\sigma, \%$			$\pm 0,271$	$\pm 0,216$	$\pm 0,644$	$\pm 0,122$

$$\sigma_{q_{\max}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_{q_{\max i}} - \bar{\delta}_{q_{\max}})^2}{N(N-1)}}, \% \quad (12)$$

де $\sigma_{q_{\min}}$, $\sigma_{0,2q_{\max}}$, $\sigma_{q_{\max}}$ – середні квадратичні відхилення середніх значень похибок вибірки ПЛГ на витратах q_{\min} , $0,2q_{\max}$ і q_{\max} відповідно.

Кількісна зміна похибки i -того ПЛГ при q_{\max} , відносно її значення при $0,2q_{\max}$ розраховувалася за формулою

$$\Delta\delta_i = \delta_{0,2q_{\max i}} - \delta_{q_{\max i}} \quad (13)$$

Середнє значення зміни похибки $\Delta\bar{\delta}$ і середнє квадратичне відхилення її середнього значення $\sigma_{\Delta\delta}$ обчислювалися за формулами:

$$\Delta\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i \quad (14)$$

$$\sigma_{\Delta\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta\delta_i - \Delta\bar{\delta})^2}{N(N-1)}} \quad (15)$$

Другим етапом при апробації була реалізація експериментально-розрахункового методу визначення похибки ПЛГ на максимальній витраті для довільно сформованої вибірки із п'яти лічильників моделей САМГАЗ G4 і METRIX G4 (табл. 3, 4).

Таблиця 3 – Результати апробації застосування експериментально-розрахункового методу визначення похибки ПЛГ моделі САМГАЗ G4 на максимальній витраті

Модель ПЛГ	Порядковий номер у вибірці	Рік виготовлення ПЛГ	Похибка експериментальна, %			Похибка розрахункова, %	Різниця, %
			$\delta_{q_{\max}}$	$\delta_{0,2q_{\max}}$	$\delta_{q_{\min}}$	$\delta_{q_{\max \text{ розр.}}}$	$\Delta\delta_m = \delta_{q_{\max \text{ розр.}}} - \delta_{q_{\max}}$
САМГАЗ G4	1	2011	0,14	1,52	-4,38	$0,01 \pm 0,51$	-0,13
САМГАЗ G4	2	2010	0,41	1,60	-0,37	$0,09 \pm 0,51$	-0,32
САМГАЗ G4	3	2011	0,87	2,57	-3,30	$1,06 \pm 0,51$	0,19
САМГАЗ G4	4	2012	0,03	1,52	-2,09	$0,01 \pm 0,51$	-0,02
САМГАЗ G4	5	2008	0,50	1,81	-4,02	$0,30 \pm 0,51$	-0,20

Таблиця 4 – Результати апробації застосування експериментально-розрахункового методу визначення похибки ПЛГ моделі METRIX G4 на максимальній витраті

Модель ПЛГ	Порядковий номер у вибірці	Рік виготовлення ПЛГ	Похибка експериментальна, %			Похибка розрахункова, %	Різниця, %
			$\delta_{q_{\max}}$	$\delta_{0,2q_{\max}}$	$\delta_{q_{\min}}$	$\delta_{q_{\max \text{ розр.}}}$	$\Delta\delta_m = \delta_{q_{\max \text{ розр.}}} - \delta_{q_{\max}}$
METRIX G4	1	2005	-1,57	0,80	-5,15	$-0,45 \pm 0,36$	1,12
METRIX G4	2	2009	-0,20	2,20	-2,15	$0,95 \pm 0,36$	1,15
METRIX G4	3	2008	-0,05	1,08	-2,98	$-0,17 \pm 0,36$	-0,12
METRIX G4	4	2007	-2,52	-1,04	-4,22	$-2,29 \pm 0,36$	0,23
METRIX G4	5	2007	-2,32	-0,33	-2,13	$-1,58 \pm 0,36$	0,74

При цьому визначалися експериментальним шляхом похибки для кожного лічильника на трьох витратах q_{\min} , $0,2q_{\max}$, q_{\max} і порівнювалися фактичні похибки на максимальній витраті $\delta_{q_{\max}}$ з розрахованим її значенням $\delta_{q_{\max} \text{ розр}}$ згідно розробленої методики метрологічного контролю ПЛГ за обмеженим діапазоном робочих витрат.

Розраховане значення похибки для конкретного i -го ПЛГ $\delta_{q_{\max} \text{ розр}}$ при максимальній витраті q_{\max} обчислювалися за формулою:

$$\delta_{q_{\max} \text{ розр}} = \delta_{0,2q_{\max} i} - \Delta\bar{\delta} \pm 3\sigma_{\Delta\delta} \quad (16)$$

Різницю між розрахованим значенням похибки за максимальної витрати $\delta_{q_{\max} \text{ розр}}$ і експериментально визначеної похибки ПЛГ $\delta_{q_{\max}}$ за цих умов можна вважати методичною похибкою $\Delta\delta_M$ експериментально-розрахункового методу визначення похибки ПЛГ, що подається формулою:

$$\Delta\delta_M = \delta_{q_{\max} \text{ розр}} - \delta_{q_{\max}} \quad (17)$$

На рис.1 наведена графічна ілюстрація результатів апробації.

На рис.1 вказано розраховані та експериментально визначені похибки досліджуваних ПЛГ за максимальної робочої витрати. Також означений допустимий діапазон визначення розрахункових значень похибок, який знаходиться в межах $\pm 0,51\%$ для САМГАЗ G4 і $\pm 0,36\%$ для METRIX G4 і обчислений як $\pm 3\sigma_{\Delta\delta}$. Допустимий діапазон зміни статистично розрахованого середнього значення похибки $D_{\bar{\delta}}$ за максимальної витрати становить $\pm 0,72\%$ і $\pm 0,91\%$ відповідно для лічильників САМГАЗ G4 і METRIX G4 і обчислені як $\pm 3\sigma_{q_{\max}}$. Вихід похибок 3-го ПЛГ (САМГАЗ G4) і 4,5-го ПЛГ (METRIX G4) за межі діапазону $D_{\bar{\delta}}$ характеризує їх похибку при роботі за максимальних витрат і не є підставою для необхідності кореляції з цим діапазоном.

Встановлено можливість застосування методики метрологічного контролю ПЛГ за обмеженим діапазоном нормованих відтворюваних робочих витрат, оскільки різниця між розрахованою похибкою лічильників на максимальній витраті і експериментально визначеною на повірочній установці не перевищує 0,35% для ПЛГ моделі САМГАЗ G4 і 1,15% для ПЛГ моделі METRIX G4, що практично не перевищує половини

допустимої похибки ($\pm 2\%$) ПЛГ на максимальній витраті.

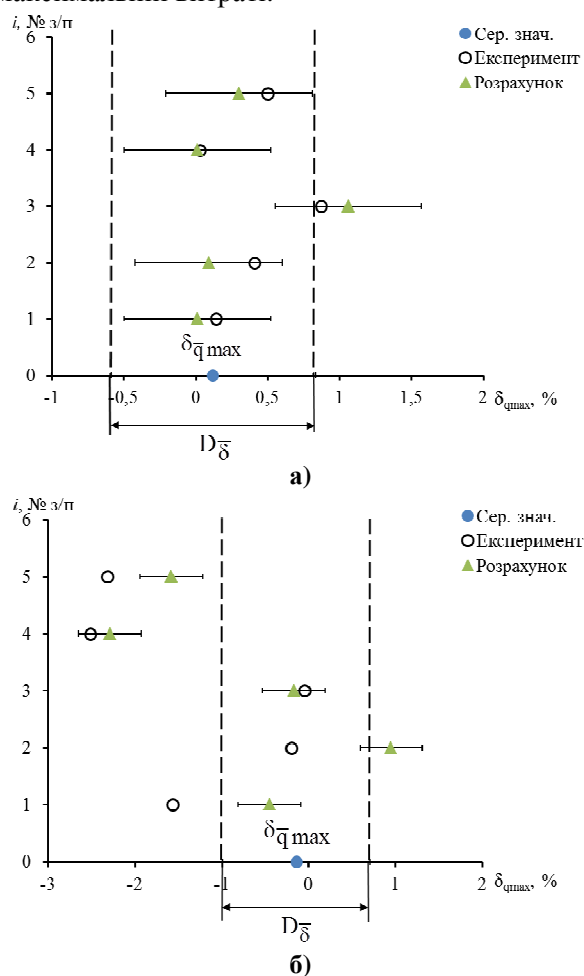


Рисунок 1 – Графічна ілюстрація результатів апробації метрологічного контролю ПЛГ моделей САМГАЗ G4 (а) і METRIX G4 (б)

Поряд з цим доцільним є проведення подальших досліджень з формуванням вибірок при визначенні середніх значень зміни похибок для двох діапазонів похибок ПЛГ $\pm 3\%$ і $(-3 \dots -6)\%$, що повинне зменшити методичну похибку визначення її розрахункового значення порівняно з фактичним експериментально встановленим значенням.

Висновки. Розроблена методика метрологічного контролю ПЛГ забезпечує можливість метрологічного оцінювання ПЛГ у всьому діапазоні нормованих витрат, включно з максимальною витратою, що передбачено нормативними документами України. При цьому стає можливим здійснювати метрологічні дослідження на місці експлуатації та із застосуванням природного газу як робочого

середовища. Запропонована методика метрологічного контролю ПЛГ також може бути застосована за умови їх демонтажу з місця експлуатації і застосування при цьому повірочних установок із повітряним робочим середовищем, до яких за таких умов зменшуються вимоги щодо верхнього діапазону робочих витрат. Практична реалізація запропонованої методики метрологічного контролю ПЛГ можлива після розроблення і затвердження відповідного нормативного документа.

Наведені результати апробації метрологічного контролю ПЛГ за обмеженим діапазоном робочих витрат підтвердили правильність і можливість такого методичного підходу для його практичного застосування.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [від 05.06.2014р., № 1314-VII: у редакції від 01.05.2019 р.].

2. ДСТУ 1359:2006. (EN 1359:1998, IDT). Лічильники газу мембранні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. IV, 45 с. (Національний стандарт України).

3. Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [від 15.01.2015 р., № 124-VIII].

4. Облік газу в дії: скільки газових лічильників встановлено в Україні. [Електронний ресурс] URL: <https://104.ua/ua/gas>

5. ДСТУ 3383:2015. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. [Чинний від 2016-01-01; на заміну ДСТУ 3383:2007]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. II, 5 с. (Національний стандарт України).

6. Постанова НКРЕКП "Про затвердження Кодексу газорозподільних систем" № 2494 від 30.09.2015 [із змінами: у редакції від 17.03.2020].

7. Середюк О. Є., Чеховський С. А., Винничук А. Г. Техніко-метрологічні засади побудови діагностувальних установок для побутових лічильників газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2006. № 6. С. 38–42.

8. Періодична повірка лічильників газу. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=18957> (дата звернення: 03.04.2020). Назва з екрану.

9. Лютенко Т. В., Середюк О. Є., Аналіз принципів побудови і технічних можливостей засобів для бездемонтажного метрологічного перевіряння побутових лічильників газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2016. №2 (37). С. 20-29.

10. ДСТУ 3607-97. Лічильники газу побутові. Правила приймання та методи випробувань. [Чинний від 1998-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1997. 24 с. (Державний стандарт України).

11. P50-071-98. Метрологія. Лічильники газу побутові. Методи та засоби повірки. [Чинний від 1998-03-27]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1998. III, 20 с. (Рекомендації).

12. ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. К.: Держстандарт України, 1995. 23 с. (Державний стандарт України).

13. Інструкція щодо обслуговування та експрес-контролю побутових лічильників газу, які знаходяться в експлуатації. Офіц. вид. [Затв. 1996–02–28. Держком. нафтової, газової та нафтопереробної промисловості]. К. 1996. 19 с.

14. МИ 2944-2005. ГСОЕИ. Счетчики газа бытовые. Методика поверки на месте эксплуатации с помощью эталонного счетчика. М.: Госстандарт России, 2005. 5с.

15. Спосіб повірки побутових лічильників газу / О. Є. Середюк, Т. В. Лютенко: пат. 116046 С2 Україна, МПК (2017.01) G01 F 25/00. № а201605643; заявл. 25.05.16; опубл. 25.01.18, Бюл. № 2.

16. Середюк О. Є., Винничук А. Г., Лютенко Т. В. Дослідження можливості оцінювання об'єму газу побутовими лічильниками у всьому діапазоні витрат з використанням статистичних методів. *Український метрологічний журнал*. 2018. №2. С. 34–45.

17. Наказ Мінекономрозвитку і торгівлі України "Про затвердження Порядку проведення повірки з законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів" № 193 від 08.02.2016.

18. Винничук А.Г., Середюк О.Є., Метрологічні дослідження перевіркою установок для побутових лічильників газу.

Нафтогазова енергетика. 2011. №1(14). С. 102-108.

References

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [від 05.06.2014р., № 1314-VII: у редакції від 01.05.2019 р.]. [in Ukrainian]

2. DSTU 1359:2006. (EN 1359:1998, IDT). Личильники газу мембранні. Загальні технічні умови. [Чинний від 2007-01-01]. Вyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2007. IV, 45 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy). [in Ukrainian]

3. Закон України «Про технічні регламенти та отсінку відповідності» [від 15.01.2015 р., № 124-VIII]. [in Ukrainian]

4. Облік газу в дії: скільки газів лічильників встановлено в Україні. URL: <https://104.ua/ua/gas> (data zvernennia: 11.03.2020). Назва з екрану. [in Ukrainian]

5. DSTU 3383:2015. Метрологія. Державна повітряна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу. [Чинний від 2016-01-01; на заміну DSTU 3383:2007]. Вyd. ofits. Kyiv: Minekonomrosvytku Ukrainy, 2015. II, 5 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy). [in Ukrainian]

6. Постанова НКРЕКП "Про затвердження Кодексу газорозподільних систем" № 2494 від 30.09.2015 [із змінами: у редакції від 17.03.2020]. [in Ukrainian]

7. Serediuk O. Ye., Chekhovskiy S. A., Vynnychuk A. H. Техніко-метрологічні засади побудови діагностувальних установок для побутових лічильників газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2006. No 6. P. 38–42. [in Ukrainian]

8. Periodychna povirka lichylnykyv hazu. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=18957> (data zvernennia: 03.04.2020). [in Ukrainian]

9. Liutenko T.V., Serediuk O.Ye., Analiz pryntsyviv pobudovy i tekhnichnykh mozhlyvostey zasobiv dlia bezdemontazhnogo metrolohichnogo pereviriannia pobutovykh lichylnykyv hazu. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2016. No 2 (37). P. 20-29. [in Ukrainian]

10. DSTU 3607-97. Личильники газу побутові. Правила приймання та методи

випробування. [Чинний від 1998-07-01]. Вyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 1997. 24 p. (Derzhavnyi standart Ukrainy). [in Ukrainian]

11. R50-071-98. Метрологія. Личильники газу побутові. Методи та засоби повірки. [Чинний від 1998-03-27]. Вyd. ofits. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 1998. III, 20 p. (Rekomendatsii). [in Ukrainian]

12. DSTU 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Термины та визначення. [Чинний від 1995-01-01]. K.: Derzhstandart Ukrainy, 1995. 23 p. (Derzhavnyi standart Ukrainy). [in Ukrainian]

13. Instruktsiia shchodo obsluhovuvannia ta ekspres-kontroliu pobutovykh lichylnykyv hazu, yaki znakhodiatsia v ekspluatatsii. Ofits. vyd. [Zatv. 1996–02–28. Derzhkom. naftovoi, hazovoi ta naftopererobnoi promyslovosti]. K. 1996. 19 p. [in Ukrainian]

14. MY 2944-2005. HSOEY. Schetchyky haza bitovie. Metodyka poverky na meste ekspluatatsiy s pomoshchiu etalonnogo schetchyka. M.: Hosstandart Rossyy, 2005. 5p. [in Russian]

15. Sposib povirky pobutovykh lichylnykyv hazu / O. Ye. Serediuk, T. V. Liutenko: pat. 116046 S2 Ukraina, MPK (2017.01) G01 F 25/00. № a201605643; zaiavl. 25.05.16; opubl. 25.01.18, Biul. No 2. [in Ukrainian]

16. Serediuk O.Ye., Vynnychuk A.H., Liutenko T.V. Doslidzhennia mozhlyvosti otsiniuvannia ob'єmu hazu pobutovymy lichylnykamy u vsomu diapazoni vytrat z vykorystanniam statystychnykh metodiv. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2018. No 2. P. 34–45. [in Ukrainian]

17. Nakaz Minekonomrosvytku i torhivli Ukrainy "Pro zatverdzhenia Poriadku provedennia povirky z zakonodavcho rehulovanykh zasobiv vymiriuvanoi tekhniki, shcho перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів" No 193 від 08.02.2016. [in Ukrainian]

18. Vynnychuk A.H., Serediuk O.Ye., Metrolohichni doslidzhennia perevirochnoi ustanovky dlia pobutovykh lichylnykyv hazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2011. No 1(14). P. 102-108. [in Ukrainian].

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.311:622.32

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-65-75

АНАЛІЗ ПОТОКІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ТИРИСТОРНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ НАПРУГИ

Б. Л. Грабчук, Ю. Ф. Романюк

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: grabchuk.bogdan@gmail.com; romanjukjf@ukr.net*

Проведено числовий аналіз потоків енергії в трифазовій системі електропостачання з джерелом синусоїдної ЕРС, активним навантаженням та тиристорним перетворювачем, який спотворює синусоїдну форму кривої напруги і генерує вищі гармоніки. Проаналізовано вплив несинусоїдності напруги на тиристорі на потоки енергії та коефіцієнт потужності джерела. Тиристор розглядається як нелінійний елемент, що перетворює частину електричної енергії, яка поступає в мережу від джерела живлення у вигляді первинного потоку на основній частоті, і повертає її назад в мережу у вигляді вторинного потоку енергії систем нульової послідовності та вищих гармонік, внаслідок чого знижується загальний коефіцієнт потужності та погіршується якість електроенергії. Проаналізовано вплив кількісного складу врахованих гармонік на точність розрахунку струмів і напруг. Встановлено залежність амплітуд вищих гармонік від кута керування тиристором. Найбільш вираженими в спектрі гармонік тиристора є постійна складова та друга гармоніка напруги. Показано, що у нелінійному колі з синусоїдним джерелом живлення у загальному випадку, навіть за відсутності в колі індуктивних і ємнісних електроприймачів, перша гармоніка струму джерела живлення відстає за фазою від ЕРС джерела. Таким чином, тиристор можна розглядати як реактивний індуктивний елемент, який споживає реактивну потужність на частоті основної гармоніки струму, незалежно від кута його керування та наявності в системі інших реактивних елементів. Тому з метою підвищення коефіцієнта потужності необхідно компенсувати реактивну потужність зсуву тільки на частоті основної гармоніки струму, яку повинні фіксувати електронні лічильники. Для характеристики впливу вторинного потоку енергії на загальний коефіцієнт потужності запропоновано використовувати відносне значення струму першої гармоніки джерела живлення. У чотирипровідній мережі наявність тиристорного перетворювача призводить до значного збільшення струму в нульовому проводі, навіть за симетричного навантаження фаз, через протікання струмів нульової послідовності гармонік, кратних трьом, що потрібно враховувати при виборі його перерізу та розрахунку втрат потужності. Запропоновані практичні заходи щодо обмеження рівня вищих гармонік і підвищення якості електроенергії.

Ключові слова: електрична мережа, система електропостачання, нелінійні електроприймачі, несинусоїдність напруги, вищі гармоніки, втрати потужності, нульовий провід.

Проведен численный анализ потоков энергии в трехфазной системе электроснабжения с источником синусоидальной ЭДС, активной нагрузкой и тиристорным преобразователем, который искажает синусоидальную форму кривой напряжения и генерирует высшие гармоники. Проанализировано влияние несинусоидальности напряжения на тиристоре на потоки энергии и коэффициент мощности источника. Тиристор рассматривается как нелинейный элемент, который преобразует часть электрической энергии, поступающей в сеть от источника питания в виде первичного потока на основной частоте, и возвращает ее обратно в сеть в виде вторичного потока энергии систем нулевой последовательности и высших гармоник, в результате чего снижается общий коэффициент мощности и ухудшается качество электроэнергии. Проанализировано влияние количественного состава учитываемых гармоник на точность расчета токов и напряжений. Установлена зависимость амплитуд высших гармоник от угла управления тиристором. Наиболее выраженными в спектре гармоник тиристора является постоянная составляющая и вторая гармоника напряжения. Показано, что в нелинейной цепи из синусоидальным источником питания в общем случае, даже при отсутствии в цепи индуктивных и емкостных электроприемников, первая гармоника источника питания

отстает по фазе от ЭДС источника. Таким образом тиристор можно рассматривать как реактивный индуктивный элемент, который потребляет реактивную мощность на частоте основной гармоники тока, независимо от угла его управления и наличия в системе других реактивных элементов. Поэтому с целью повышения коэффициента мощности необходимо компенсировать реактивную мощность сдвига только на частоте основной гармоники тока, которую должны фиксировать электронные счетчики. Для характеристики влияния вторичного потока энергии на общий коэффициент мощности предложено использовать относительное значение тока первой гармоники источника питания. В четырехпроводной сети наличие тиристорного преобразователя приводит к значительному увеличению тока в нулевом проводе, даже при симметричной нагрузке фаз, из-за протекания токов нулевой последовательности гармоник, кратных трем, что нужно учитывать при выборе его сечения и расчета потерь мощности. Предложены практические мероприятия по ограничению уровня высших гармоник и повышению качества электроэнергии.

Ключевые слова: электрическая сеть, система электроснабжения, нелинейные электроприемники, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, потери мощности, нулевой провод.

A numerical analysis of energy flows in a three-phase power supply system with a sine wave EMF source, active load and a thyristor converter that distorts the sine waveform and generates higher harmonics is performed. The influence of the thyristor non-sinusoidal voltage on the energy flows and the power factor of the source is analyzed. Thyristor converter is considered as a nonlinear electric power unit consuming electricity from the primary power source at a fundamental frequency, part of which is converted and returned back to the network as a secondary energy stream of zero-sequence systems and higher harmonics, thereby reducing the overall power factor and the quality of electricity becomes worse. It is analyzed the influence of the considered harmonics quantitative composition on the accuracy of the currents and voltages calculations. The dependence of the higher harmonics amplitudes on the thyristor firing angle is established. The constant component and the 2nd order harmonic voltage are the most denoted in the thyristor harmonics spectrum. In general case it is shown that in the nonlinear circuit with a sinusoidal power source, even in the absence of inductive and capacitive electric load, the fundamental current harmonic of the power source does not coincide in phase with the sinusoidal EMF of the source. Thus, the thyristor can be considered as a reactive inductive element that consumes reactive power of the fundamental frequency of current, regardless of the its firing angle and the presence of other reactive elements in the system. Therefore, in order to increase the power factor, it is necessary to compensate the reactive power of displacement only at the current fundamental frequency, which should be recorded by electronic meters. It is proposed to use the relative current value of the first harmonic of the power source to characterize the effect of the secondary energy flow on the total power factor. In a four-wire network, the presence of a thyristor converter causes a significant current increasing in the neutral wire, even under symmetrical phase loading, due to the zero sequence currents flowing, which are multiple of three, and they must be taken into account during wire cross-section selection and power losses calculation. It is proposed the practical measures to limit the level of higher harmonics and improve the electricity quality.

Keywords: electrical network, power supply system, nonlinear electric load, non-sinusoidal voltage, higher harmonics, power loss, neutral wire.

Постановка і актуальність проблеми

У системах електропостачання підприємств нафтогазової та інших галузей знаходять використання нелінійні електроприймачі, зокрема поширені пристрої силової електроніки з напівпровідниковими приладами, які використовують для перетворення змінного струму в постійний, чи зворотного перетворення, агрегати для регулювання напруги промислової частоти, тиристорні перетворювачі частоти змінного струму тощо. Наявність потужних нелінійних електроприймачів в мережах електропостачання з синусоїдними джерелами живлення призводить до того, що періодичні криві струмів і напруг в мережі можуть істотно відрізнятись від синусоїди. Це погіршує якість

електроенергії, призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення втрат в елементах системи та електроприймачах, знижує точність показів електровимірювальних приладів тощо. Тому дослідження спектрального складу напруг і струмів, що генерують нелінійні елементи, та розроблення заходів щодо зменшення спотворення кривих напруг і струмів з метою підвищення техніко-економічної ефективності роботи систем електропостачання є актуальними для сучасної електроенергетики.

Для аналізу процесів в системах з нелінійними приймачами несинусоїдні напруги і струми можна представити у вигляді рядів Фур'є, які в загальному випадку містять, крім першої (основної) гармоніки, постійну складову

(нульову гармоніку) та вищі гармоніки, що негативно впливає на роботу обладнання систем електропостачання. Рівень вищих гармонік залежить від потужності та типу нелінійних електроприймачів, схеми електропостачання й параметрів її елементів та нормується стандартом якості електричної енергії [1].

Під час розгляду енергетичних процесів у колах з нелінійними електроприймачами можна прийняти, що вони, споживаючи електричну енергію з мережі, частково перетворюють її та повертають назад у мережу. Енергія поступає в електричну мережу від джерела живлення у вигляді основного (первинного) потоку, що визначається симетричними системами напруг і струмів прямої послідовності основної частоти. Частина енергії перетворюється нелінійними електроприймачами та повертається назад у мережу у вигляді потоку енергії трифазних систем нульової та вищих гармонік, утворюючи вторинний потік енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням аналізу складу та впливу гармонік на якість електроенергії й техніко-економічні показники ефективності роботи систем електропостачання присвячена велика кількість наукових робіт [2-8] та інші. У роботі [2] проаналізовано вплив несинусоїдності напруги на роботу електроприймачів і обладнання електропостачальної системи та похибки електровимірювальних приладів і розглянуті можливі способи обмеження рівня гармонік. Взагалі теорію потужності в колах несинусоїдного струму остаточно не сформовано, хоч вона розглядається в чисельних публікаціях, детальний огляд і аналіз яких проведено в [5]. У роботі [7] наведені результати експериментальних досліджень енергетичних процесів у колах з нелінійними електроприймачами різних типів, проаналізовано спектральний склад гармонік і практично підтверджена необхідність врахування не тільки реактивної потужності, зумовленої наявності зсуву фаз між основною гармонікою струму та ЕРС джерела живлення, а й потужності, зумовленої струмами вищих гармонік і постійною складовою струму, що узгоджується з теоретичними дослідженнями, описаними в [5].

Невирішені частини загальної проблеми

Кількість і потужність нелінійних електроприймачів останнім часом істотно збільшилась з впровадженням нових технологій в електроенергетиці та промисловості. У зв'язку з цим підвищився рівень вищих гармонік, які генерують ці електроприймачі, що негативно впливає на ефективність роботи енергетичної системи в цілому. Тому проблема підвищення якості електроенергії є актуальною. У більшості робіт не достатньо уваги приділено чисельному аналізу потоків енергії в колах з нелінійними елементами та їх впливу на енергетичні показники електропостачальних систем, зокрема на втрати та коефіцієнт потужності джерела живлення. Невирішеним залишається питання правильного вибору потужності компенсуювальних установок для компенсації реактивної потужності навантаження з врахуванням наявної потужності спотворення в колах з нелінійними елементами, а також питання інструментального контролю реактивної потужності зсуву і потужності спотворення та їх стандартизації. У роботі [8] проведено аналіз потоків енергії в трифазній чотирипровідній системі електропостачання з ідеальними діодами та активним навантаженням і досліджено їх вплив на потоки потужності. Показано розрахунковим шляхом, що в такому колі вищі гармоніки генерують реактивну потужність спотворення, яка призводить до збільшення повної потужності та зниження коефіцієнта потужності джерела живлення. Реактивна потужність спотворення не може бути скомпенсована традиційними джерелами реактивної потужності і для її зменшення потрібно застосовувати спеціальні засоби для обмеження рівня вищих гармонік.

Мета та завдання досліджень

Метою цієї роботи є дослідження особливостей потоків енергії у трифазній електропостачальній системі з синусоїдною напругою джерела живлення, активними електроприймачами і нелінійними елементами – ідеальними тиристорами.

Основними завданнями досліджень є:

- розрахунок потужностей потоків енергії, втрат потужності в лінії живлення та додаткових втрат, зумовлених вторинним потоком енергії,

для заданих параметрів схеми електропостачання;

- аналіз впливу несинусоїдності напруг і струмів на повну потужність, реактивну потужність зсуву та потужність спотворення джерела живлення;

- дослідження впливу моменту керування тиристорів на зміну відносних значень амплітуд вищих гармонік та кути їх зсуву фаз відносно ЕРС джерела живлення;

- аналіз впливу кількісного складу врахованих гармонік на точність розрахунку параметрів режиму системи електропостачання;

- рекомендації щодо вдосконалення системи обліку електроенергії і компенсації реактивної потужності.

Результати досліджень

Проаналізуємо потоки електричної енергії в однофазному колі трифазної чотирипровідної системи електропостачання з джерелом синусоїдної ЕРС e , лінійними активними споживачами R_a і R_b та ідеальним тиристором T (рисунок 1).

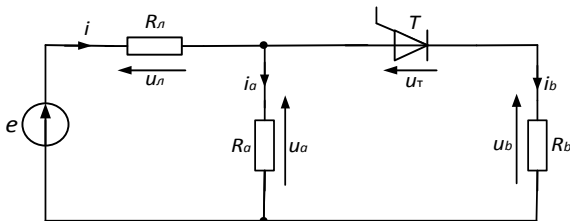


Рисунок 1 – Схема однофазного кола

Нехай

$u_b = 220\sqrt{2}\sin(\omega t) = 311,13 \sin(314,16t)$ В, $R_a = R_b = 20$ Ом, а опір лінії $R_n = 2$ Ом. Опір тиристора у відкритому стані приймемо рівним нулю, а у закритому – нескінченності. У момент, коли кут керування $\alpha_k = p\pi$, де $0 < p < 1$ (в момент керування $t_k = 0,5pT$), на тиристор подається керуючий сигнал, який відкриває тиристор.

У інтервалі часу $0 < t < t_k$ тиристор закритий, його опір $R_t = \infty$, $i_b = 0$, $i = i_a = 14,142 \sin(\omega t)$ А, $u_T = u_a = 282,843 \sin(\omega t)$ В, $u_n = 28,284 \sin(\omega t)$ В.

У інтервалі часу $t_k < t < 0,5T$ тиристор відкритий, його опір $R_t = 0$, $i = 25,927 \sin(\omega t)$ А, $i_a = i_b$, $u_T = 0$, $u_a = u_b = 259,27 \sin(\omega t)$ В, $u_n = 51,854 \sin(\omega t)$ В.

Графік зміни напруги на тиристорі за значення параметра відкриття $p = 0,25$ зображено на рисунку 2.

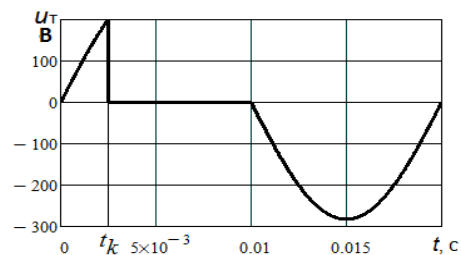


Рисунок 2 – Часова залежність напруги на тиристорі для значення параметра $p = 0,25$

Розкладемо напругу на тиристорі у ряд Фур'є, врахувавши гармоніки до шостої включно[^]

$$u_T = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{6m} \sin(6\omega t + \psi_6) = U_0 + \sum_{k=1}^6 U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = U_0 + B_1 \sin(\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) + \dots + C_1 \cos(\omega t) + C_2 \cos(2\omega t) + \dots = U_0 + \sum_{k=1}^6 (B_{km} \sin(k\omega t) + C_{km} \cos(k\omega t)).$$

$$U_0(p) = \frac{U_{tm}}{2\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin(\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\alpha) d\alpha \right);$$

$$B_k(p) = \frac{U_{tm}}{\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin(\alpha) \sin(k\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\alpha) \sin(k\alpha) d\alpha \right);$$

$$C_k(p) = \frac{U_{tm}}{\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin(\alpha) \cos(k\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin(\alpha) \cos(k\alpha) d\alpha \right).$$

Після інтегрування одержимо вирази для розрахунку коефіцієнтів A_0 , B_k , C_k ряду Фур'є напруги u_T тиристора:

$$A_0(p) = - \left(\frac{\cos(p\pi) + 1}{2\pi} U_{tm} \right);$$

$$\begin{aligned}
 B_1(p) &= \frac{(p+1)2\pi - \sin(2p\pi)}{4\pi} U_{\text{тм}}; & C_1(p) &= \frac{1 - \cos(2p\pi)}{4\pi} U_{\text{тм}}; \\
 B_2(p) &= \frac{2\sin^3(p\pi)}{3\pi} U_{\text{тм}}; & C_2(p) &= \frac{3\cos^2(0,5p\pi) - \cos^2(1,5p\pi)}{3\pi} U_{\text{тм}}; \\
 B_3(p) &= \frac{2\sin(2p\pi) - 4\sin(4p\pi)}{8\pi} U_{\text{тм}}; & C_3(p) &= \frac{2\sin^2(p\pi) - \sin^2(2p\pi)}{4\pi} U_{\text{тм}}; \\
 B_4(p) &= \frac{5\sin(3p\pi) - 3\sin(5p\pi)}{30\pi} U_{\text{тм}}; & C_4(p) &= \frac{5\cos(1,5p\pi) - 3\cos(2,5p\pi)}{15\pi} U_{\text{тм}}; \\
 B_5(p) &= \frac{3\sin(4p\pi) - 2\sin(6p\pi)}{24\pi} U_{\text{тм}}; & C_5(p) &= \frac{4\sin^2(3p\pi) - 6\sin^2(2p\pi)}{24\pi} U_{\text{тм}}; \\
 B_6(p) &= \frac{7\sin(5p\pi) - 5\sin(7p\pi)}{70\pi} U_{\text{тм}}; & C_6(p) &= \frac{7\cos^2(2,5p\pi) - 5\cos^2(3,5p\pi)}{35\pi} U_{\text{тм}}.
 \end{aligned}$$

Амплітуди та початкові фази синусоїдних гармонік відповідно дорівнюють

$$A_k(p) = \sqrt{B_k^2(p) + C_k^2(p)}, \quad \varphi_k(p) = \arctg\left(\frac{C_k(p)}{B_k(p)}\right),$$

а діюче значення напруги тиристора

$$U_{\text{т}}(p) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{p\pi} \sin^2(\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} \sin^2(\alpha) d\alpha \right)} U_{\text{тм}}.$$

Результати розрахунку амплітуд гармонік напруги тиристора (коефіцієнтів A_k ряду Фур'є) для деяких значень параметра p , який визначає кут керування α , наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Амплітуди гармонік напруги тиристора для різних значень параметра p та значення $U_{\text{тм}} = 282,84 \text{ В}$

p	$U_{\text{т}0}, \text{В}$	$U_{\text{т}1\text{м}}, \text{В}$	$U_{\text{т}2\text{м}}, \text{В}$	$U_{\text{т}3\text{м}}, \text{В}$	$U_{\text{т}4\text{м}}, \text{В}$	$U_{\text{т}5\text{м}}, \text{В}$	$U_{\text{т}6\text{м}}, \text{В}$
0	-90,031	141,42	60,021	0	12,004	0	5,145
0,125	-86,603	143,333	65,943	6,592	16,171	6,148	7,745
0,25	-76,846	155,901	75,495	22,508	17,067	16,776	8,537
0,5	-45,015	216,854	67,105	40,015	24,747	15,005	15,647
0,75	-13,185	270,929	24,59	22,508	19,829	16,776	13,608
1,0	0	282,84	0	0	0	0	0

Замінімо тиристор джерелом несинусоїдної напруги, яка дорівнює розкладеній в ряд Фур'є напрузі $u_{\text{т}}$ на тиристорі, і по чергово розрахуємо струми та напруги в колі при дії в ньому джерел кожної з частот окремо.

Розрахунок діючих значень струмів I_1, I_{a1}, I_{b1} , активних потужностей $P_{a1}, P_{b1}, P_{\text{л}1}$, які споживаються в колі на основній частоті, а також потужності $P_{\text{т}1}$ частини основного потоку енергії, яку тиристор перетворює і повертає

назад у коло, генеруючи вторинний потік енергії у вигляді нульової та вищих гармонік, виконаємо за схемою, наведеною на рисунку 3, а. Значення постійної складової I_0 , діючих значень струмів шести вищих гармонік I_k, I_{ak}, I_{bk} та потужностей $P_{\text{л}k}, P_{ak}, P_{bk}$, де $k = 0, 2, 3, 4, 5, 6$ – порядок гармоніки, розрахуємо за схемою рисунка 3, б. Результати розрахунку для значення параметра $p = 0,25$ наведені в таблиці 2.

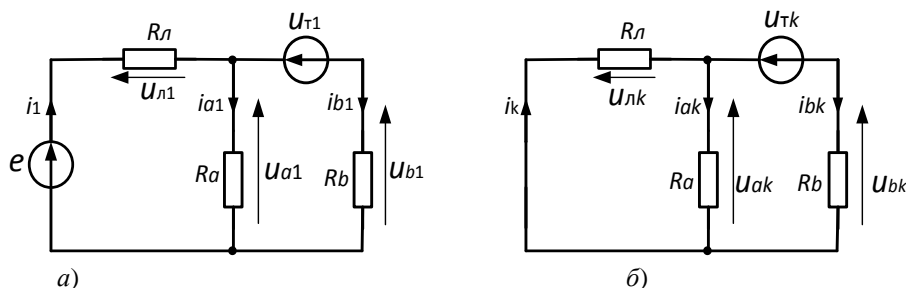


Рисунок 3 – Схеми для розрахунку перших гармонік (а) і нульової та вищих гармонік (б) струмів і напруг

Таблиця 2 – Діючі значення гармонік струмів та активні потужності потоків енергії у фазі трифазної чотирипровідної системи електропостачання за значення $p = 0,25$

k	I_k, A	I_{ak}, A	I_{bk}, A	$P_{ak}, Вт$	$P_{bk}, Вт$	$P_{lk}, Вт$	$\sum P_{prk}, Вт$	$P_{Tk}, Вт$
Струми та потужності первинного (основного) потоку енергії								
1	13,804	9,621	4,23	1851,4	357,9	381,1	2590,5	-442,94
Струми та потужності вторинного потоку енергії								
0	3,202	-0,320	3,522	2,051	248,09	20,505	270,66	-270,66
2	2,224	0,222	2,447	0,989	119,73	9,895	130,61	-130,61
3	-0,6631	0,0663	-0,7295	0,088	10,642	0,8795	11,61	-11,61
4	0,5029	0,0503	0,5531	0,051	6,12	0,506	6,677	-6,676
5	0,4943	0,0494	0,5437	0,049	5,919	0,489	6,45	-6,45
6	0,2515	0,0252	0,2767	0,01273	1,531	0,1265	1,67	-1,67
Σ				3,24	391,61	32,40	427,25	-427,68

Миттєві значення гармонік напруги тиристора для значення $p = 0,25$ дорівнюють:

$$U_{T0} = -76,846 \text{ В};$$

$$u_{T1}(t) = 155,901 \sin(\omega t + 8,301^\circ) \text{ В};$$

$$u_{T2}(t) = 75,495 \sin(2\omega t + 73,675^\circ) \text{ В};$$

$$u_{T3}(t) = 22,508 \sin(3\omega t) \text{ В};$$

$$u_{T4}(t) = 17,067 \sin(4\omega t + 5,912^\circ) \text{ В};$$

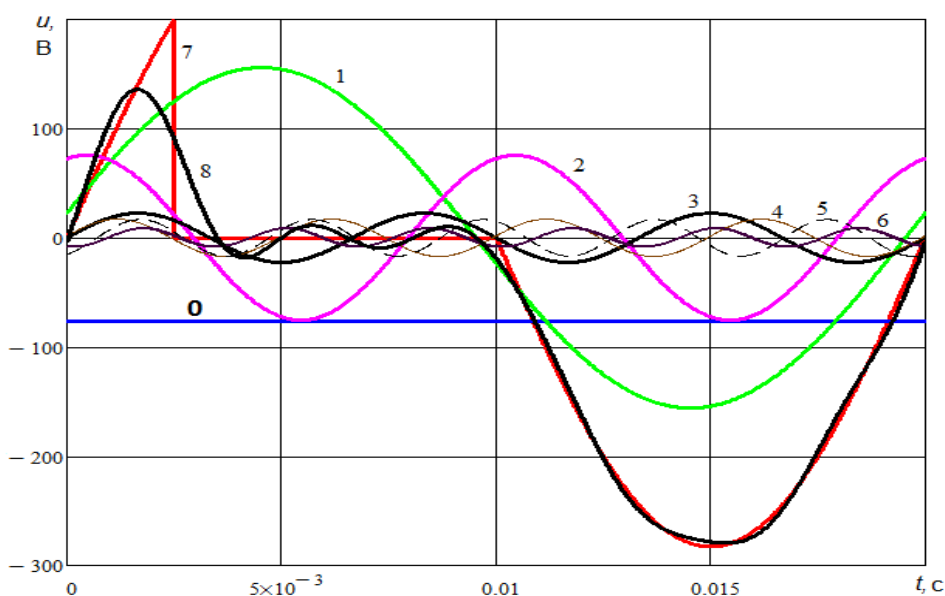
$$u_{T5}(t) = 16,776 \sin(5\omega t - 63,435^\circ) \text{ В};$$

$$u_{T6}(t) = 8,537 \sin(6\omega t - 102,302^\circ) \text{ В}.$$

Графіки часової зміни гармонік напруги тиристора $u_{T0} \div u_{T6}$, а також графіки фактичної (теоретичної) залежності напруги тиристора u_T та залежності напруги тиристора u_{TT} , як суми миттєвих

значень її перших шести гармонік з врахуванням постійної складової, зображені на рисунку 4.

Проаналізуємо, як впливає кількісний склад врахованих гармонік на точність розрахунку струмів і напруг. У таблиці 3 наведені діючі значення струмів і напруг, визначені через діючі значення їх гармонік до сьомої та одинадцятої включно. Як видно з таблиці 3, у разі врахування одинадцяти гармонік відносна різниця діючих значень струмів не перевищує 0,3%, а напруг – 1% порівняно з їх значеннями, визначеними з врахуванням семи гармонік.



0 – u_{T0} , 1 – u_{T1} , 2 – u_{T2} , 3 – u_{T3} , 4 – u_{T4} , 5 – u_{T5} , 6 – u_{T6} , 7 – u_T , 8 – u_{TT}

Рисунок 4 – Графіки зміни в часі напруги тиристора та її гармонік для значення $p = 0,25$

Таблиця 3 – Діючі значення струмів I, I_a, I_b і напруг U_T, U_a, U_b для значення $p = 0,25$

I, A		I_a, A		$I_b = I_T, A$		U_T, B		U_a, B	U_b, B
$I_{(7)}$	$I_{(11)}$	$I_{a(7)}$	$I_{a(11)}$	$I_{T(7)}$	$I_{T(11)}$	$U_{T(7)}$	$U_{T(11)}$	$U_{a(7)}$	$U_{b(7)}$
14,379	14,3873	9,6298	9,6299	6,1236	6,1474	145,58	147,05	192,5965	122,4714

Аналіз потоків енергії в системі електропостачання

Активна потужність потоків

Комплексна та активна потужності джерела ЕРС, від якого в коло поступає основний потік енергії з системою напруг і струмів основної частоти, відповідно дорівнюють:
 $S_{e1} = EI_1^* = 3033,4 + j145,86 \text{ ВА}; P_{e1} = 3033,4 \text{ Вт}.$

Активна потужність частини основного потоку енергії, яку споживають приймачі та яка втрачається в лінії на частоті першої гармоніки струму,

$$P_{nl} = P_{a1} + P_{b1} + P_{r1} = 2590,5 \text{ Вт}.$$

Комплексне значення потужності першої гармоніки тиристора

$S_{T1} = U_{T1} \cdot I_{T1}^* = P_{T1} + jQ_{T1} = 442,9 + j145,86 \text{ ВА}$ показує, що іншу частину активної потужності основного потоку енергії тиристор перетворює і повертає назад у коло вторинним потоком енергії, який складається з потоків енергії нульової та вищих гармонік, тобто тиристор є генератором цих гармонік. Потужність тиристора можна враховувати зі знаком «плюс», розглядаючи його як приймач електричної енергії основного потоку, чи зі знаком «мінус», оскільки він одночасно є генератором напруг і струмів вторинного потоку.

Сумарна активна потужність, яка споживається на основній частоті електроприймачами, втрачається в лінії та перетворюється тиристором, дорівнює активній потужності джерела живлення:

$$P_{e1} = P_{nl} + P_{T1} = 3033,4 \text{ Вт}.$$

Енергію вторинного потоку також споживають електроприймачі на частотах відповідних гармонік (за винятком основної) у вигляді додаткових втрат активної потужності. У разі врахування гармонік до шостої включно одержимо:

$P_{n(6)} = P_{n0} + P_{n2} + P_{n3} + P_{n4} + P_{n5} + P_{n6} = 427,7 \text{ Вт},$
 а якщо врахувати гармоніки до десятої включно, то $P_{n(10)} = 434,2 \text{ Вт},$ тобто точність розрахунку підвищується на 1,5%. Решта потужності

вторинного потоку (8,7 Вт) споживається в колі на гармоніках більш високого порядку.

Сумарна потужність, яка споживається в колі на частотах перших семи гармонік з врахуванням основної, $P_{n(7)} = P_{n0} + P_{n1} + P_{n2} + P_{n3} + P_{n4} + P_{n5} + P_{n6} = 3018 \text{ Вт},$ а у разі врахування одинадцяти гармонік одержимо $P_{n(11)} = 3024,6 \text{ Вт},$ тобто точність розрахунку підвищиться всього на 0,25%.

Таким чином, у випадку врахування одинадцяти гармонік відносна різниця між діючими значеннями струмів і напруг, а також потужностей не перевищує 1% порівняно з їх значеннями, одержаними у разі врахування семи гармонік. Отже, в нашому випадку з достатньою для практичних розрахунків точністю можна обмежитись врахуванням перших 6-7 гармонік.

Повна і реактивна потужності та потужність спотворення

Розрахунки показують, що в нелінійному колі з синусоїдним джерелом живлення у загальному випадку, навіть за відсутності в колі індуктивних і ємнісних приймачів, перша гармоніка струму джерела живлення не збігається за фазою з синусоїдною ЕРС джерела. У нашому випадку кут зсуву фаз φ_1 додатний і в інтервалі $0 < p < 0,55$ зростає з ростом параметра p (рисунок 5). У результаті джерело живлення генерує реактивну потужність, яка за значення $p = 0,25$ дорівнює $Q_{e1} = E I_1 \sin(\varphi_1) = 145,86 \text{ вар}.$ Відзначимо, що в колі з ідеальним діодом і синусоїдним джерелом живлення перші гармоніки струму і ЕРС джерела живлення збігаються за фазою і джерело живлення не генерує на першій гармоніці реактивну потужність [8].

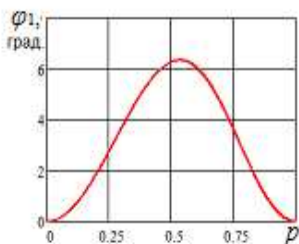


Рисунок 5 – Залежність кута зсуву фаз між ЕРС і струмом I_1 джерела живлення від параметра ρ

Перша гармоніка струму тиристора також відстає за фазою від його першої гармоніки напруги, а реактивна потужність тиристора дорівнює реактивній потужності першої гармоніки джерела ЕРС

$$Q_T = Q_{T1} = Q_{e1} = 145,86 \text{ вар},$$

тобто на першій гармоніці баланс реактивних потужностей забезпечується.

Повна потужність джерела живлення з врахуванням перших семи гармонік

$S_{e(7)} = EI = E\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2} = 3163,3 \text{ В}\cdot\text{А}$, а з врахуванням одинадцяти гармонік $S_{e(11)} = 3165,2 \text{ В}\cdot\text{А}$, тобто точність розрахунку підвищується незначно.

Повну потужність синусоїдного джерела живлення за наявності нелінійних електроприймачів у загальному випадку можна представити рівнянням [5]

$$S = EI = E\sqrt{\sum_0^{\infty} I_k^2} = \sqrt{P_e^2 + Q_e^2 + T_e^2}$$

де: $P_e = EI_1 \cos(\varphi_1)$ – активна потужність джерела, яка дорівнює середньому значенню потужності за період;

$Q_e = EI_1 \sin(\varphi_1)$ – реактивна потужність зсуву джерела, зумовлена зсувом фаз між ЕРС і першою гармонікою струму джерела, що має місце за наявності в колі реактивних елементів, а також зсувом фаз між ЕРС і першою гармонікою струму джерела, який виникає внаслідок перетворюючої дії нелінійних елементів;

$$T_e = E \sum_0^{\infty} I_k^2 \quad (k \neq 1) \quad - \text{ потужність}$$

спотворення, яка виникає в результаті спотворення кривої струму відносно синусоїдної кривої ЕРС, при цьому постійна

складова розглядається як гармоніка з нульовою частотою і зсувом фаз

$$\varphi_0 = 0.$$

Оскільки у колі, що розглядається, всі приймачі чисто резистивні, то всі гармоніки струмів приймачів збігаються за фазою з відповідними гармоніками напруг; коливання енергії між джерелом і приймачами відсутні, тому перша складова реактивної потужності зсуву з цієї причини відсутня. Проте тиристор перетворює частину енергії джерела і повертає її назад у коло у вигляді вторинного потоку. При цьому виникає зсув фаз між першою гармонікою струму та ЕРС джерела живлення і з'являється друга складова реактивної потужності зсуву джерела.

Обидві складові реактивної потужності зсуву Q_e і потужність спотворення T_e відрізняються за природою, але однаково впливають на повну потужність і коефіцієнт потужності, що є підставою розглядати їх як складові повної (сумарної) реактивної потужності

$$D_e = \sqrt{Q_e^2 + T_e^2},$$

де Q_e – реактивна потужність зсуву, зумовлена наявністю індуктивних і/чи ємнісних електроприймачів та зсувом фаз між першою гармонікою струму і ЕРС джерела внаслідок дії нелінійних елементів;

T_e – так звана реактивна потужність спотворення, зумовлена генерацією нелінійними елементами гармонік, відмінних від основної.

Обґрунтованість такого визначення реактивної потужності підтверджує той факт, що в основу алгоритму вимірювання реактивної потужності електронними лічильниками покладено [6] співвідношення

$$D_e = \sqrt{S_e^2 - P_e^2} = \sqrt{(EI)^2 - P_e^2}. \quad \text{Споживачі}$$

розраховуються з електропостачальником за спожиту активну електроенергію та за перетікання повної реактивної електроенергії, у тому числі за перетікання реактивної електроенергії спотворення, навіть за відсутності реактивного навантаження. Тому для споживачів важливо обмежити рівень вищих гармонік за допомогою спеціальних заходів.

У нашому випадку реактивна потужність спотворення джерела живлення з врахуванням

перших семи гармонік
 $T_{e(7)} = \sqrt{S_{e(7)}^2 - P_e^2 - Q_e^2} = 885,5$ вар, а у разі
 врахування одинадцяти гармонік $T_{e(11)} = 892,2$
 ВАр.

Повна реактивна потужність джерела живлення у разі врахування перших семи й одинадцяти гармонік відповідно дорівнює:

$$D_{e(7)} = \sqrt{Q_e^2 + T_{e(7)}^2} = 897,5 \text{ вар};$$

$$D_{e(11)} = \sqrt{Q_e^2 + T_{e(11)}^2} = 903,9 \text{ вар},$$

а повна потужність джерела:

$$S_{e(7)} = \sqrt{P_e^2 + D_{e(7)}^2} = 3163,3 \text{ ВА},$$

$$S_{e(11)} = \sqrt{P_e^2 + D_{e(11)}^2} = 3165,2 \text{ ВА}.$$

Комплексна потужність першої гармоніки тиристора $S_{T1} = U_{T1} I_{T1}^* = P_{T1} + jQ_{T1} = 442,9 + j145,86$ В·А = 466,3 евр 18,23° В·А.

Тиристор перетворює частину енергії джерела ЕРС і повертає її назад у коло у вигляді вторинного потоку енергії, потужність якого дорівнює дійсній частині комплексної потужності тиристора $P_T = P_{T1} = 442,9$ Вт. Реактивна потужність тиристора дорівнює реактивній потужності першої гармоніки джерела живлення $Q_T = Q_{e1} = 145,86$ вар. У той же час тиристор не споживає електричну енергію з кола, тобто ідеальний тиристор можна розглядати як чисто реактивний елемент.

Повна потужність, реактивна потужність спотворення та повна реактивна потужність тиристора у разі врахування перших семи гармонік відповідно дорівнюють:

$$S_{T(7)} = U_{T(7)} I_{T(7)} = 897,6 \text{ ВА};$$

$$T_{T(7)} = \sqrt{S_{T(7)}^2 - P_T^2 - Q_T^2} = 767 \text{ ВА};$$

$$D_{T(7)} = \sqrt{Q_T^2 + T_{T(7)}^2} = 780,7 \text{ ВА},$$

а у разі врахування одинадцяти гармонік одержимо:

$$S_{T(11)} = U_{T(11)} I_{T(11)} = 904 \text{ ВА};$$

$$T_{T(11)} = \sqrt{S_{T(11)}^2 - P_T^2 - Q_T^2} = 774,4 \text{ ВА};$$

$$D_{T(11)} = \sqrt{Q_T^2 + T_{T(11)}^2} = 788 \text{ ВА}.$$

Зауважимо, що повна потужність тиристора дорівнює повній реактивній потужності джерела живлення $S_T = D_e$.

Активна потужність, яка споживається в колі від синусоїдного джерела живлення,

визначається лише першою гармонікою струму і може бути представлена у вигляді:

$$P_e = E I_1 \cos(\varphi_1) =$$

$$EI \frac{I_1}{I} = EI k_\varphi \cos(\varphi_1) = EI \cos(\theta),$$

де $k_\varphi = I_1/I$ – коефіцієнт спотворення кривої струму; $\cos(\theta)$ – еквівалентний коефіцієнт потужності.

З ростом постійної складової та амплітуд вищих гармонік струму коефіцієнт спотворення зменшується, що призводить до зниження еквівалентного коефіцієнта потужності джерела живлення порівняно з випадком, коли за такого ж діючого значення струм є синусоїдний. Коефіцієнт спотворення струму джерела живлення можна використовувати для характеристики впливу гармонік вторинного потоку енергії на його еквівалентний коефіцієнт потужності.

Постійна складова та амплітуди вищих гармонік джерела живлення пропорційні амплітудам відповідних гармонік напруги тиристора. Найбільший вплив на коефіцієнт спотворення струму та відповідно на еквівалентний коефіцієнт потужності, має друга гармоніка напруги тиристора, амплітуда якої за $p = 0,25$ більше як утричі перевищує амплітуду наступної третьої гармоніки. Зі зміною параметра p амплітуда гармонік змінюється, але в діапазоні $0 < p < 0,5$ друга гармоніка напруги тиристора за амплітудою значно переважає інші вищі гармоніки (рисунок 6). У випадку симетричної трифазної системи електропостачання друга гармоніка утворює симетричні системи напруг і струмів зворотної послідовності, зменшуючи обертовий момент електродвигунів та підвищуючи втрати в них. З метою підвищення коефіцієнта потужності та зменшення втрат електроенергії при роботі в цьому діапазоні необхідно вживати заходи щодо зменшення, в першу чергу, другої гармоніки напруги. Одночасно це дозволить зменшити втрати електроенергії в лініях живлення споживачів.

Зниження рівня вищих гармонік в електропостачальних системах можна забезпечити шляхом застосування схемних рішень, наприклад, незалежним живленням нелінійних електроприймачів від різних секцій шин розподільних пристроїв або від різних віток зведеного реактора, а також застосуванням

шунтових резонансних фільтрів вищих гармонік (фільтрокомпенсувальних пристроїв), які на основній частоті одночасно виконують функцію компенсації реактивної потужності, а на інших частотах відфільтровують струми вищих гармонік, найбільш виражені в їх амплітудному спектрі. Крім того, можна застосувати активні фільтри, які компенсують реактивну складову струму першої гармоніки та вищі гармоніки струму навантаження. З метою обмеження рівня вищих гармонік в електропостачальних системах потрібно на законодавчому рівні зобов'язати виробників електротехнічної продукції комплектувати свої вироби фільтрами вищих гармонік. Компенсацію реактивної потужності потрібно здійснювати на частоті основної (першої) гармоніки. Для цього електронні лічильники обліку електроенергії повинні фіксувати реактивну потужність на основній частоті.

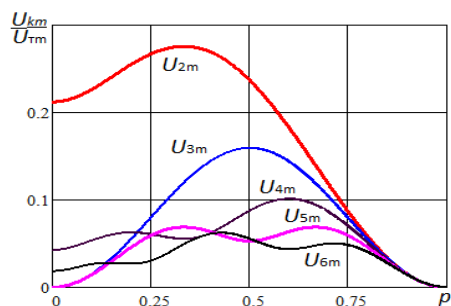


Рисунок 6 – Графічні залежності відносних значень амплітуд 2, 3, 4, 5, 6 гармонік напруги тиристора від параметра p

Під час аналізу енергетичних потоків у колах періодичного несинусоїдного струму несинусоїдні напруги можна замінити еквівалентними їм синусоїдами основної частоти, діючі значення яких дорівнюють діючим значенням відповідних несинусоїдних величин, а умовний кут зсуву фаз φ_e між еквівалентними синусоїдами струму і напруги приймають таким, щоб активна потужність, яка споживається колом, дорівнювала активній потужності несинусоїдного струму, тобто цей кут визначають з виразу $\cos(\varphi_e) = P/S = P/EI$.

У випадку чотирипровідного трифазного кола за наявності нелінійних електроприймачів через нульовий провід додатково протікають струми гармонік, кратних трьом, що утворюють симетричні системи нульової послідовності. Ці струми накладаються на струм першої

гармоніки, зумовлений несиметрією навантаження фаз, яке має місце в низьковольтних мережах. У результаті діюче значення струму в нейтральному проводі може значно перевищувати лінійні струми, що необхідно враховувати під час розрахунку сумарних втрат потужності та виборі перерізу нульового проводу.

У нашому випадку (для значень $U_{tm} = 282,84$ В і $p = 0,25$) діюче значення додаткового струму в нульовому проводі лінії живлення

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_6^2} = 9,84 \text{ А,}$$

а його відносне значення порівняно зі значеннями лінійних струмів, навіть у випадку симетричного навантаження, становить $I_N/I = 0,68$, а в колі з тиристором це відношення становить $I_N/I_b = 1,77$.

З метою зниження втрат від струмів нульової послідовності потрібно збільшити переріз нульового проводу або використати фільтри нульової послідовності.

Висновки

1. Розрахунковим шляхом показано, що у колі з тиристорним перетворювачем і активним навантаженням, навіть за відсутності індуктивних і ємнісних елементів, на відміну від кола з діодами, споживається не тільки реактивна потужність спотворення, зумовлена вищими гармоніками та постійною складовою струму, а й реактивна потужність зсуву, зумовлена першою гармонікою струму, що призводить до збільшення повної потужності та зниження коефіцієнта потужності.

2. З метою підвищення коефіцієнта потужності навантаження і зменшення втрат потужності потрібно компенсувати тільки складову реактивної потужності, зумовлену першою (основною) гармонікою струму. Для цього електронні лічильники обліку електроенергії повинні фіксувати, крім повної реактивної потужності, також реактивну потужність зсуву.

3. Показано, що в електропостачальній системі з тиристорними перетворювачами напруги з достатньою для практичних розрахунків точністю можна обмежитись врахуванням перших шести – семи гармонік.

4. Тиристри можна розглядати як індуктивні елементи, які споживають реактивну

потужність, так як кути зсуву фаз між першими гармоніками струму та ЕРС джерела живлення трифазної системи залишаються додатними в усьому діапазоні зміни кута керування тиристорів.

5. Проаналізовано вплив кута керування тиристорів на зміну відносних значень амплітуд вищих гармонік напруги. Показано, що найбільш виражена в амплітудному спектрі гармонік є друга гармоніка, яку потрібно компенсувати в першу чергу.

6. Запропоновані практичні заходи щодо обмеження рівня вищих гармонік та підвищення ефективності передачі електроенергії.

Список використаних джерел

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах общего назначения. Київ: Госстандарт Украины, 1997.

2. Власюк Н. Искажения в электросети с нелинейной нагрузкой – новая проблема энергетиков. *Электрик*. 2012. № 7. С. 46-49, № 8. С. 62-65.

3. Перхач В.С. Теоретична електротехніка: лінійні кола. Київ: Вища школа, 1992. 439 с.

4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 160 с.

5. Сегеда М.С. Электричні мережі та системи: підручник. Львів: Вдавництво Львівської політехніки, 2015. 540 с.

6. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. К.: Наукова Думка, 2005. 211 с.

7. Соломчак О.В., Гладь І.В. Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним

(нелінійним) навантаженням. *Енергетика і електрифікація*. 2008. № 6. С. 27-32.

8. Грабчук Б.Л., Романюк Ю.Ф. Аналіз потоків енергії в системах електропостачання з нелінійними приймачам. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. № 1 (42). С. 56-64.

References

1. GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah obshchego naznacheniya. K: Gosstandart Ukraini, 1997. [in Russian]

2. Vlasyuk N. Iskazheniya v elektroseti s nelineynoy nagruzkoy – novaya problema energetikov. *Elektrik*. 2012. No 7. P. 46-49, No 8. P. 62-65. [in Russian]

3. Perkhach V.S. Teoretychna elektrotehnika: liniini kola. Kyiv: Vyscha shkola, 1992. 439 s. [in Ukrainian]

4. Zhezhelenko Y.V. Vysshye harmonyky v systemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy. M.: enerhoatomyzdat, 2000. 160 p. [in Russian]

5. Seheda M.S. Elektrychni merezhi ta systemy: pidruchnyk. Lviv: Vdavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2015. 540 p. [in Ukrainian]

6. Shidlovskiy A.K., Zharkin A.F. Vyisshe garmoniki v nizkovoltnyih elektricheskikh setyah. K.: Naukova Dumka, 2005. 211 p. [in Russian]

7. Solomchak O.V., Glad I.V. Problemy rozrakhunku ta kompensakii reaktivnoi potuzhnosti v merezhakh z nesynusoidnym (neliniynym) navantazhenniam. *Enerhetyka i elektryfikatsiia*. 2008. No 6. P. 27-32. [in Ukrainian]

8. Hrabchuk B.L., Romaniuk Yu.F. Analiz potokiv enerhii v systemakh elektropostachannia z neliniinymy pryimacham. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2019. No 1 (42). P. 56-64. [in Ukrainian]

УДК 681.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-76-88

АНАЛІЗ ЗРОСТАННЯ ДЕБІТУ СВЕРДЛОВИНИ ЗА РАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ ДІАМЕТРА ФОНТАННИХ ТРУБ ДАШАВСЬКОГО ПСГ

О. Т. Чернова, Б. І. Гершун

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: m-oksana-t@ukr.net*

Науковці, аналізуючи результати роботи комплексу підземного зберігання газу України, стверджують, що для сучасних умов максимальну добову продуктивність необхідно збільшити на 30-35 %. Але, з початку створення газосховищ минуло більше 40 років, тож працюють вони на застарілому і фізично зношеному устаткуванні. При цьому, робота свердловин (які побудовані за старими технологіями на низьких пластових тисках) характеризується малою продуктивністю оскільки їх привибійна зона частково закольматована фільтратом бурового розчину, частково забруднена компресорним мастилом; через вибіркове розміщення свердловин на площі підземного сховища на деяких з них утворилися так звані "застійні" зони; відбирання усього активного об'єму газу здійснюється терміном 100-180 діб. Враховуючи необхідність для України у подальшому розвитку підземного зберігання газу, дії повинні бути спрямовані як на збільшення активного об'єму газу, так і добової продуктивності газосховищ.

Відзначено, що головними напрямками збільшення продуктивності газових сховищ є буріння горизонтальних стовбурів як у нових свердловинах, так і в "старих" за досвідом [1], утворення відкритих вибоїв при бурінні нових свердловин та фрезеруванням експлуатаційних колон у "старих" свердловинах, застосування надійних протипіскових фільтрів, гідророзриву пласта, будівництво свердловин великого діаметра, додаткова перфорація газонасичених інтервалів.

На даний час найважливішою проблемою стає реконструкція та модернізація діючих підземних сховищ шляхом заміни обладнання. Це дозволить не тільки зберегти досягнуті показники їх експлуатації, а й покращити. Внаслідок реконструкції обладнання покращиться підготовка газу, забезпечиться підвищення продуктивності газосховищ та знизяться експлуатаційні витрати. Отже, збільшення добової продуктивності ПСГ можна досягти, насамперед, шляхом удосконалення основного елемента на газосховищі – експлуатаційної свердловини.

Для аналізу даного питання у праці проведено аналіз ефективності заміни фонтанних труб свердловин Дашавського ПСГ на більший діаметр, представлені результати гідравлічного та техніко-економічного розрахунку впровадження даної реконструкції ПСГ.

Ключові слова: підземне сховище, свердловина, збільшений діаметр, фонтанні труби, привибійна зона, дебіт, гідравлічний опір, енергозбереження.

Ученые, анализируя результаты работы комплекса подземного хранения газа Украины утверждают, что для современных условий максимальную суточную производительность необходимо увеличить на 30-35%. Однако, с начала создания газохранилищ прошло более 40 лет, их работа осуществляется на устаревшем и физически изношенном оборудовании. При этом работа скважин (построенных по старым технологиям на низкие пластовые давления) характеризуется малой производительностью из-за того, что их призабойная зона частично закольматована фильтратом бурового раствора, частично загрязнена компрессорным маслом; из-за выборочное размещение скважин на площади подземного хранилища на некоторых из них образовались так называемые "застойные" зоны; отъема всего активного объема газа осуществляется сроком 100-180 дней. Учитывая необходимость для Украины в дальнейшем развитии подземного хранения газа это направление должен быть направлен как на увеличение активного объема газа, так и суточной производительности газохранилищ.

Отмечено, что главными направлениями увеличения производительности газовых хранилищ является бурение горизонтальных стволов как в новых скважинах, так и в "старых" по опыту [1], строение открытых забоев при бурении новых скважин и путем фрезерования эксплуатационных колонн в "старых" скважинах, применение надежных противопесчаных фильтров, гидроразрыва пласта, строительство скважин большого диаметра, дополнительная перфорация газонасыщенных интервалов.

В настоящее время важнейшей проблемой становится реконструкция и модернизация действующих подземных хранилищ путем замены оборудования. Это позволит не только сохранить достигнутые показатели их эксплуатации, но и улучшить их. Вследствие реконструкции оборудования улучшится подготовка газа, обеспечится повышение производительности газохранилищ и снизятся эксплуатационные расходы. Следовательно, увеличения суточной производительности ПХГ можно достичь, прежде всего, путем усовершенствования основного элемента на газохранилище - эксплуатационной скважины. Для анализа данного вопроса в работе проведен анализ эффективности замены фонтанных труб скважин Дашавского ПХГ на трубы большего диаметра, представлены результаты гидравлического и технико-экономического расчета внедрения данной реконструкции ПХГ.

Ключевые слова: подземное хранилище, скважина, увеличенный диаметр, фонтанные трубы, призабойной зона, дебит, гидравлическое сопротивление, энергосбережения.

Scientists who were analyzing the results of the underground gas storage (UGS) complex of Ukraine, say that for modern conditions the maximum daily productivity should be increased by 30-35%. Since the beginning of the creation of gas storage facilities passed than 40 years, work is carried on outdated and physically worn out equipment. Work of the wells (which were build based on the old technologies at low reservoir pressure) are characterized by low productivity because their bottomhole zone is partially occluded by the mud filtrate, partially contaminated with compressor oil; due to the selective placement of wells in the underground storage area, some of them were formed so-called "stagnant" zones; extraction of all active gas volume which takes 100-180 days. Need for Ukraine to further develop underground gas storage should be aimed at increasing both the active volume of gas and the daily productivity of gas storage facilities.

The main directions of increasing the productivity of gas storage are the drilling of horizontal shafts in both new wells and old ones in experience [9], the formation of open holes in the drilling of new wells and the milling of operational columns in the "old" drilled holes, filters, hydraulic fracturing, construction of large diameter wells, additional perforation of gas-saturated intervals.

Nowadays, the most important problem is the reconstruction and modernization of existing underground storage facilities through replacement of equipment. This will not only save the achieved performance, but also can improve it. Due to the reconstruction of the equipment, gas preparation will be improved, gas storage capacity will be increased and operating costs will be reduced. Therefore, an increase in the daily productivity of UGS can be achieved, first of all, due to the improvement of the main element in the gas storage facility - the operational well.

In order to analyze this issue, the paper analyzes the efficiency of replacing the fountain pipes of the Dashavsky UGS wells with a larger diameter, and presents the results of the hydraulic, technical and economic calculation of the implementation of this UGS reconstruction.

Keywords: underground storage, well, increased diameter, fountain pipes, bottomhole, flow rate, hydraulic resistance, energy saving.

Вступ

Одним з напрямків науково-технічного прогресу в нафтовій і газовій промисловості є аналіз чинників, що впливають на дебіт свердловини. Для збільшення дебіту свердловин застосовують різні методи впливу на вибій і їх комбінації.

В останні роки велика увага приділяється способу збільшення діаметра стовбура свердловини з метою видалення шарів породи, забрудненої буровим розчином і цементом. При розтині продуктивного пласта необхідно використовувати якісні бурові розчини на глинистій основі з подальшим видаленням глинистої кірки і закольматуючого шару породи.

Дво-три разове збільшення діаметра свердловини дозволяє практично повністю

відновити природну проникність пласта в привибійній зоні.

Розблокування пласта за рахунок видалення забруднень його екрану дозволяє експлуатувати свердловини при значно менших депресіях на пласт, що є важливим з точки зору зниження темпів обводнення свердловин при наявності підшовних вод. При цьому також поліпшується гідродинамічний зв'язок пласта зі свердловиною по всій його товщині незалежно від пошарової неоднорідності породи. Це в деякій мірі вирівнює швидкість фільтраційного потоку в привибійній зоні, а отже, знижує вірогідність обводнення свердловини за окремими пропластками.

Свердловини збільшеного діаметру в інтервалі продуктивного пласта в певних геологічних умовах дають суттєвий ефект усіх

розглянутих в статті показників: дебіту, депресії на пласт, градієнту тиску на стінці свердловини, енергозбереження, запобігання винесення піску.

Необхідно встановити на скільки даний метод є ефективним за результатами гідравлічного, технічного економічного розрахунків.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним з напрямків науково-технічного прогресу в газовій промисловості є питання вибору необхідного діаметра фонтанних труб, який суттєво впливає на продуктивність свердловини, її конструкцію, а відповідно і на техніко-економічні показники експлуатації ПСГ [2].

Багато практичних рішень питання заміни фонтанних труб на більший діаметр викладені в роботі [3].

У праці [4] аналізується вплив збільшеного діаметра стовбура на підвищення продуктивності свердловин. Вказується на те, що найбільші проблеми при експлуатації свердловин виникають у ґрунтах з великим вмістом піску. При наявності порожнечі такі породи можуть підлягати розмиванню, особливо при великому водяному факторі. Доводиться у праці, що свердловини збільшеного діаметру в інтервалі продуктивного пласта в певних гірничо-геологічних умовах дають суттєвий ефект по показниках: дебіту, депресії на пласт, градієнту тиску на стінку свердловини, енергозбереженню, запобіганню винесення піску.

Науковцями Тарко Я. Б. та Тарко Я. Я. говориться про те, що аналіз експлуатації свердловин нафтогазовидобувних підприємств України показує, що абсолютна більшість з них відноситься до низько дебітного фонду. Цілеспрямованість застосування в свердловинах гідроімпульсних методів впливу на призабійну зону пластів обґрунтовано в праці [5]. Описано пристрій і технологію збільшення продуктивності пластів шляхом створення в свердловинах високих миттєвих депресій.

Одним із методів збільшення дебіту і зменшення депресії на пласт, що особливо важливо для нестійких порід є буріння свердловини великого діаметру або розширення стовбура свердловини в інтервалі продуктивного пласта. Визначено в [6] в яких

саме випадках доцільно розширювати діаметр стовбура свердловини в інтервалі продуктивного пласта. За результатами дослідження зроблено висновок, що збільшення діаметра в інтервалі продуктивного пласта в певних гірничо-геологічних умовах дає найбільший ефект запобігання винесення піску з усіх розглянутих у статті показників: дебіт, депресія на пласт, градієнт тиску на стінці свердловини.

Питання підвищення продуктивності малодебітних свердловин аналізовано в [7]. Для цього проаналізовано існуючі методики розрахунку профіля і притоку до горизонтальної свердловини, наведений аналіз існуючих методів гідродинамічних обробок продуктивних пластів та розроблена методика розрахунку профіля свердловини, враховуючи експлуатаційну характеристику продуктивного нафтового пласта.

Але, дане питання потребує розгляду з конкретизацією для певних геологічних умов. Реальність сьогодення диктує ринкові умови діяльності підприємств і компаній усіх форм власності, в тому числі і газопромислових. Співпраця між такими підприємствами чи компаніями характеризується зростанням вимог до якості продукції, продуктивності праці, підвищення ефективності використання ресурсів ПСГ. Підвищення ефективності роботи ПСГ можливо в разі збільшення продуктивності сховища (наприклад за рахунок заміни фонтанних труб на більший діаметр).

Мета і задачі дослідження

Збільшення відбирання газу зі свердловин сприяє підвищенню техніко-економічних показників галузі [8]. При цьому необхідно враховувати геологічні, технологічні, технічні і економічні фактори, які обмежують збільшення видобутку.

Геологічні фактори:

- 1) руйнування недостатньо-стійких гірських порід (піски і слабощементовані пісковики) при значних витратах газу; частинки породи, рухаючись зі швидкістю 5-10 м/с, переважно не впливають на обладнання, але засмічують систему збирання та підготовки газу, що сприяє зменшенню товщини стінки труб і ємностей;
- 2) руйнування стінок труб і ємностей внаслідок того, що в місцях звужень, поворотів струменю газу (при наявності пробок у трубі і погано

закритих засувках) швидкість газу досягає значень швидкості звуку;

3) обвали привибійної частини пласта внаслідок видалення частини породи.

При обводненні продуктивність свердловин погіршується, ускладнюється робота обладнання, часто погіршується провідність колектора.

Великий вплив на інтенсивність експлуатації свердловин має нерівномірне просування крайових вод [9]. Тому параметри режиму газових свердловин у процесі розробки коректуються на основі даних гідрогеологічних та гідрохімічних спостережень. Відбір газу з деяких свердловин, що дренують пропластки і ділянки (де спостерігається небажане просування крайових вод) зменшується, в інших – збільшується.

Технологічні фактори.

1. Утворення гідратів у свердловині і в шлейфах. Для запобігання утворенню гідратів вибирають відповідний режим експлуатації.

2. Необхідність винесення з вибою свердловини конденсату важких вуглеводнів або води. Умова експлуатації у цьому випадку вважається приблизно сталою.

Технічні фактори: пропускна здатність системи, допустимі навантаження на обладнання, вібрація елементів системи, можливість змінання колони, розкриття верхніх вод і багато іншого. Вирішують ці питання з урахуванням конкретних умов експлуатації свердловини.

Економічні фактори. При справних свердловинах, газовому режимі покладу, стійких колекторах, правильно розрахованому обладнанні режим свердловини повинен забезпечити мінімум приведених витрат по системі в цілому за весь період розробки.

Якщо із свердловин відбирати надмірно великі кількості газу, то тиск на гирлі буде низьким. Доведеться рано вводити дотискувальну компресорну станцію (ДСК), мати дуже велику її потужність, застосовувати апарати і труби завищеного діаметру, що призведе до подорожчання собівартості газу. У даному випадку економічне обґрунтування режиму експлуатації свердловин збігається з обґрунтуванням оптимального варіанту

розробки покладу. На рисунку 1 показана схема, яка ілюструє мету і завдання збільшення діаметра свердловини, а також результати, які досягаються при цьому. Для досягнення поставленої цілі було вирішено провести розрахунок ефективності від заміни фонтанних труб на більший діаметр Дашавського ПСГ.

Матеріали і методи дослідження

Дашавське ПСГ створене на базі виснажених покладів Е і Г однойменного газового родовища, як пікове, з метою компенсації сезонної нерівномірності газоспоживання, а також для забезпечення надійності постачання природного газу за кордон, що здійснюється з 1973 року. Протягом всього періоду експлуатації підземного сховища характерна висока ефективність його роботи загалом, яка полягає у забезпеченні проектних об'ємів нагнітання та відбирання газу.

За час роботи Дашавського газового родовища і створення підземного сховища газу на площі пробурені 232 свердловини, з яких 96 були ліквідовані з різних причин. Крім того, на території ПСГ знаходиться 43 свердловини, глибиною до 50 м, призначені для анодного захисту підземних комунікацій. Згідно з технологічними схемами створення і експлуатації ПСГ, експлуатаційний фонд свердловин повинен був становити 106 свердловин. Були також 7 свердловин старого фонду, але при створенні ПСГ більшість з них використовували як експлуатаційно-нагнітальні.

Протягом 1975-1978 років на покладах "Г" та "Е+Г" було встановлено першу чергу нових 16 свердловин, а другу чергу – 82 свердловин протягом наступних 10 років.

Для роботи ПСГ було пробурено 98 експлуатаційно-нагнітальні свердловини. На початку 2010 року фонд свердловин уже становив 136 одиниць (99–експлуатаційно-нагнітальних, 7–спостережних, 10–контрольних, 17–контрольно-розвантажувальних). Збільшення фонду відбулося за рахунок 109 свердловин старого фонду, що розкривали поклад "Г". На території підземного сховища знаходиться також 43 свердловини глибиною до 50 м, які призначені для анодного захисту підземних комунікацій.

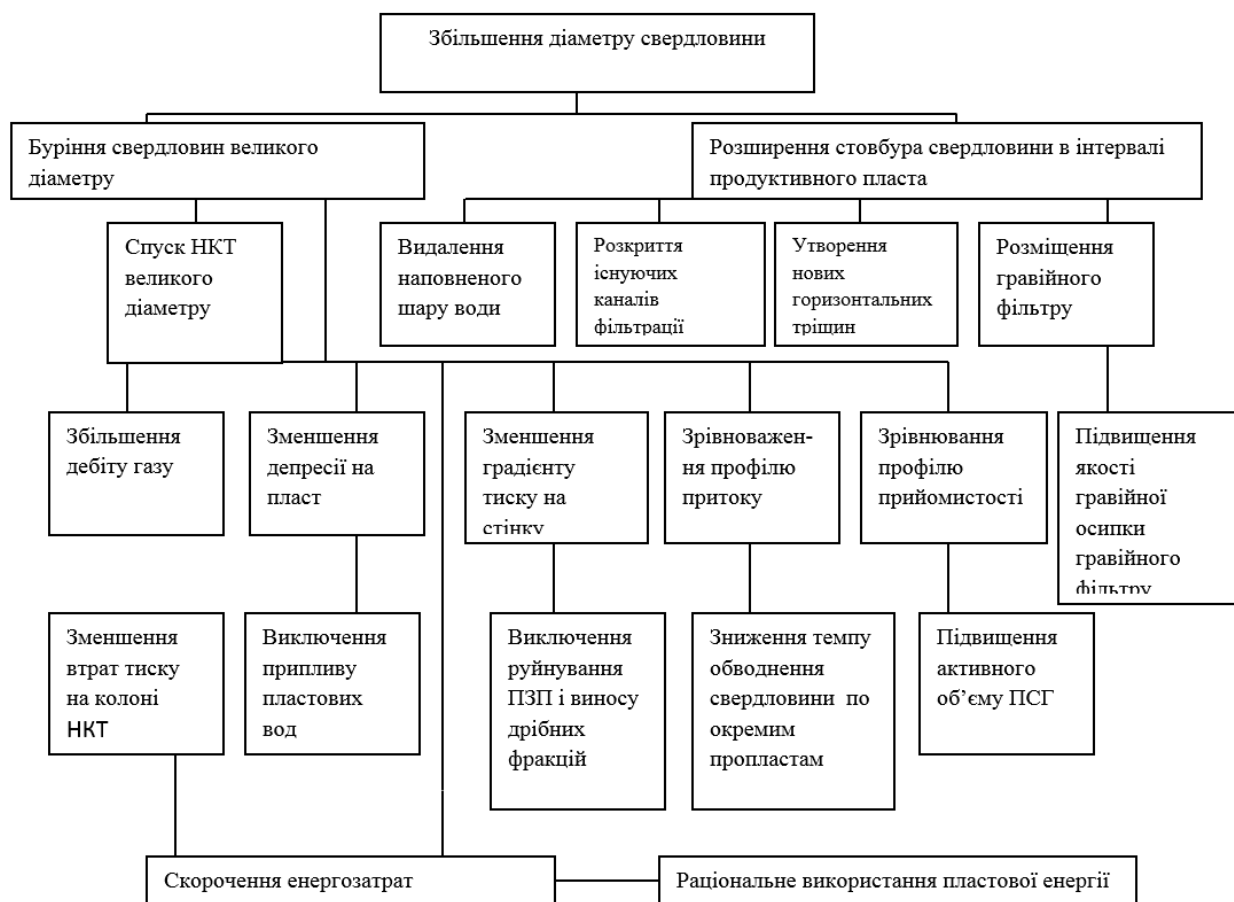


Рисунок 1 – Мета, завдання та результати збільшення діаметра свердловини

Свердловини старого фонду 66, 72, 75 мають одноколонну конструкцію. Вони тривалий час використовувались для розробки Дашавського газового родовища. На початку створення ПСГ дані свердловини працювали як експлуатаційно-нагнітальні, а з часом були ліквідовані та переведені в контрольньо-геофізичні [10].

Враховуючи ці обставини, свердловини поділені на дві категорії. Свердловини першої категорії, пробурені в довоєнні і воєнні роки. Проміжні і експлуатаційні колони в них забутовані замість цементування. Свердловини другої категорії, відрізняються наявністю хвостовиків, відсутністю цементу за колонами, або підйомом цементу нижче ніж 300 м від гирла, також відсутність обсадних труб.

Основна кількість свердловин пробурена в період з 1924 до 1947 року. Багато свердловин пробурено ударним методом, без цементування

обсадних колон. У зв'язку із цим, ці свердловини вимагають особливої уваги, вивчення технічного стану і контролю за можливими міжпластовими перетоками і шляхами неконтрольованих витоків газу із ПСГ на поверхню.

Як видно з наведеного аналізу на даний час стоїть гостра необхідність покращення техніко-економічних показників експлуатації ПСГ. Для цього, потрібно забезпечити раціональні режими роботи свердловин, збільшити їх добовий дебіт та підвищити надійність функціонування. Нормальна експлуатація ПСГ пов'язана з регулярними дослідженнями та вивченням стану свердловин, аналізом їх роботи.

Часто при видобуванні вуглеводневої сировини приплив рідини і газу у свердловини недостатній. У таких свердловинах для збільшення припливу або поглинання газу чи

рідини застосовують штучний вплив на породи привибійної зони з метою підвищення їх проникності.

Проникність привибійної зони збільшують шляхом штучно створюваних каналів розчинення карбонатів і глинозему у продуктивному пласті солянокислотою, термокислотою і глинокислотою обробкою; очищення порового простору від мулистих і смолистих матеріалів; створення штучних або розширенням природних тріщин у породах при гідравлічному розриві пласта або при вибуху торпед на вибої; видалення парафінів, солей і смол, які осіли на стінках порових каналів або стовбура свердловини, а також шляхом зниження в'язкості нафти методами термохімічної обробки свердловин і теплового впливу на привибійну зону.

Для детальнішого розгляду методики збільшення діаметру свердловин розглянемо зміну дебіту свердловини, депресії на пласт і градієнту тиску на стінці свердловини [11].

Для детальнішого розгляду методики збільшення діаметру свердловин розглянемо зміну дебіту свердловини, депресії на пласт і градієнту тиску на стінці свердловини [11].

Рівняння припливу флюїду при нелінійному законі фільтрації до свердловини має вигляд

$$\Delta p^2 = AQ + BQ^2 \quad (1)$$

де: $\Delta p^2 = p_{\text{пл}}^2 - p_{\text{заб}}^2$,

$p_{\text{пл}}$ - пластовий тиск,

$p_{\text{заб}}$ - забійний тиск,

Q - дебіт флюїду,

A, B – коефіцієнти фільтраційних опорів.

Коефіцієнти A і B можна записати у вигляді

$$A = a \ln \frac{R_k}{r_c}, \quad (2)$$

$$B = b \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_k} \right), \quad (3)$$

де a і b – коефіцієнти, що залежать від товщини пласта, фізичних властивостей флюїду і фільтраційних властивостей пласта,

R_k – радіус зони дронування пласта свердловиною,

r_c - радіус свердловини по долоту.

Зазвичай $R_k \gg r_c$, тоді

$$B = \frac{b}{r_c}, \quad (4)$$

Збільшення діаметра свердловини в n раз змінює коефіцієнти фільтраційних опорів до значень

$$A' = a \left(\ln \frac{R_k}{r_c} - \ln n \right), \quad (5)$$

$$B' = \frac{b}{r_c \cdot n}. \quad (6)$$

Або

$$A' = \delta_a \cdot A, \quad (7)$$

$$B' = \delta_b \cdot B, \quad (8)$$

де δ_a і δ_b - коефіцієнти, що враховують геометрію забою свердловини

$$\delta_a = 1 - \frac{\ln n}{\ln \frac{R_k}{r_c}}, \quad (9)$$

$$\delta_b = \frac{1}{n}. \quad (10)$$

Рівняння припливу до свердловини збільшеного діаметру при збереженні дебіту представляється у вигляді

$$(\Delta p^2)' = A' Q_0 + B' Q_0^2, \quad (11)$$

$$(\Delta p^2)' = A' Q_0 \delta_a + B' Q_0^2 \delta_b. \quad (12)$$

Депресію на пласт в явному вигляді можна визначити як:

$$\Delta p_{\text{пл}} = p_{\text{пл}} - \sqrt{p_{\text{пл}}^2 - \Delta p^2}. \quad (13)$$

$$\Delta p_{\text{пл}}' = p_{\text{пл}} - \sqrt{p_{\text{пл}}^2 - (\Delta p^2)'} \quad (14)$$

Чотири попередні формули дозволяють оцінити ступінь зменшення депресії на пласт

$$\delta_{\Delta p} = \frac{\Delta p_{\text{пл}}'}{\Delta p_{\text{пл}}} = \frac{\delta_a + \frac{B}{A} Q_0 \delta_b}{1 + \frac{B}{A} Q_0}. \quad (15)$$

При $Q_0 \rightarrow 0$ $\delta_{\Delta p} = \delta_a$, при $Q_0 \rightarrow \infty$ $\delta_{\Delta p} = \delta_b$, з формул розраховуємо дебіт свердловини при збереженні депресії на пласт:

$$Q = \frac{A}{2B} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{B}{A^2} \Delta p^2} - 1 \right). \quad (16)$$

$$Q' = \frac{A \cdot \delta_a}{2B \cdot \delta_b} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{B \cdot \delta_b}{A^2 \cdot \delta_a^2} \Delta p^2} - 1 \right). \quad (17)$$

Відповідно отримуємо степінь збільшення дебіту свердловини

$$\delta_Q = \frac{Q'}{Q} = \frac{\delta_a}{\delta_b} \cdot \frac{\sqrt{1 + 4 \frac{B \cdot \delta_b}{A^2 \cdot \delta_a^2} \Delta p^2} - 1}{\sqrt{1 + 4 \frac{B}{A^2} \Delta p^2} - 1}. \quad (18)$$

При $Q_0 \rightarrow 0$, $\delta_Q = \frac{1}{\delta_a}$, а при $Q_0 \rightarrow \infty$, $\delta_Q = \frac{1}{\sqrt{\delta_b}}$.

Градієнт тиску при фільтрації флюїду визначається за формулою

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu \cdot v}{K} + \beta \frac{p \cdot v^2}{\sqrt{K}}, \quad (19)$$

де μ - коефіцієнт динамічної в'язкості флюїду в пластових умовах;

v - швидкість фільтрації;

K - коефіцієнт проникності;

β - коефіцієнт вихрових опорів;

ρ - щільність флюїду в пластових умовах.

Враховуючи, що максимальне значення градієнту тиску має місце на стінці свердловини, швидкість фільтрації буде

$$v = \frac{Q}{2\pi \cdot r_c \cdot h}, \quad (20)$$

де h - товщина пласта.

Тоді рівняння градієнту тиску при фільтрації буде мати вигляд

$$\frac{dp}{dr} \Big|_{r=r_c} = \frac{\mu Q}{2\pi K h r_c} + \beta \frac{p Q^2}{4\pi^2 \sqrt{K} h^2 r_c^2} \quad (21)$$

Або

$$\frac{dp}{dr} \Big|_{r=r_c} = \frac{1}{2r_c} \left(\frac{A}{\ln \frac{R_k}{r_c}} Q + B \cdot Q^2 \right). \quad (22)$$

Збільшення діаметру свердловини в n раз зменшує градієнт тиску до величини

$$\left(\frac{dp}{dr} \right)' \Big|_{r=r_c} = \frac{\mu Q}{2\pi K h r_c \cdot n} + \beta \frac{p Q^2}{4\pi^2 \sqrt{K} h^2 r_c^2 n^2} \quad (23)$$

або

$$\left(\frac{dp}{dr} \right)' \Big|_{r=r_c} = \frac{1}{2r_c} \left(\frac{A}{n \ln \frac{R_k}{r_c}} Q + \frac{B Q^2}{r_c n^2} \right). \quad (24)$$

Степінь зменшення градієнту тиску

$$\delta_{\text{град}} = \frac{\left(\frac{dp}{dr} \right)'}{\frac{dp}{dr}}, \quad (25)$$

або

$$\delta_{\text{град}} = \frac{\delta_a + \frac{B}{A} \ln \frac{R_k}{r_c} Q \delta_b}{\left(1 + \frac{B}{A} \ln \frac{R_k}{r_c} Q \right)}. \quad (26)$$

У таблиці 1 наведені результати розрахунку значень δQ , $\delta \Delta p$ і $\delta_{\text{град}}$ при кратності збільшення діаметра свердловини $n=2$; 3; 4 і різних значеннях дебіту флюїду Q . Розрахунки при $Q \rightarrow 0$ відповідають лінійним законам Дарсі [9], а при $Q \rightarrow \infty$ - квадратичному закону А.А. Краснопольського. З таблиці 1 випливає, що зі збільшенням діаметра стовбура свердловини в інтервалі продуктивного пласта дебіт свердловини збільшується, депресія на пласт зменшується, значно знижується градієнт тиску на стінці свердловини.

Однак, буріння свердловин великого діаметру вимагає великих капітальних вкладень.

Тому, проаналізувавши свердловини Дашавського ПСГ, буде більш економічніше замінити фонтанні труби меншого діаметру на більший.

Таблиця 1 – Степінь зміни дебіту свердловини, депресії на пласт і градієнту тиску

n	Q → 0			Q = 100 м ³ /добу			Q = 250 м ³ /добу			Q → ∞		
	δΔр	δQ	δград	δΔр	δQ	δград	δΔр	δQ	δград	δΔр	δQ	δград
2	0,91	1,10	0,45	0,72	1,28	0,26	0,62	1,34	0,26	0,50	1,41	0,25
3	0,86	1,16	0,28	0,60	1,47	0,13	0,49	1,59	0,12	0,33	1,73	0,11
4	0,82	1,22	0,21	0,55	1,61	0,08	0,42	1,79	0,07	0,25	2,00	0,06

Свердловинам Дашавського ПСГ характерне розкриття всього інтервалу пласта-колектора з щільністю перфорації 20 отв./м, фонтанні труби повинні забезпечувати винесення рідких і твердих речовин з вибою свердловини, що забезпечується швидкістю потоку газу:

$$v = 0,52 \frac{QTZ}{d_{\phi} P_{\text{виб}}}, \quad (27)$$

де, Q – продуктивність свердловини за ст. умов, тис. м³/добу;

T – температура абсолютна на вибої свердловини, К;

Z – коефіцієнт стисливості газу;

d_{ϕ} – внутрішній діаметр фонтанних труб, см;

$P_{\text{виб}}$ – абсолютний тиск на вибої свердловини, кг/см².

Дашавське псг обладнане 80-ма свердловинами з фонтанними трубами, діаметром стволу 114 мм, 15-ма свердловинами з ФТ діаметром 89 мм і 4-ма свердловинами з ФТ – 73 мм. Щоб визначити, на скільки збільшиться середня продуктивність свердловини в наслідок заміни в них ФТ на більший діаметр, необхідно за формулою

$$v = 0,52 \frac{QTZ}{d_{\phi} P_{\text{виб}}}, \quad (28)$$

де Q – продуктивність свердловини за ст. умов, тис. м³/добу;

T – температура абсолютна на вибої свердловини, К;

Z – коефіцієнт стисливості газу;

d_{ϕ} – внутрішній діаметр фонтанних труб, см;

$P_{\text{виб}}$ – абсолютний тиск на вибої свердловини, кг/см².

Визначити середню швидкість руху газу по ФТ, яка становить:

• для ФТ 73 мм $v = 10,4 - 14,9$ м/с,

• для ФТ 89 мм $v = 9,0 - 12,0$ м/с,

• для ФТ 114 мм $v = 5,7 - 7,2$ м/с.

Згідно дослідних даних винесення рідких і твердих речовин з вибою свердловини відбувається в діапазоні швидкостей 5-10 м/с. Які підтверджують результати розрахунків, фактичні середні значення для ФТ діаметром 73 мм і 89 мм, дозволяють здійснити їх заміну на ФТ більшого діаметра, при цьому середні швидкості руху газу в ФТ забезпечать винесення рідких і твердих речовин з вибою свердловини.

Записавши формулу для визначення дебіту при відомих швидкостях, які зв'язані з фактичними дебітами і вибійними тисками, отримаємо результати наведені в табл. Для аналізу впливу діаметра ФТ на гідравлічні втрати, визначимо гірловий тиск на заданому вибійному тиску і дебіті за формулою

$$P_{\text{гир}} = \sqrt{\frac{P_{\text{виб}}^2}{e^{2S}} - 1,377\lambda_{\text{ФТ}} \frac{z^2 T_{\text{сер}} e^{2S} - 1}{d_{\text{ФТ}}^5 e^{2S}}} q^2}, \quad (29)$$

де $P_{\text{виб}}$ – тиск на вибої свердловини, кг/см²;

$\lambda_{\text{ФТ}}$ – коефіцієнт гідравлічного опору для ФТ;

$T_{\text{сер}}$ – середня темп в колоні ФТ, К;

$d_{\text{ФТ}}$ – внутрішній діаметр ФТ, см;

q – дебіт свердловини зведений до ст. умов, тис. м³/добу;

$S = 0,03415 \frac{L\Delta}{T_{\text{сер}}Z}$ – коефіцієнт, який залежить

від довжини колони L. Результати розрахунку наведено в таблиці 2.

Дані таблиць 2 та 3 зображено графічно на рисунках 2, 3, 4, які демонструють суттєвий ріст дебіту свердловин, в наслідок заміни фонтанних труб на більший діаметр і зменшення гідравлічних втрат на тертя по довжині колони ФТ.

Розрахунок ефективності від заміни ФТ на більший діаметр проведемо для вище згаданих 19-ти свердловин. На основі проведених розрахунків і даних таблиці визначено середні значення дебіту для всіх типорозмірів фонтанних труб:

- для ФТ діаметром 73 мм $Q_{\text{сеп}}=107,4$

тис. м³/добу,

- для ФТ діаметром 89 мм $Q_{\text{сеп}}=131,9$

тис. м³/добу,

- для ФТ діаметром 114 мм $Q_{\text{сеп}}=161,2$ тис. м³/добу.

У середньому, внаслідок заміни ФТ діаметром 73 мм на ФТ діаметром 89 мм, продуктивність однієї свердловини зростає на 24,5 тис. м³/добу, а заміни ФТ діаметром 89 мм на ФТ діаметром 114 мм – середня продуктивність однієї свердловини збільшиться на 29,3 тис. м³/добу. Якщо замінити ФТ діаметром 73 мм на ФТ 114 мм, то середній приріст продуктивності становитиме 53,8 тис. м³/добу.

Таблиця 2 – Розрахунок продуктивності свердловини для змінного діаметра ФТ і вибірного тиску

ФТ D=73 мм і d _{внут} =62 мм		ФТ D=89 мм і d _{внут} =75.9 мм		ФТ D=114.3 мм і d _{внут} =100.3 мм	
P _{виб} , атм	Q, тис.м ³ /добу	P _{виб} , атм	Q, тис.м ³ /добу	P _{виб} , атм	Q, тис.м ³ /добу
18	56.2	18	69.0	18	84.3
20	63.1	20	77.5	20	94.7
25	79.7	25	97.9	25	119.6
30	96.6	30	118.7	30	145.0
35	113.9	35	140.0	35	171.0
40	131.6	40	161.7	40	197.6
45	149.7	45	183.9	45	224.7
50	168.2	50	206.6	50	252.5
	$Q_{\text{сеп}}=107.4$		$Q_{\text{сеп}}=131.9$		$Q_{\text{сеп}}=161.2$

Таблиця 3 - Розрахунок гідравлічних витрат тиску для змінного діаметра ФТ, продуктивності і гирлового тиску.

ФТ D=73 мм і d=62 мм					ФТ D=89 мм і d=75.9 мм						ФТ D=114.3 мм і d=100.3 мм						
P _{виб} =18 ата			P _{виб} =50 ата		P _{виб} =18 ата			P _{виб} =50 ата			P _{виб} =18 ата			P _{виб} =50 ата			
Q	P _y	Q	P _y	ΔP	Q	P _y	ΔP	ΔP	Q	P _y	ΔP	Q	P _y	ΔP	Q	P _y	ΔP
50	15.1	50	16.9	1.1	50	47.5	2.5	2.9	50	46.8	3.2	50	16.4	1.6	50	47.3	2.7
100	5.5	100	16.5	1.5	100	47.3	2.7	12.5	100	44.7	5.3	100	14.2	3.8	100	46.6	3.4
150	-	150	15.6	2.4	150	47.0	3.0	-	150	40.9	9.1	150	9.3	8.7	150	45.3	4.7
200	-	200	14.3	3.7	200	46.6	3.4	-	200	34.8	15.2	200	-	-	200	43.5	6.5
250	-	250	12.5	5.5	250	46.1	3.9	-	250	24.9	25.1	250	-	-	250	41.1	8.9
300	-	300	9.8	8.2	300	45.4	4.6	-	300	-	-	300	-	-	300	37.9	12.1
350	-	350	5.1	12.9	350	44.6	5.4	-	350	-	-	350	-	-	350	33.7	16.3
400	-	400	-	-	400	43.7	6.3	-	400	-	-	400	-	-	400	28.2	21.8

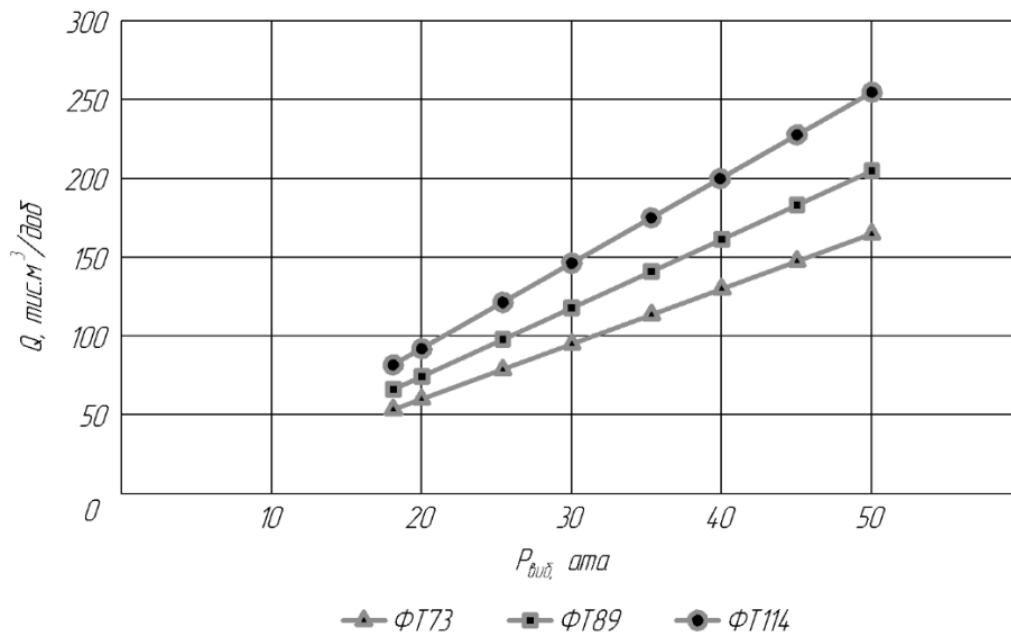


Рисунок 2 - Залежність продуктивності свердловини від діаметра фонтанних труб і вибійного тиску

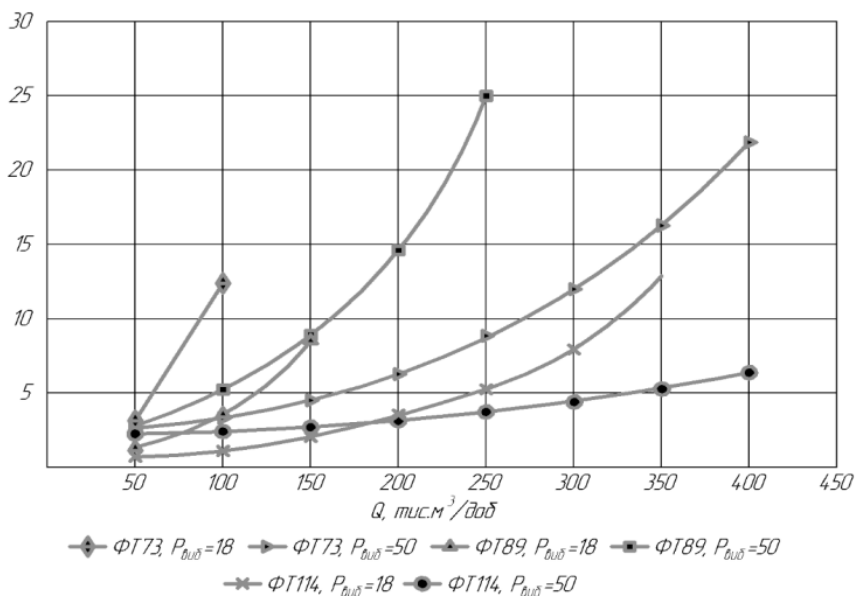


Рисунок 3 – Залежність втрат тиску в ФТ від їх діаметра, продуктивності і вибійного тиску

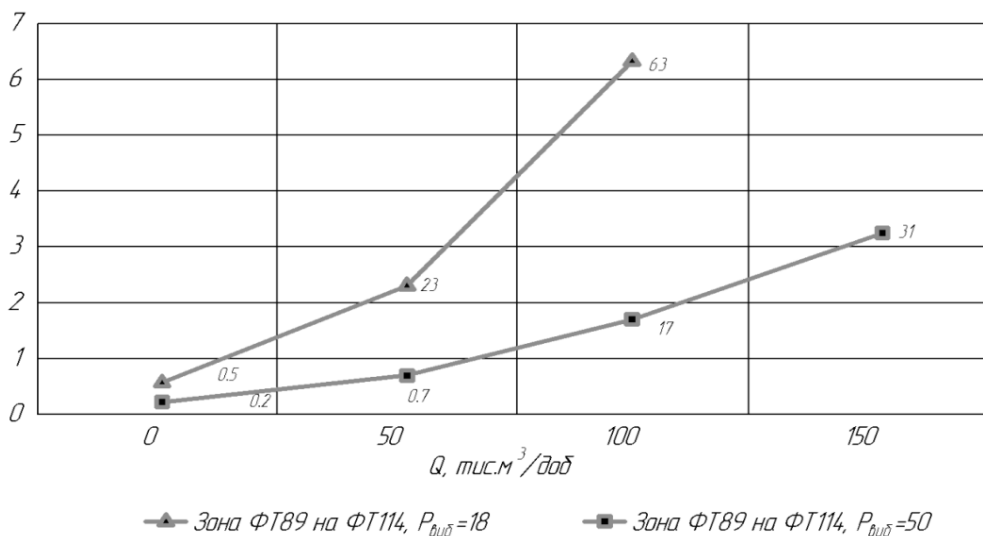


Рисунок 4 – Зменшення гідравлічних втрат тиску в ФТ внаслідок заміни ФТ 89 мм на ФТ 114 мм

Висновки

Ефективність збільшення діаметра стовбура залежить від проявленого закону припливу флюїду до свердловини (лінійний закон фільтрації або нелінійний). Ефективність способу залежить в основному від співвідношення коефіцієнтів фільтраційних опорів і кратності збільшення діаметра стовбура свердловини.

Таким чином, завдяки збільшенню діаметра ФТ можна отримати ряд переваг:

- збільшення продуктивності відбору в середньому на 480,0-649,9 тис. м³/добу,
- зменшення гідравлічного опору у ФТ і збільшення тиску на вході в ДКС,
- зменшення витрати паливного газу завдяки зменшенню тривалості компресорного

відбору на 6-8 діб, що оцінюється 553350 – 737800 М³ природного газу.

Список використаних джерел

1. Ільницький М.К., Козлов А.В., Глушич В.Г., Вітрик В.Г., Петунін О.І., Мессер О.Г. Досвід буріння бокового горизонтального стовбура в експлуатаційній колоні на Штормовому ГКР. *Нафт. і газова промисловість*. 1999. № 3. С. 26-28.

2. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 736 с.

3. Коротаев Ю.П., Рейтенбах Г.Р., Белов В.И. [и др.] О возможности создания высокопродуктивных скважин большого диаметра. *Газовое дело*. 1970. № 4. С. 26–29.

4. Полтавская М.Д. Верзбицкий В.В., Гунькина Т.А. Влияние увеличенного диаметра ствола на повышение производительности скважин. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2013. № 6. С.74-85.

5. Тарко Я.Б., Тарко Я.Я. Підвищення продуктивності свердловин здійсненням гідроімпульсної імпульсійної дії на привибійну зону пласта. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 3(28). С.17-21.

6. Кондрат Р.М., Горбійчук М.І., Дремлюх Н.С. Дослідження впливу діаметра стовбура на продуктивність газових свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. 3. С. 101-109.

7. Сучков Б.М. Повышение производительности малодебитных скважин. Ижевск: Удмурт НИПИнефть, 1999. 645 с.

8. Галій П.П. Семчишин О.О., Сусак О.М. та ін. Аналіз ефективності заміни фонтанних труб свердловин Дашавського ПСГ на більший діаметр. Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу. 2004. № 2(8). С. 181-185.

9. Olijnyk A., Chernova O. Estimation of gas losses based on the characteristic of the state of wells of dashava storage. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017. №6/8 (90). С. 25-32.

10. Гімер Р.Ф., Гімер П.Р., Деркач М.П. Підземне зберігання газу: підручник. Івано-Франківськ: Факел, 2001. 215 с.

11. Derry D. Sparlin. Pressure-packing

technique controls anconsolitatend sand. *Oil and Gas*. 1971. Vol. 65. № 11. P. 87–93.

12. Коротаев Ю.П. Эксплуатация газовых месторождений. М. Недра, 1975.415ст.

13. Звіт про науково-дослідну роботу "Технологічний проект циклічної експлуатації Дашавського ПС". Харків: УКРНДІГАЗ, 1999. 282 с.

14. Васильев В.А. Гунькина Т.А., Зиновьева Л.М., Копченков В.Г. Инновационные технологии повышения продуктивности скважин. Нефтепромысловое дело. 2014. №6. С. 5-74.

15. Арестов Б.В. Разработка и исследование техники и технологии создания гравийных фильтров в скважинах: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.15.06 – “Скважинная разработка нефтегазовых месторождений”. Москва, 1987. 24с.

16. Penberthy W.L., Cope V.I. Design and productivity of gravel-packed completion 1980.

17. Басарыгин Ю.М. Будников В.Ф, Булатов А.И. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации : [справ. пособие]: в 6т. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. Т. 5. 2006. 431 с.: ил., табл. – ISBN 5-8365-0156-4.

References

1. Pnytskyi M.K., Kozlov A.V., Hlushych V.H., Vitryk V.H., Petunin O.I., Messer O.H. Dosvid burinnia bokovoho horyzontalnoho stovbura v ekspluatatsiinii koloni na Shtormovomu HKR. *Naft. i hazova promyslovist*. 1999. No 3. P. 26-28. [in Ukrainian]

2. Schelkachev V.N., Lapuk B.B. Podzemnaya gidravlika. Izhevsk: Reguljarnaya i haoticheskaya dinamika, 2001. 736 p. [in Russian]

3. Korotaev Yu.P., Reytenbah G.R., Belov V.I. [i dr.] O vozmozhnosti sozdaniya vyisokoproduktivnyih skvazhin bolshogo diametra. *Gazovoe delo*. 1970. No 4. P. 26–29. [in Russian]

4. Poltavskaya M.D. Verzhbitskiy V.V., Gunkina T.A. Vliyanie uvelichennogo diametra stvola na povyishenie proizvoditelnosti skvazhin. *Vestnik PNIPIU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2013. No 6. P.74-85. [in Russian]

5. Tarko Ya.B., Tarko Ya.Ia. Pidvyshchennia produktyvnosti sverdlovyvny zdiisnenniam

hidroimpulsnoi imploziinoi dii na pryvybiinu zonu plasta. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch.* 2008. No 3(28). P. 17-21. [in Ukrainian]

6. Kondrat R.M., Horbiichuk M.I., Dremlukh N.S. Doslidzhennia vplyvu diametra stovbura na produktyvnist hazovykh sverdlovyn. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch.* 2017. Vol 3. P. 101-109. [in Ukrainian]

7. Suchkov B.M. Povyishenie prizvoditelnosti malodebitnykh skvazhin. Izhevsk: Udmurt NIPIneft, 1999. 645 p. [in Russian]

8. Halii, P.P. Semchyshyn O.O., Susak O.M. ta in. Analiz efektyvnosti zaminy fontannykh trub sverdlovyn Dashavskoho PSH na bilshyi diametr. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu.* 2004. No 2(8). P. 181-185. [in Ukrainian]

9. Olijnyk A., Chernova O. Estimation of gas losses based on the characteristic of the state of wells of dashava storage. *Eastern-evropean journal of enterprise technologies.* 2017. No 6/8 (90). P. 25-32. [in Russian]

10. Himer R.F., Himer P.R., Derkach M.P. Pidzemne zberihannia hazu: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: Fakel, 2001. 215 p. [in Ukrainian]

11. Derry D. Sparlin. Pressure-packing technique controls anconsolidatend sand. *Oil and Gas.* 1971. Vol. 65. No 11. P. 87-93.

12. Korotaev Yu.P. Ekspluatatsiya gazovykh mestorozhdeniy. M. Nedra, 1975.415p. [in Russian]

13. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu "Tekhnolohichniy proekt tsyklichnoi ekspluatatsii Dashavskoho PS". Kharkiv: UKRNDIHAZ, 1999. 282 p. [in Ukrainian]

14. Vasilev V.A. Gunkina T.A., Zinoveva L.M., Kopchenkov V.G. Innovatsi-onnyie tehnologii povyisheniya produktivnosti skvazhin. *Neftepromyislovoe delo.* 2014. No 6. P. 5-74. [in Russian]

15. Arestov B.V. Razrabotka i issledovanie tehniki i tehnologii sozdaniya graviynykh filtrov v skvazhinah: avtoref. dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tehn. nauk : spets. 05.15.06 – "Skvazhinnaya razrabotka neftegazovykh mestorozhdeniy". Moskva, 1987. 24p. [in Russian]

16. Renberthy W.L., Cope B.I. Design and productivity of gravel-packed completion 1980.

17. Basaryigin Yu.M. Budnikov V.F, Bulatov A.I. Teoriya i praktika preduprezhdeniya oslozhneniy i remonta skvazhin pri ih stroitelstve i ekspluatatsii : [sprav. posobie]: v 6t. M.: OOO «Nedra-Biznestsentr», 2003. Vol. 5. 2006. 431 p. ISBN 5-8365-0156-4. [in Russian]

УДК 681.513.6:622.24

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-89-98

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕМЕНТІВ ГІДРОСИСТЕМИ ПРОМИВАННЯ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ЗАДАЧ АДАПТИВНОГО І РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ

А. І. Лагойда

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ,
вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727167, e-mail: lahoidaandrii@gmail.com*

У статті проаналізовано розвиток сучасних підходів для ефективного розв'язання задач адаптивного та робастного керування з компенсацією збурень промиванням свердловин під час їхнього поглиблення і, відповідно, доведено, що це науково-прикладне питання, потребує належного розроблення, а також впровадження нових математичних моделей елементів гідросистеми, які є ядром системи автоматичного керування. Розглянуто шляхи розв'язання задачі адаптивного та робастного керування з еталонною математичною моделлю лінійними стаціонарними об'єктами по виходу, яка має велике теоретичне та прикладне значення та є предметом дослідження протягом останніх років. Розроблено функціональну структуру інтелектуальної адаптивної системи керування наземними об'єктами технічної гідравлічної системи промивання свердловин, яка поєднує методи адаптивного і робастного керування, де адаптивна частина системи в умовах невизначеності здатна змінювати алгоритми функціонування, структуру і параметри регулятора завдяки наявності додаткових пристроїв та зв'язків, які дозволяють своєчасно пристосовуватися до змінюваних умов роботи, а робастна система гарантує необхідну якість системи, незалежно від похибок та змін параметрів системи, оскільки вона володіє чутливістю, зберігає стійкість, функціонує в широкому діапазоні невизначеності. Для наземних елементів технічної гідравлічної системи промивання свердловин, які розглядаються як об'єкти з зосередженими параметрами, розроблена феноменологічна модель, що побудована на засадах холистичного підходу. Модель сформована в області зображення Лапласа за часом та у безрозмірній формі у вигляді системи диференціальних рівнянь при нульових початкових умовах, що відповідно дозволяє використати дану модель для синтезу функцій передавання обернених регуляторів локальних систем автоматичного регулювання. Запропоновано методи керування елементами технічної гідросистеми промивання свердловини, що ґрунтуються на використанні розробленої моделі і структури інтелектуальної системи з елементами робастного та адаптивного керування.

Ключові слова: моделювання, динаміка, адаптивне і робастне керування, технічна гідравлічна система промивання свердловин, холистичний підхід, системний аналіз.

В статье проанализировано развитие современных подходов для эффективного решения задач адаптивного и робастного управления с компенсацией возмущений процессом промывки скважин при их углубления и, соответственно, доказано, что этот научно-прикладное вопрос требует надлежащей разработки, а также внедрения новых математических моделей элементов гидросистемы, которые являются ядром системы автоматического управления. Рассмотрены пути решения задачи адаптивного и робастного управления с эталонной математической моделью линейными стационарными объектами по выходу, которая имеет большое теоретическое и прикладное значение и является предметом исследования в последние годы. Разработана функциональная структура интеллектуальной адаптивной системы управления наземными объектами технической гидравлической системы промывки скважин, объединяющая методы адаптивного и робастного управления, где адаптивная часть системы в условиях неопределенности способна изменять алгоритмы функционирования, структуру и параметры регулятора за счет наличия дополнительных устройств и связей, которые позволяют своевременно приспосабливаться к изменяющимся условиям работы, а робастная система гарантирует необходимое качество системы независимо от погрешностей и изменения параметров системы, поскольку она обладает чувствительностью, сохраняет устойчивость, функционирует в широком диапазоне неопределенности. Для наземных элементов технической гидравлической системы промывки скважин, которые рассматриваются как объекты с сосредоточенными параметрами, разработана феноменологическая модель, построенная на холистическом подходе. Модель сформирована в области изображения Лапласа по времени и в безразмерной форме в виде системы дифференциальных уравнений при нулевых начальных условиях, соответственно позволяет использовать данную модель для синтеза функций

передачі обратних регуляторів локальних систем автоматического регулювання. Предложені методи управління елементами технічної гидросистеми промивки скважини, основанной на використанні розробленої моделі і структури інтелектуальної системи з елементами робастного і адаптивного управління.

Ключевые слова: моделювання, динаміка, адаптивне і робастного управління, технічна гидравлічна система промивки скважин, холистический підхід, системний аналіз.

The article analyzes the development of modern approaches for the effective solution of the problems of adaptive and robust control with the compensation of perturbations by the process of drilling of wells during their deepening and accordingly proves that this is a scientific and applied issue, needs proper development, as well as the introduction of new mathematical models of elements. which are the core of the automatic control system. The ways of solving the problem of adaptive and robust control with the standard mathematical model of linear stationary objects by output, which are of great theoretical and applied importance and have been the subject of research in recent years, are considered. The functional structure of the intelligent adaptive ground control system of technical facilities of the hydraulic well-flushing system is developed, which integrates methods of adaptive and robust control, where the adaptive part of the system in the conditions of uncertainty can change the algorithms of operation, structure and parameters of the controller due to additional devices the holes that allow you to adapt to changing working conditions in a timely manner, and the robust system guarantees the required system quality regardless of errors and min parameters of the system because it has a sensitivity remains stable, functioning in a wide range of uncertainty. For the terrestrial elements of the technical hydraulic system for flushing wells, which are considered as objects with concentrated parameters, a phenomenological model is developed, which is based on a holistic approach. The model is formed in the field of Laplace image in time and in dimensionless form as a system of differential equations at zero initial conditions, which accordingly allows to use this model to synthesize the transfer functions of the inverters of local automatic control systems. The methods of control of elements of technical hydraulic system of flushing of wells are offered, based on the use of the developed model and structure of the intelligent system with elements of robust and adaptive control.

Keywords: modeling, dynamics, adaptive and robust control, technical hydraulic well-flushing system, holistic approach, system analysis.

Вступ. Сучасна теорія автоматичного керування використовує декілька підходів до побудови ефективних систем автоматизації складних об'єктів, що функціонують за умов невизначеності. Основними підходами є адаптивне і робастне керування з компенсацією збурень. Від робастної системи вимагається низька чутливість, збереження стійкості, незалежна якість в широкому діапазоні зміни її параметрів та функціонування в умовах невизначеності (наявність шумів, низька точність оперативної інформації, відмови каналів зв'язку, недосяжність для вимірювання; недостатня надійність засобів вимірювання, неточність математичних моделей та ін.).

Адаптивна система повинна бути здатною змінювати алгоритм функціонування, структуру та параметри системи за рахунок використання додаткових пристроїв і зв'язків, що дозволяють своєчасно пристосовуватися до змінюваних умов роботи.

На сьогодні розглядаються нові підходи до двох класичних задач сучасної теорії адаптивного керування: до задачі керування з еталонною моделлю лінійним об'єктом по

виходу та до задачі керування нелінійним об'єктом при порушенні умов узгодженості. Задача адаптивного керування з еталонною моделлю лінійним стаціонарним об'єктом по виходу має велике теоретичне і прикладне значення. Це актуально і для автоматизованого керування процесом промивання свердловин при її поглибленні, оскільки ця науково-прикладна проблема розглядається як один з найбільш ефективних методів підвищення ефективності буріння глибоких свердловин на нафту і газ.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Пошуки шляхів розв'язання задачі адаптивного керування з еталонною моделлю лінійними стаціонарними об'єктами по виходу, яка має велике теоретичне і прикладне значення, є предметом активних досліджень впродовж останніх років [1÷10 та ін.]. Один із підходів до розв'язання цієї задачі передбачає використання ітеративної процедури синтезу, яка відома під назвою «адаптивний обхід інтегратора» [2]. Використання даної процедури дозволяє отримати ряд нових властивостей системи, які

були недосяжними для стандартних методів синтезу, що ґрунтується на принципах безпосередньої компенсації. Однією з них є параметрична робастність, а також можливість використання апріорної інформації про значення окремих параметрів об'єкта керування. Під параметричною робастністю мається на увазі забезпечення стійкості замкненої системи керування без адаптивного налаштування параметрів регулятора [2÷5].

Використання методу адаптивного обходу інтегратора для керування лінійними об'єктами по виходу було запропоновано у роботі [10], а властивості параметричної робастності досліджено у [5]. Адаптивна система керування з еталонною моделлю і параметричним налаштуванням розглянута у роботі [9]. Проте, у регуляторі, описаному у роботах [5,10] властивість параметричної робастності забезпечується лише тоді, коли так званий високочастотний коефіцієнт функції передавання $b_m = 1$ відомий [2].

Подальших досліджень потребують питання адаптивного керування з еталонною моделлю [9] лінійними об'єктами по виходу, що є складовими технічної гідравлічної системи промивання свердловин (ТГСПС), під час їхнього поглиблення. Це такі системи як процес заповнення ємності з буровим розчином, поршневі бурові насоси, приводи бурових насосів, процес розчинення хімреагентів у буровому розчині та ін.

Постановка задачі. Метою статті є системний аналіз і моделювання динаміки елементів технічної гідравлічної системи промивання свердловин для задач адаптивного і робастного керування.

Виклад основного матеріалу. Системний аналіз структурних схем гідросистем шляхом декомпозиції їх на окремі елементи дозволяє адекватно моделювати ТГСПС. Властивості цих елементів та характер впливу на потік бурового розчину визначають їх математичний опис.

Задача, що розв'язується – це адаптивне і робастне керування лінійним стаціонарним об'єктом, гіпотетичний зв'язок між керованою величиною $x(t)$ і керувальною дією $y(t)$ якого описується диференціальним рівнянням такого виду:

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + a_2 \frac{d^{n-2} x(t)}{dt^{n-2}} + \dots + x(t)a_n = b_0 \frac{d^m y(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + b_2 \frac{d^{m-2} y(t)}{dt^{m-2}} + \dots + y(t)b_m, \quad (1)$$

де $y(t)$ – вхідна величина (керувальна дія);

$x(t)$ – вихідна величина (керована величина);

a_i, b_j – невідомі постійні коефіцієнти рівняння.

Це рівняння встановлює зв'язок між вхідною $y(t)$ і вихідною $x(t)$ величинами об'єкта керування в усталених і перехідних режимах. Звичайно у реальних системах керування показник $n > m$, тобто $n - m > 1$. Початкові умови:

$$y(-0) = y'(-0) = y''(-0) = \dots = 0, \quad (2)$$

$$x(-0) = x'(-0) = x''(-0) = \dots = 0.$$

Перетворивши рівняння (1) за Лапласом, отримаємо функцію передавання об'єкта керування:

$$W(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} \dots + a_n}, \quad (3)$$

де $s = d/dt$ – оператор диференціювання.

Розглянемо диференціальні рівняння і функції передавання об'єктів керування, що є складовими технічної гідравлічної системи промивання свердловин під час їхнього поглиблення. Це такі процеси як розчинення хімреагентів при створенні бурового розчину, обертальний рух тіла (двигун, відцентровий насос), поступальний рух тіла (поршневий буровий насос), резервуар, в який надходить буровий розчин та ін. Спільним для цих об'єктів є те, що всі вони одноємнісні (табл. 1).

Виходитимемо з того, що будь-який одноємнісний об'єкт керування типу SI-SO характеризується двома узагальнюючими координатами $u_{вх}$ та $x_{вих}$. Вхідна величина $u_{вх}$ – це величина енергетичного або матеріального потоку M , що надходить на вхід об'єкта керування. Вихідна величина $x_{вих}$ – це стан об'єкта керування h . Вони пов'язані між собою рівнянням балансу енергії або речовини, що накопичується в об'єкті керування, яке є основним рівнянням одноємнісного об'єкта [12]

$$F \frac{dh}{dt} = M, \quad (4)$$

де F – постійна величина, яка характеризує акумулюючу властивість об'єкта;

h – показник стану об'єкта;

M – кількість енергії або речовини, яка надходить в об'єкт за одиницю часу

$$M = M_n - M_c, \quad (5)$$

де M_n , M_c – відповідно приплив і стікання енергії або речовини.

Якщо одна із величин, що входять до рівняння (5) є збурювальною дією або навантаженням, тоді друга величина використовується як керувальна дія.

Отже,
$$F \frac{dh}{dt} = M_n - M_c. \quad (6)$$

Якщо об'єктом керування є резервуар, в який надходить рідина, то координата h є рівнем рідини, показник M – різницею між припливом і стоком рідини за одиницю часу, а площа поверхні рідини F – коефіцієнтом ємності. Цей коефіцієнт визначає швидкість зміни показника h при постійному значенні показника M . Якщо $M = 0$, то $M_n = M_c$ і $h = \text{const}$. Згідно з рівнянням (4) при будь-якому M_n і M_c величина h буде зростати або зменшуватися залежно від знаку M .

Чим більшим є коефіцієнт ємності F , тим повільніше проходить зміна величини h при одній і тій ж різниці між припливом і стоком. Коефіцієнт ємності F може бути постійним або змінним. Для резервуару у вигляді циліндра $F = \text{const}$ при будь-якому значенні h . Якщо резервуар має форму конуса, то F буде залежити від поточного значення h , а рівняння (4) стане нелінійним. В об'єктах з $F = \text{const}$ кожному значенню показника $h = h_0$ відповідає визначена

кількість енергії або речовини, яка описується ємністю об'єкта $V_0 = F \cdot h_0$.

Зазначимо, що крім основного рівняння (4) одноємнісні об'єкти підпорядковуються закону, згідно з яким відбувається обмін енергії і речовини між об'єктом керування і зовнішнім середовищем. Цей закон може бути виражений у вигляді двох нелінійних залежностей

$$M_n = f_n(h), \quad M_c = f_c(h), \quad (7)$$

які при аналізі динаміки об'єкта необхідно лінеаризувати. Очевидно, що поведінка об'єкта в часі залежить від співвідношення похідних $f'_n(h)$ та $f'_c(h)$ у точці, яка відповідає режиму, що розглядається. Якщо у резервуарі з буровим розчином при рівні h_0 різниця похідних

$$\left\{ \frac{\partial M_c}{\partial h} - \frac{\partial M_n}{\partial h} \right\}_{h=h_0} > 0, \quad (8)$$

то різниця між припливом і стоком, яка виникла випадково, буде зменшуватися при збільшенні h , оскільки такий об'єкт має властивість самовирівнювання. Через деякий час різниця (8) буде дорівнювати 0, а рівень стане постійним $h = \text{const}$. Якщо різниця (8) буде менша нуля, то із збільшенням h буде збільшуватися різниця між припливом і стоком, що викличе подальше зростання рівня.

Враховуючи умови балансу енергії або речовини (4) і закони обміну енергії і речовини між об'єктом і зовнішнім середовищем (7) складемо загальне диференціальне рівняння для резервуара з рідиною як одноємнісного об'єкта. Припустимо, що до подачі зовнішнього впливу об'єкт перебуває у статичному режимі, тобто

$$M_n = M_c; \quad h = h_0. \quad (9)$$

Таблиця 1 - Сукупність класів одноємнісних об'єктів технічної гідравлічної системи промивання свердловин

Клас об'єкта	Процес	Вхідна величина (M)	Вихідна величина (h)	Коефіцієнт ємності (F)
A	Розчинення	Надходження сухої речовини за одиницю часу, $кг/с$	Концентрація речовини, $кг/м^3$	Ємність апарата, $м^3$
B	Обертальний рух тіла	Момент, $Нм$	Кутова швидкість, $рад/с$	Момент інерції, $кгм^2$
C	Поступальний рух тіла	Зусилля, $Н$	Лінійна швидкість, $м/с$	Маса, $кг$
D	Заповнення резервуару	Приплив рідини, $м^3/с$	Рівень рідини, $м$	Площа поверхні рідини, $м^2$

Після ступінчатої зміни припливу рідини на величину ΔM_n згідно рівняння (6) відбувається зміна рівня рідини на величину:

$$\Delta h = h - h_0. \quad (10)$$

Зміна рівню призводить до збільшення або зменшення припливу або стоку. Щоб знайти нові значення припливу і стоку, необхідно залежності (7) розкласти в ряд Тейлора поблизу точки усталеного режиму і, відкинувши члени ряду вище першого порядку малості, отримати такі наближені залежності:

$$\left. \begin{aligned} M_n &= f_n(h) \rightarrow M_n = M_{n0} + \Delta M_n + \\ &+ \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h + \dots \\ M_c &= f_c(h) \rightarrow M_c = M_{c0} + \\ &+ \left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h + \dots, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де ΔM_n – стрибкоподібна зміна притоку.

Враховуємо, що $h = h_0 + \Delta h$ та $M_n = M_c$, і підставимо значення M і h у рівняння (6):

$$F \frac{d(h_0 + \Delta h)}{dt} = M_{n0} + \Delta M_n + \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h - M_{c0} + \left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h. \quad (12)$$

Це рівняння можна спростити, враховуючи, у початковому стані приплив дорівнював стоку. Можна врахувати ще той факт, що похідна від $h_0 = \text{const}$ дорівнює 0. Можемо тепер переписати рівняння (12):

$$F \frac{d(\Delta h)}{dt} = \Delta M_n + \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h - \left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} \Delta h. \quad (13)$$

Перенесемо складові h наліво:

$$F \frac{d(\Delta h)}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right] \Delta h = \Delta M_n. \quad (14)$$

Останнє рівняння (14) пов'язує ΔM з Δh , але дійсне воно лише для малих відхилень притоку M_n і рівня h від значень M_0 і h_0 .

Для переходу до рівнянь у відносних одиницях використовуємо базові значення статичного режиму – M_0 , h_0 . У цьому випадку:

$$\frac{\Delta h}{h_0} = x, \quad \frac{\Delta M_n}{M_0} = y; \quad \Delta h = h_0 x; \quad \Delta M_n = M_0 y. \quad (15)$$

Тепер можна підставити ці значення (15) у рівняння (14):

$$F \frac{h_0 dx}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right] h_0 x = M_0 y. \quad (16)$$

Розділимо праву і ліву частину рівняння (16) на M_0 :

$$\frac{F h_0}{M_0} \frac{dx}{dt} + \frac{h_0}{M_0} \left[\left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right] x = y. \quad (17)$$

Коефіцієнт, що стоїть перед x є коефіцієнтом самовирівнювання δ :

$$\delta = \frac{h_0}{M_0} \left[\left(\frac{\partial M_c}{\partial h} \right)_{h=h_0} - \left(\frac{\partial M_n}{\partial h} \right)_{h=h_0} \right]. \quad (18)$$

Якщо поділити ліву і праву частини рівняння (17) на δ , то рівняння (17) можна привести до стандартної форми:

$$T_{OK} \frac{dx}{dt} \pm x = K_{OK} y, \quad (19)$$

де $T_{OK} = \frac{F h_0}{M_0 |\delta|}$ – стала часу об'єкта керування;

$K_{OK} = \frac{1}{|\delta|}$ – безрозмірний коефіцієнт

передавання об'єкта керування.

Якщо $\frac{dx}{dt} = 0$, то диференціальне рівняння

(19) перетворюється у рівняння $x = K_{OK} y$, яке описує статичні властивості об'єкта керування. Диференціальне рівняння (17), що отримане на засадах холистичного підходу, описує динамічні властивості різних об'єктів керування.

Дійсно, якщо $\delta > 0$, то одноємнісний об'єкт керування має властивість самовирівнювання і за своїми динамічними властивостями еквівалентний інерційній ланці першого порядку з функцією передавання:

$$W(s) = \frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{K_{OK}}{T_{OK} s + 1}. \quad (20)$$

Якщо $\delta = 0$, то самовирівнювання в об'єкті керування відсутнє і такий об'єкт еквівалентний ідеальній інерційній ланці, що описується рівнянням:

$$\frac{F h_0}{M_0} \frac{dx}{dt} = y. \quad (21)$$

Якщо $\delta < 0$, то в рівнянні (19) перед змінною x буде “-”, що відповідає додатному кореню зростаючої перехідної функції:

$$W(s) = \frac{K_{OK}}{T_{OK}s - 1}. \quad (22)$$

Припустимо, що бажана поведінка регульованої змінної x задається еталонною моделлю:

$$x^* = \frac{K^*}{A^*(s)} x_{зд}, \quad (23)$$

де x^* - еталонний вихід;

$x_{зд}$ - сигнал завдання (обмеження, кусково неперервна функція часу);

$A^*(s)$ - нормований поліном Гурвіца степені $n \geq 1$;

$K^* > 0$ - постійний коефіцієнт передавання.

Оскільки для багатьох задач оптимального і адаптивного керування зручно використовувати математичні моделі у нормальній формі, тобто у вигляді системи n диференціальних рівнянь першого порядку, розглянемо це питання на прикладі двигуна насосної установки як об'єкта керування класу B . Поведінку двигуна згідно з основним рівнянням динаміки одноємнісного об'єкта (4), (6) характеризує таке рівняння руху [15]:

$$I = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_d - M_o, \quad (24)$$

де I - момент інерції приводу, приведений до валу двигуна;

α - кут повороту валу двигуна;

M_d , M_o - момент, який створює двигун і момент статичного опору насоса.

Введем позначення:

$$b = \frac{1}{I}; \quad u = M_d; \quad x_1 = \alpha; \quad x_2 = \dot{\alpha}; \quad F = M_o/I,$$

де u - керувальна дія;

F - збурення.

Тоді рівняння (24) можна записати у формі Коші:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot U + 0 \cdot F, \\ \dot{x}_2 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + b \cdot U + (-1) \cdot F, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

або у векторній формі

$$\dot{X} = AX + BU + CF, \quad (26)$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

У наведеному прикладі керувальною дією є момент двигуна M_d , хоча у дійсності керувальною дією є напруга збудження або

напруга на якорі двигуна постійного струму. Тому у більш складній моделі об'єкта керування слід додати ще модель взаємозв'язку моменту двигуна M_d з конкретною керувальною дією.

Якщо врахувати, що двигун постійного струму має незалежне збудження, то тоді об'єкт керування можна описати так:

$$\left. \begin{aligned} U &= K_\varepsilon \dot{\alpha} + RM_d/K_\varepsilon + LM_d/K_m, \\ M_d - M_o &= \ddot{\alpha}/I, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

де U - напруга живлення;

$K_\varepsilon = K_m$ - конструктивні константи при сталомі значенні потоку збудження двигуна;

R , L - активний й індуктивний опори обмотки двигуна.

Якщо ввести позначення

$$x_1 = \alpha; \quad x_2 = \dot{\alpha}; \quad x_3 = M_d; \quad F = M_o/I,$$

то отримаємо такі рівняння у нормальній формі Коші:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + 0 \cdot U + 0 \cdot F, \\ \dot{x}_2 &= 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + \left(\frac{1}{I}\right)x_3 + 0 \cdot u + (-1) \cdot F, \\ \dot{x}_3 &= 0 \cdot x_1 + (-K_\varepsilon K_m/L)x_2 + (-R/L)x_3 + \\ &+ (K_m/L)U + 0 \cdot F, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

або

$$\dot{X} = AX + BU + CF, \quad (29)$$

$$\text{де } X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/I \\ 0 & -K_\varepsilon K_m/L & -R/L \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_m/L \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

У наведених прикладах фазовими координатами двигуна насоса як об'єкта керування є: α - кут повороту валу двигуна, $\dot{\alpha}$ - кутова швидкість обертання валу двигуна та M_d - момент, який створює двигун.

Можна було б ввести й інші фазові координати. Наприклад, замість моменту двигуна M_d - струм його якоря. При цьому у математичній моделі помінялось би деякі коефіцієнти при фазових координатах. У моделі (25) керувальною дією є M_d , а

збурювальною дією – $F = M_0 / I$. У більш складному прикладі (28) M_d виступає вже в ролі фазової координати, а керувальною дією є напруга U . Вона обмежена зверху U_{\max} , а знизу – нулем: $0 \leq U \leq U_{\max}$. Якщо розглядати регулювання потоком збудження, то в математичній моделі того ж самого двигуна з'явиться ще одна керувальна дія – напруга збудження. Проте, збурювальною дією у всіх випадках є $F = M_0 / I$.

Припустимо, що в об'єкта керування досяжною для вимірювання є лише вихідна змінна x , але не її похідні.

Отже, необхідно знайти такий закон керування, щоб при будь-яких початкових умовах усі сигнали в замкненій системі керування були обмеженими функціями часу і додатково виконувалася умова:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x^*(t)) = 0, \quad (30)$$

де $x(t) - x^*(t) = \varepsilon(t)$ – похибка стеження.

Така постановка задачі адаптивного керування з еталонною моделлю теоретично розглядалася [2,11] для деяких спеціальних випадків, коли були невідомі параметри еталонної моделі, параметри об'єктів керування, був невимірюваний сигнал завдання та ін. Проте, ця проблема не розглядалася для нелінійних динамічних об'єктів, що є невідтворюваними, функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів, розвиваються у часі і перебувають під впливом різного типу завад.

Після визначення математичної моделі і перевірки її на адекватність об'єкту керування необхідно обрати тип регулятора для одержання якісних перехідних процесів. Такі регулятори відомі [13], розроблені також методи їх синтезу.

Одержані моделі (17) допускають автоматичну ідентифікацію об'єкта керування, тобто вхідна дія разом із вихідною можуть бути використані для ідентифікації об'єкта керування у режимі on-line, реалізуючи ідею дуальності керувальної та вихідної дій [2]. Це створило передумови для застосування регулятора на основі оберненого оператора. Для знаходження функції передавання оберненого регулятора необхідно знайти оператор обернення $W_{\text{ок}}^{-1}(s)$ [2,13]. Завдяки алгебраїчній формі зображень операторів Лапласа, формально зробити це досить просто. Наприклад, для

досліджуваних об'єктів керування, що мають функції передавання $W(s) = \frac{K_{\text{ок}}}{T_{\text{ок}}s + 1}$,

обернений оператор дорівнюватиме

$$W_{\text{ок}}^{-1}(s) = \frac{T_{\text{ок}}s + 1}{K_{\text{ок}}} = \frac{T_{\text{ок}}}{K_{\text{ок}}}s + \frac{1}{K_{\text{ок}}}. \quad (31)$$

Йому відповідає функція передавання ПД-регулятора:

$$R(s) = K + T_d s = K \left(1 + \frac{T_d}{K} s \right). \quad (32)$$

де $K = \frac{1}{K_{\text{ок}}}$, $T_d = \frac{T_{\text{ок}}}{K_{\text{ок}}}$.

Отже, обернений регулятор повинен містити пристрій, що виконує операцію диференціювання. Проте, відповідні пристрої, навіть для наближеного диференціювання, дуже чутливі до збурень. Зазначимо, що похідні можна обчислювати у ряді випадків без використання диференціюючих пристроїв, але для цього необхідно мати математичну модель об'єкта керування з відомою структурою та параметрами. Отже, синтез оберненого регулятора можливий лише при наявності достатньо точної інформації про структуру та параметри об'єкта керування. Розв'язанню задачі синтезу оберненого регулятора сприяє перехід від безперервних моделей об'єкта керування до дискретних [13], а також використання концепції дуального управління, яка є узагальненою ідеєю адаптивного керування в умовах невизначеності [2]. Слід зазначити, що використання оберненого регулятора супроводжується появою запізнення на один інтервал дискретності. Проте, це притаманно усім дискретним системам і методи врахування цього фактору давно відомі [6,7,11 та ін.]. Окрім цього, об'єкти ТГСПС, що розглядаються, мають великі сталі часу, які досягають декількох десятків секунд.

Процес адаптації повинен задовольняти вимогам стійкості, точності і швидкодії. Отже, задачами є:

1) визначення оптимальних параметрів керуючого пристрою, що забезпечують максимальну точність і швидкодію;

2) синтез структури системи, яка задовольняє заданим вимогам або оптимальної адаптивної системи.

Коефіцієнти математичної моделі об'єкта керування, а отже і параметри оберненого регулятора запропоновано [14] одержувати на основі аналізу кореляційних функцій технологічних процесів у режимі реального часу. Одержані дані є основою для синтезу початкового варіанту структури та коефіцієнтів оберненого регулятора, оскільки вони співпадають з параметрами функції передавання

об'єкта керування. Оскільки одержати точні параметри об'єкта керування неможливо, параметри регулятора необхідно налагоджувати до одержання мінімальної похибки керування, застосовуючи інтелектуальні інформаційні технології.

Функціональна структура інтелектуальної системи керування ТГСПС наведена на рис. 1.

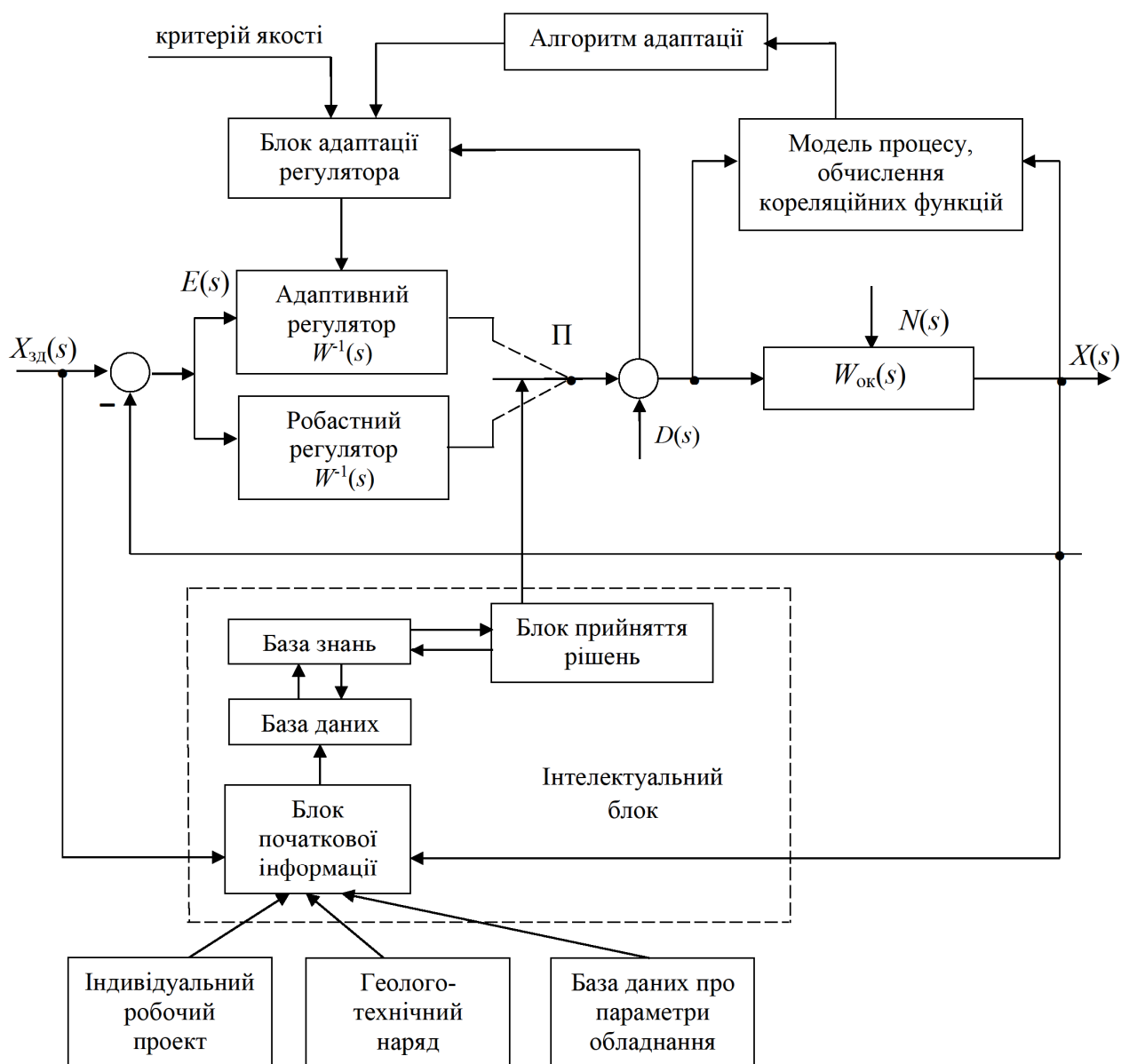


Рисунок 1 - Структура інтелектуальної адаптивної системи керування наземними об'єктами ТГСПС

Структура об'єднує методи адаптивного і робастного керування. Адаптивна частина системи в умовах невизначеності здатна змінювати алгоритми функціонування, структуру і параметри регулятора за рахунок додаткових пристроїв і зв'язків, що дозволяють своєчасно пристосовуватися до змінюваних умов роботи.

Робастна система гарантує необхідну якість системи незалежно від похибок та змін параметрів системи. Вона володіє чутливістю, зберігає стійкість, функціонує в широкому діапазоні невизначеності.

Між адаптивною і робастною підсистемами існує однозначний взаємозв'язок, оскільки вони орієнтовані на змінювані умови роботи. Поєднання цих двох методів керування в одній системі дозволяє одночасно використовувати переваги як адаптивних, так і робастних систем.

На першому етапі роботи такої системи вмикається адаптивний регулятор. Він на основі зміни чи появи нового типу додаткових завад $D(s)$ за допомогою блоку адаптації регулятора знаходить певні рішення, а також змінює початкові параметри адаптивного регулятора $W^1(s)$ та пристосовується до нових умов режиму роботи системи.

Інтелектуальний блок обробляє початкову інформацію (індивідуальний робочий проект, геолого-технічний наряд, база даних про параметри обладнання) за допомогою бази даних, бази знань та блоку прийняття рішень, а також приймає рішення, на основі якого перемикач П переключає систему з адаптивного на робастний.

Висновок. Для наземних елементів технічної гідравлічної системи промивання свердловин, які розглядаються як об'єкти з зосередженими параметрами, розроблена феноменологічна математична модель, що побудована на засадах холістичного підходу. Модель сформована в області зображення Лапласа за часом у безрозмірній формі у вигляді системи диференціальних рівнянь при нульових початкових умовах. Це дозволяє використати її для синтезу функцій передавання обернених регуляторів локальних систем автоматичного регулювання.

Запропоновано методи регулювання й адаптивного керування елементами технічної

гідравлічної системи промивання свердловин, що ґрунтуються на використанні розробленої моделі і структури інтелектуальної системи керування з комбінуванням методів робастного й адаптивного керування.

Список використаних джерел

1. Serrani A., Isidori A., Marconi L. Semiglobal nonlinear output regulation with adaptive internal model. *IEEE Trans. Automatic control*. 2001. Vol 46, № 8. P. 1178-1194.

2. Никифоров В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб: Наука, 2003. 282 с.

3. Гриценко Н.Г. Возможности комбинирования робастного та адаптивного управління; між нар.наук-техн.конф. «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технологічними комплексами», 26-27 листопад 2009. Київ: НУХТ, 2009. С.27-28.

4. Yao B., Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form. *Automatica*, 1997. Vol. 33. № 5. P. 893-900.

5. Kristic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Passivity and parametric robustness of a new class of adaptive systems. *Automatica*, 1994. Vol. 30. P.1703-1716.

6. Шпилевая О.Я. Адаптивные системы с эталонными моделями. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 240 с.

7. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000. 549 с.

8. Збруцкий А.В., Прач А.А., Симоненко С. Адаптивная система управления заданной точности при произвольных возмущениях / Scientific publication Automatics-2008 the 15th international conference on Automatic control. Odessa, 23-26 september 2008. С. 214-218.

9. Семенов Г.Н., Рогов В.М. Адаптивна система керування з еталонною моделлю і параметричним налаштуванням; V Всеукр.наук-техн.конф. молодих вчених, аспірантів та студентів «Автоматизація, контроль та управління: пошук ідей та рішень», м. Покровськ: ДНУ, 21-22 травня 2018. С.34-37.

10. Kritic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear design of adaptive controllers for

linear systems. *IEEE Trens on Automatic control*. 1994. Vol. 39, № 4. P. 738-751.

11. Артюшок В.П., Соловьев И.Г. Прямое адаптивное управление с настраиваемым эталоном. *Автоматика и телемеханика*. 1992, № 10. С. 105-112.

12. Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного керування: підручн. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1994. 610 с.

13. Семенцов Г.Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: навч.посібн. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. 201 с.

14. Лагойда А., Майкович Є.П., Зварич Г.Г., Лагойда Л.І. Моделі автокореляційних функцій ергодичних випадкових процесів у системі керування бурінням свердловин. *Modern engineering and innovative techologies*. 2019, № 10(1). С. 43-52.

15. Прихно В.И. Оптимальное и адаптивное управление электроприводами: учеб.пособ. Л.:ЛПИ, 1988. 92 с

References

1. Serrani A., Isidori A., Marconi L. Semiglobal nonlinear output regulation with adaptive internal model. *IEEE Trens. Automatic control*. 2001. Vol 46, No 8. P. 1178-1194. [in Russian]

2. Nikiforov V.O. Adaptivnoe i robstnoe upravlenie s kompensatsiey vozmuscheniy. SPb: Nauka, 2003. 282 p. [in Russian]

3. Hrytsenko N.H. Mozhlyvosti kombinuvannia robstnoho ta adaptivnoho upravlinnia; mizh nar.nauk-tekhn.konf. «Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system upravlinnia orhanizatsiino-tekhnolohichnymy kompleksamy», 26-27 lystopad 2009. Kyiv: NUKhT, 2009. P. 27-28. [in Ukrainian]

4. Yao B., Tomizuka M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedlack form. *Automatica*, 1997. Vol. 33. No 5. P. 893-900.

5. Kristic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Passivity and parametric robustness of a new choss of adaptive systems. *Automatica*. 1994. Vol. 30. P.1703-1716.

6. Shpilevaya O.Ya. Adaptivnyie sistemyi s etalonnyimi modelyami. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2007. 240p. [in Russian]

7. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Nelineynoe i adaptivnoe upravlenie slozhnyimi dinamicheskimi sistemami. SPb: Nauka, 2000. 549 p. [in Russian]

8. Zbrutskiy A.V., Prach A.A., Simonenko S. Adaptivnaya sistema upravleniya zadannoy tochnosti pri proizvolnyih vozmuscheniyah / Scientific publication Automatics-2008 the 15th international conference on Automatic control. Odessa, 23-26 september 2008. P. 214-218. [in Russian]

9. Sementsov H.N., Rehei V.M. Adaptivna systema keruvannia z etalonnoiu modelliu i parametrychnym nalashtuvanniam; V Vseukr.nauk-tekhn.konf. molodykh vchenykh, aspirantiv ta studentiv «Avtomatyzatsiia, kontrol ta upravlinnia: poshuk idei ta rishen», m. Pokrovsk: DNU, 21-22 travnia 2018. P.34-37. [in Ukrainian]

10. Kritic M., Kannellakopoulos I., Kokotovic P.V. Nonlinear design of adaptive controllers for linear systems. *IEEE Trens on Automatic control*. 1994. Vol. 39, No 4. P. 738-751.

11. Artyushok V.P., Solovev I.G. Pryamoe adaptivnoe upravlenie s nastroivaemyim etalonom. *Avtomatika i telemehanika*. 1992, No 10. P. 105-112.

12. Sementsov H.N. Teoriia avtomatychnoho keruvannia: pidruchn. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 1994. 610 p. [in Ukrainian]

13. Sementsov H.N. Avtomatyzatsiia neperervnykh tekhnolohichnykh protsesiv. Rehulatory: navch.posibn. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2016. 201 . [in Ukrainian]

14. Lahoida A., Maikovych Ye.P., Zvarych H.H., Lahoida L.I. Modeli avtokoreliatsiinykh funktsii erhodychnykh vypadkovykh protsesiv u systemi keruvannia burinniam sverdlodyn. *Modern engineering and innovative techologies*. 2019, № 10(1). P. 43-52. [in Ukrainian]

15. Prihno V.I. Optimalnoe i adaptivnoe upravlenie elektroprivodami: ucheb.posob. L.:LPI, 1988. 92 p.

УДК 620.179.17

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-99-109

ОДНОПОЛЯРНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ МЕТАЛОВИРОБІВ

К. Л. Ноздрачова, А. Ю. Слободчук*

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут";
61002, м. Харків, вул. Кирпичова 2, Україна; e-mail: nozdrachova@gmail.com*

Підвищити чутливість ємнісних ультразвукових перетворювачів можливо трьома способами: збільшенням ємності самого перетворювача, підвищенням прикладеного до обкладок перетворювача поляризуючої і імпульсної високочастотної напруги, використанням сучасних методів обробки збуджених і прийнятих з виробу інформаційних пакетних імпульсів. Збільшення ємності перетворювача обмежене конструктивними можливостями самого перетворювача і підбором діелектрика, що відокремлює пластину від поверхні електропровідного об'єкта контролю. Використання сучасних методів обробки прийнятої інформації значно ускладнює і здорожчує прилад із застосуванням ємнісного перетворювача. Найбільш прийнятним, на даний момент, способом підвищення чутливості є збільшення потужності високочастотних генераторів подачі напруги за умови збудження пакетних імпульсів. Представлений в статті генератор дозволяє створювати імпульсні пікової напруги в малоемнісних перетворювачах більш 3 кВ з частотами до 5 МГц з тривалістю в 1 період частоти заповнення та частотами зондування до 1 кГц. Експериментально показано, що за допомогою макета нового генератора отримані амплітуди імпульсів, що пройшли сталевий зразок товщиною 20 мм, відношення яких до амплітуди завод, прийнятих мініатюрним п'єзоелектричним перетворювачем, становить 13 разів. Використання розробленого потужного підсилювача імпульсів напруги дозволить підвищити амплітуду імпульсів прийнятих від перетворювача і багаторазово відображених у виробі.

Ключові слова: контроль якості, вимірювання, діагностика, перетворювач ємнісного типу, схемотехніка, генератор радіосигналів напруги, тривалість імпульсу, частота.

Повысить чувствительность емкостных ультразвуковых преобразователей возможно тремя способами: увеличением емкости самого преобразователя, повышением приложенного к обкладке преобразователя поляризующего и импульсного высокочастотного напряжения, использованием современных методов обработки возбужденных и принятых с изделия информационных пакетных импульсов. Увеличение емкости преобразователя ограничено конструктивными возможностями самого преобразователя и подборкой диэлектрика, отделяющего пластину от поверхности электропроводящего объекта контроля. Использование современных методов обработки принятой информации значительно усложняет и повышает цену прибора с применением емкостного преобразователя. Наиболее приемлемым на данный момент способом повышения чувствительности является увеличение мощности высокочастотных генераторов подачи напряжения при условии возбуждения пакетных импульсов. Представленный в статье генератор позволяет создавать импульсные пиковые напряжения в малоемкостных преобразователях более 3 кВ с частотами до 5 МГц с длительностью в 1 период частоты заполнения и частотами зондирования до 1 кГц. Экспериментально показано, что с помощью макета нового генератора получены амплитуды импульсов, прошедших стальной образец толщиной 20 мм, отношение которых к амплитуде шума, принятых миниатюрным пьезоэлектрическим преобразователем, составляет 13 раз. Использование разработанного мощного усилителя импульсов напряжения позволит повысить амплитуду импульсов, принятых от преобразователя и многократно переотраженных в изделии.

Ключевые слова: контроль качества, измерения, диагностика, преобразователь емкостного типа, схемотехника, генератор радиосигналов напряжения, длительность импульса, частота.

It is possible to increase the sensitivity of capacitive ultrasonic transducers in three ways: increasing the capacitance of the transducer, increasing the polarizing and pulsed high-frequency voltage applied in the transducer cover, using modern methods of processing information packet pulses excited and received from the product. The

increase in the capacity of the transducer is limited by the design capabilities of the transducer itself and the selection of the dielectric separating the plate from the surface of the electrically conductive testing object. Using modern methods of processing the received information significantly complicates and increases the cost of implementation of the device using a capacitive transducer. The most acceptable, at the moment, way to increase the sensitivity is to increase the power of high-frequency voltage supply generators provided that packet pulses are excited. The generator presented in the article allows to create pulsed peak voltages in low-capacitance transducers of more than 3 kV with frequencies up to 5 MHz with a duration of 1 period of the filling frequency and sounding frequencies up to 1 kHz. It was experimentally shown that using the prototype of a new generator, the amplitudes of the pulses transmitted through a steel sample 20 mm thick were obtained, the ratio of which to the noise amplitude received by the miniature piezoelectric transducer is 13 times. Using the developed powerful amplifier of voltage pulses will increase the amplitude of the pulses received from the transducer and repeatedly reflected in the product.

Keywords: testing, measurements, diagnostics, capacitive transducer, circuitry, voltage radio signal generator, pulse duration, frequency.

Вступ

Акустичні методи неруйнівного контролю засновані на реєстрації коливань, що збуджуються або виникають в об'єкті контролю (ОК). Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури, міжкристалічної корозії, дефектів склеювання, пайки, зварювання тощо) в деталях і виробках, виготовлених з різних матеріалів.

Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без порушення цілісності матеріалу. [1 - 3].

В останні роки виник великий інтерес в застосуванні перетворювачів, які використовують повітря в якості контактного середовища, але є обмеження в їх застосуванні. Спочатку ці пристрої були в вигляді високочастотних мікрофонів [4], але в цілому вони не могли працювати на частотах понад 200-300 кГц. Однак, подальші конструкції [5], дозволяють працювати в мегагерцовому діапазоні. Перетворювачі з повітряно-акустичним зв'язком можуть бути класифіковані на дві групи, п'єзоелектричні і ємнісні (або електростатичні).

У більшості випадків п'єзоелектричні перетворювачі з повітряно-акустичною зв'язком не ефективні при контролі виробів і мають низьку чутливість. Цей недолік обумовлений великими втратами в повітряному проміжку між виробом і перетворювачем. Проте, були досягнуті певні успіхи при розробці використанні в схемах високовольтних генераторів і широкосмугових підсилювачів для

збудження і прийому акустичних імпульсів [6, 7].

Існує кілька механізмів, за допомогою яких чутливість перетворювачів може бути збільшена. Відомі п'єзоелектричні приймачі звукового тиску містять п'єзокерамічний перетворюючий елемент, жорстко пов'язаний з металевою мембраною, що сприймає звуковий тиск, і п'єзокерамічний елемент для компенсації завад [8]. Металеві мембрани, прикріплені до 200 кГц п'єзоелектричного елемента, були використані, щоб збільшити зчеплення в повітрі. П'єзоперетворювач (ПЕП) складається з шарів різних матеріалів, які прикріплені до робочої поверхні датчика [9], з ідеальним акустичним імпедансом. Ці шари повинні бути товщиною чверті довжини хвилі, і, отже, вони зменшують загальну пропускну здатність пристрою. В якості шарів були використані такі матеріали, як плексиглас [10], силіконовий каучук [11], епоксидна смола [12], аерогель [13] і "тверде повітря" (ущільнені дрібні заповнені повітрям сфери) [14, 15].

Був також незначний успіх при використанні повітря під дуже високим тиском в якості контактного середовища, зі звичайними п'єзоелектричними пристроями, високочастотними підсилювачами і схемами високої потужності [16]. Інший спосіб для поліпшення невідповідності опору є використання п'єзоелектричного полімеру, який має акустичний опір, ближче до повітря, щоб зробити елемент, такий як полівініліденфторид (ПВДФ) [17], або сополімер [18]. Також незначний успіх отримали при використанні в якості контактного середовища повітря під дуже високим тиском, із звичайних п'єзоелектричних

пристроїв, підсилювачами і схемами великої потужності [16].

Інший метод полягає в модифікації звичайних п'єзокерамічних елементів так, щоб їх імпеданс зменшився, і, таким чином збільшуючи їх чутливість. Як правило, ПЕП виготовляють з п'єзокомпозитних матеріалів, і наповнювача, такого як епоксидна смола. П'єзокомпозитні матеріали мають різні властивості в залежності від того, як модифікований матеріал [19].

У світі широко використовують і розробляють різні схеми і види ультразвукових ємнісних мікромеханічних ультразвукових перетворювачів (ЄМУП) для генерації і детектування ультразвуку в повітрі [20]. Пристрій (рис. 1) являє собою плоский конденсатор з одним жорстким нерухомим електродом і гнучким рухомим (що представляє

собою мембрану) з повітряними порожнинами між ними. Мембрана являє собою діелектричний полімер, такий як поліетилентерефталат (ПЕТ або майлар), одна сторона якого анодована алюмінієм. На електроди подається постійна напруга зсуву, виникають протилежні заряди на двох електродах і рухома мембрана притягається до нерухомого електроду. Відбувається поширення ультразвуку в повітрі. Частота коливань залежить від товщини і маси мембрани. Мембрана ємнісного мікромеханічного перетворювача активується напругою. Зазвичай використовують напругу підвищеної частоти, особливо високочастотну напругу плюс зміщення постійним струмом. Розміри полімерної плівки на рис.1 і елементів задньої панелі сильно перебільшені для ясності.

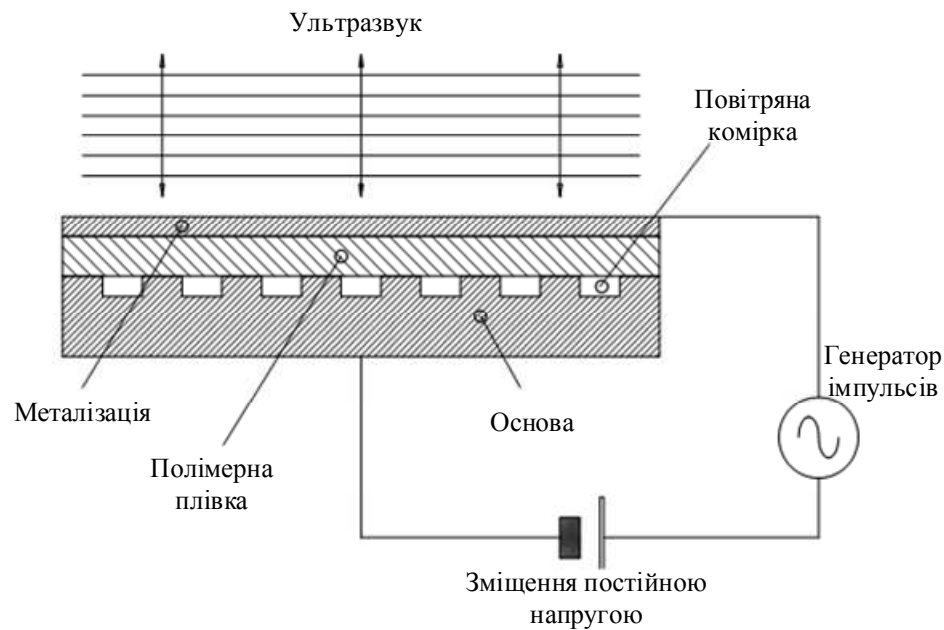


Рисунок 1 - Схема ємнісного перетворювача

При роботі в якості приймача, ультразвукові хвилі приводять до коливання мембрани, внаслідок чого змінюється ємність перетворювача, що може бути виміряна за допомогою електроніки. Ємнісні датчики даного типу служать як випромінювачами, так і приймачами ультразвукових сигналів.

Через малу масу мембрани, ЄМУП є ширококутовими тому з їх допомогою можна генерувати широкий спектр ультразвукових частот. Частотна характеристика визначається не тільки товщиною мембрани, але і жорсткістю

і розміром поверхні нерухомого електроду. Для генерації і реєстрації ультразвукових коливань в рідині їх необхідно герметизувати шляхом підбору матеріалу мембрани. Перетворювачі можуть працювати при температурах понад 500 °С.

Один елемент датчика може бути об'єднаний в масив, з'єднаних паралельно перетворювачів. (рис. 2). Частотний діапазон (100 кГц - 70 МГц), динамічний діапазон (130 дБ / В), максимальний тиск на виході (35 кПа/В), і чутливість приймача (50 дБ/Па/ Гц)

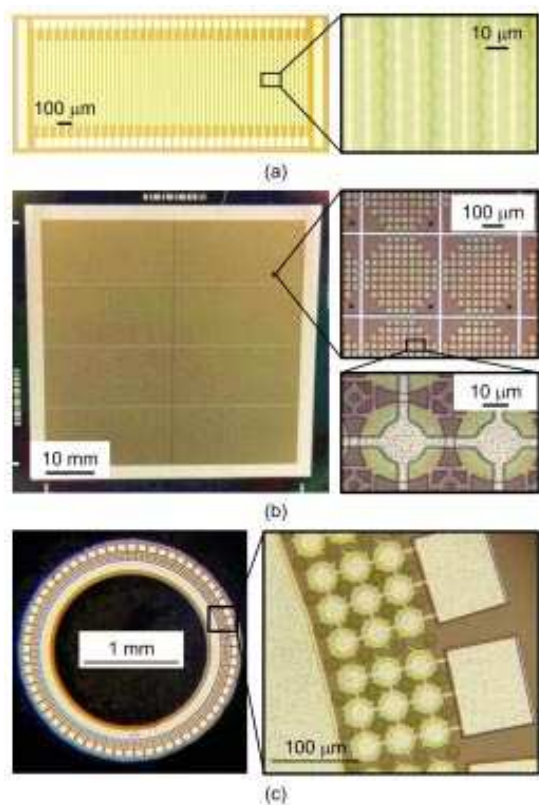


Рисунок 2 - СМУП масив:

- а) А 64 - елементний 30 МГц лінійний масив з кроком елементів 36 мкн;
 б) А 128 x 128 - елементний 30 МГц прямокутний масив з кроком елементів 420 мкн; с) А 64 елементний 10 МГц кругової масив з 100 мкн розміром елемента

Слід зазначити, що дані датчики в основному застосовуються в медичних ультразвукових перетворювачах (традиційних, вигнутих або матричних перетворювачах, в катетера), в бортових ультразвукових датчиках присутності, в датчиках тиску, в ультразвукових датчиках CO₂ для капнографії або в системах контролю повітря для будівель, в датчиках рівня рідини і якості рідини і в датчиках відбитків пальців. Використання датчиків даного типу в ультразвуковому неруйнівному контролі поки не знайшло застосування.

Останнім часом дослідження нових методів неруйнівного контролю та вдосконалення за рахунок стрімкого розвитку схемотехніки і електроніки вже існуючих набуває все більшого обороту. Не так давно було доведено перспективність застосування емнісних перетворювачів в області неруйнівного

контролю, принцип роботи яких схожий з роботою СМУП [20], на відміну від них емнісні перетворювачі (ЄП) складаються з двох обкладок, однією з яких (друга) служить сам об'єкт контролю (ОК), розміри і форму першої можна варіювати відповідно від сформованих завдань. Також чутливість ЄП залежить від діелектрика між пластинами і схемотехнічного рішення самого макета приладу. У даній роботі авторами розроблений потужний одно полярний підсилювач імпульсів напруги зі змінними параметрами для живлення перетворювачів емнісного типу, що послужить значним підвищенням амплітуди прийнятих ультразвукових імпульсів.

Розробка, дослідження і аналіз результатів

Аналіз відомих літературних джерел [21-25] дозволив сформулювати вимоги до параметрів генератора високочастотних імпульсів (ГВІ), котрий повинен забезпечувати живлення ЄП, наприклад в найчастіше використовуваному для контролю і вимірювань частотному діапазоні. Він повинен формувати в ЄП, з нескінченним опором постійному струму, пакетні імпульси напруги з частотою заповнення від 1 до 5 МГц. Кількість періодів частоти заповнення імпульсу має становити 1 шт. Максимальна пікова амплітуда напруги на першій обкладці ЄП повинна бути не менше 3 кВ. Частоту слідування зондуючих імпульсів необхідно регулювати в інтервалі від 10 Гц до 1 кГц в залежності від швидкості сканування ОК.

На підставі аналізу характеристик елементів силової електроніки, автори даної статті, прийшли до висновку про доцільність застосування в вихідних каскадах широкополосних симетричних трансформаторів, включених паралельно, а потім послідовно для досягнення коефіцієнта трансформації рівним 10. Були виконані експериментальні дослідження можливостей ряду підвищувальних трансформаторів на основі сердечників з фериту. Встановлено, що вони не дозволяють формувати вихідний сигнал необхідного частотного діапазону. У той же час було показано, що в заявленому частотному діапазоні деякі моделі MOSFET транзисторів в одноканальних схемах включення переключуються з достатніми часовими проміжками.

Для реалізації розробленого технічного рішення запропоновано формувати вихідний імпульс генератора високовольтних імпульсів у вигляді меандру, який перетворюється в синусоїду за рахунок ємнісних складових коаксіального кабелю, що підводиться і самого ПЕТ. Такий підхід дає можливість спростити високовольтну частину генератора, особливо на високих частотах зондування, і отримувати в навантаженні значні амплітуди збуджуючої напруги. Експериментально встановлено доцільність застосування паралельного включення до 10 шт. ширококутних симетричних трансформаторів в мостовому включенні, що дозволяє збільшити напругу за рахунок застосування високо частотних широкополосних симетричних трансформаторів. Польові MOSFET транзистори повинні витримувати імпульсний струм до

100 А, а також мати затвор з відносно невеликою ємністю «витік-затвор» для швидкого перезарядження затвора, і в слідстві швидкої комутації навантаження.

Встановлено доцільність виготовляти ГВІ у вигляді трьох основних блоків - формувача сигналів з регульованими параметрами, гальванічної оптичної розв'язки і високо частотного ширококутвого підсилювача потужності.

На основі сформованого підходу розроблений ГВІ, який дозволяє виконувати вимоги, необхідні для живлення ЄП сучасних засобів контролю, вимірювання і діагностики. Як приклад такої розробки на рис. 3 приведена електрична принципова схема блоку формувача ГВІ.

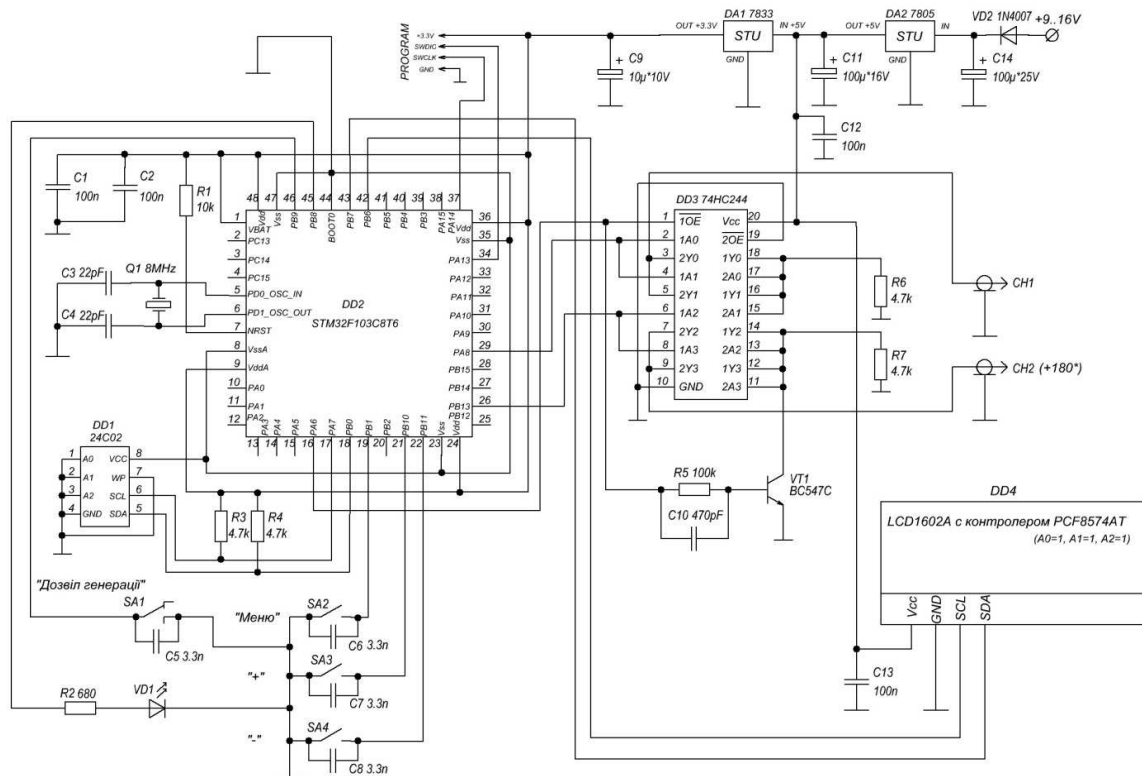


Рисунок 3 - Схема електрична принципова блоку формувача ГВІ

Пристрій для формування сигналів з регульованими параметрами виконаний на мікроконтролері DD2 типу STM32. Він формує послідовність прямокутних імпульсів амплітудою 3,3 В зі скважністю, рівною 2 (меандр), які необхідні для живлення наступних

каскадів ГВІ. Управління частотою і періодом проходження імпульсів здійснюється за допомогою кнопок SA1 SA4. Тимчасові діаграми вихідних сигналів блоку формувача показані на рис. 4 .

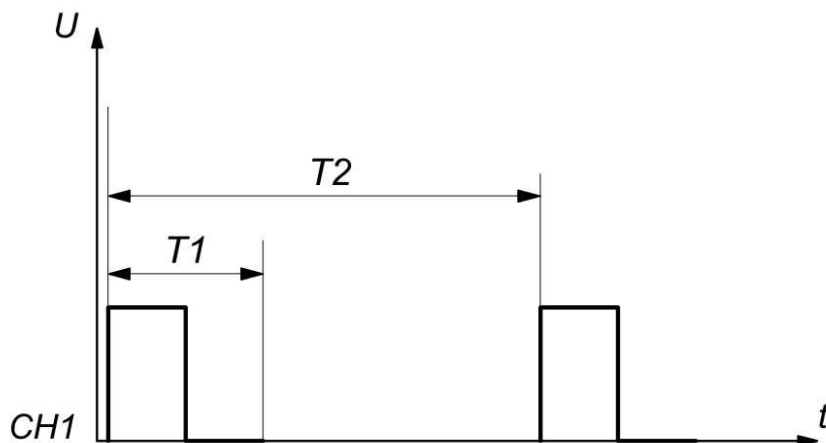


Рисунок 4 - Тимчасова діаграма вихідних сигналів блоку формувача:
 T1 – період збуджуючого імпульсу; T2 - період слідування імпульсів

Згенерований з виходу мікроконтролера DD2 імпульс надходить на вхід буферного повторювача DD3. Буферний повторювач використовується для посилення вихідного сигналу по напрузі до рівня 5В (рівень логічної «1» на виході з генератора) а також для забезпечення крутих фронтів, сформованих прямокутних послідовностей імпульсів.

Кнопка з фіксацією SA1 служить для дозволу генерації послідовності імпульсів. Її необхідність полягає в тому, щоб можна було вимкнути генерацію, зробити коригування параметрів генератора, а потім знову включити

генерацію із заданими параметрами. Кнопки SA2 SA4 необхідні для переходу по меню налаштувань і їх коригування. Збереження налаштувань генератора здійснюється в DD1.

Для захисту мікроконтролера DD2 від радіоперешкод, що наводяться по лініях виходу буфера DD3, застосовано пристрій гальванічної розв'язки, принципова схема якого зображена на рис. 5.

Відображення поточних параметрів здійснюється на рідкокристалічному індикаторі DD4.

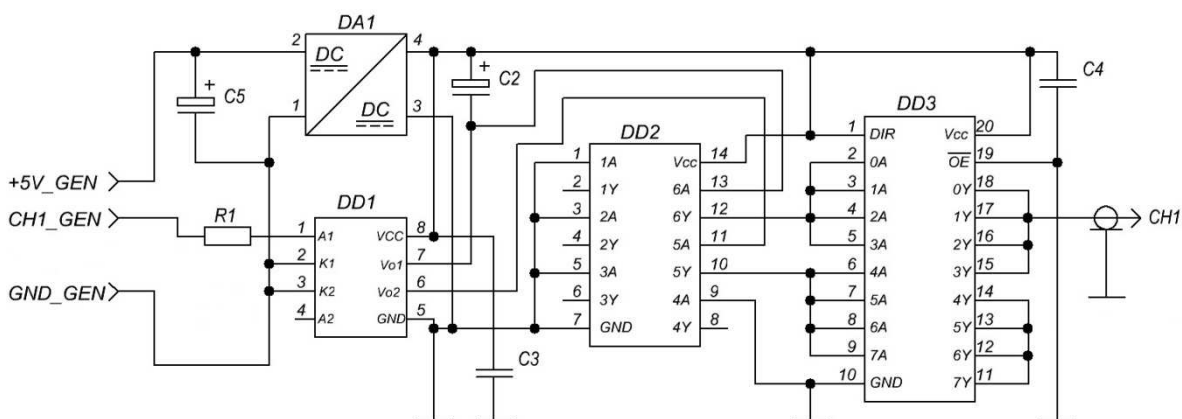


Рисунок 5 - Принципова схема модуля гальванічної опторозв'язки ГВІ

Модуль гальванічної опторозв'язки складається з DC / DC перетворювача DA1, оптопари DD1, інвертора логічних рівнів DD2 і буфера DD3. Вихід буферного повторювача

DD3 підключений до схеми високовольтного комутатора, який зображений на рис. 6. Високовольтний комутатор складається з буферного повторювача DD1 для регенерації

форми прийнятого сигналу, драйвера затвора MOSFET транзистора і високовольтного польового ключа (транзистора). Витік польового ключа підключається до первинної обмотки симетричного широкосмугового

високовольтного трансформатора. Другий контакт первинної обмотки трансформатора підключений до позитивної полярності джерела живлення напругою 300 Вольт.

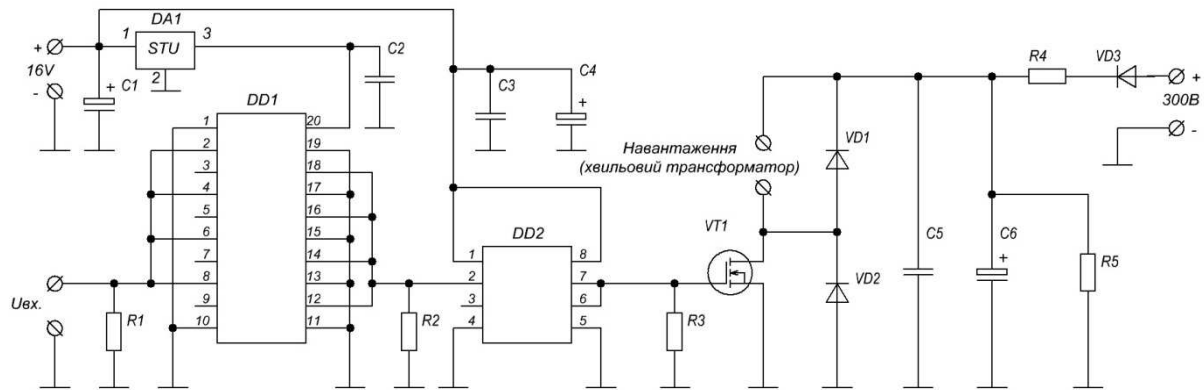


Рисунок 6 - Принципова схема високовольтного комутатора ГВІ

Симетричний широкосмуговий трансформатор зображений на рис. 7. Він складається з десяти феритових кілець, розмірами K20x12x6 і має по сім витків коаксіального кабелю RG59 з хвильовим опором 75 Ом. Кожен з трансформаторів є згоджуючим, тобто має хвильовий опір по 75 Ом по входу і виходу. Входи всіх десяти трансформаторів включені паралельно, а виходи послідовно. Це означає, що вхідний хвильовий опір отриманого симетричного широкосмугового трансформатора становить 7,5 Ом, тобто в 10 разів менше хвильового опору коаксіального кабелю. Для того, щоб робота трансформатора була узгодженою, вихід трансформаторної збірки необхідно навантажити на опір рівний 10 кратному опору коаксіального кабелю, тобто 750 Ом. Блоки живлення на схемах не вказані.

Для виконання експериментальних досліджень щодо збудження ультразвукових імпульсів ЄП розроблений стенд, блок-схема якого наведена на рис. 8. До складу стенду входить електропровідні плоско паралельні пластини 9 товщиною 20 мм (об'єкт контролю) без зачистки його поверхні введення ультразвукових імпульсів. На пластину 9 через діелектрик 8 товщиною 0,06 мм помістили круглий електрод 7 зі сталі товщиною 0,25 мм і діаметром 26 мм. До електроду 7, через розділовий конденсатор 5 (ємність якого на порядок більше ємності перетворювача)

прикладається змінна напруга з амплітудою 3 кВ. Для виключення тимчасового впливу поляризаційного ефекту в діелектрику під електродом ЄП на результати вимірювань амплітуди, у складі стенду використане джерело поляризуючої електричної напруги 6 (3 кВ). Пакетні імпульси тривалістю 1 період і частотою 5 МГц формуються генератором 1, який через гальванічну розв'язку 2 генерує імпульси на високовольтний комутатор 3, функція якого в комутації первинної обмотки підвищувального широкополосного симетруючого трансформатора 4 на «землю» для створення на вторинній обмотці імпульсів високої напруги.

Щоб не допустити влучення поляризуючої напруги на трансформатор застосований плівковий неполярний конденсатор 5. З протилежного боку пластини 9 встановлений мініатюрний п'єзоелектричний перетворювач (ПЕП) 10 (з резонансною частотою 5 МГц, радіусом 2 мм), підключений до малотшумливого смугового підсилювача 11 з коефіцієнтом посилення рівним 1000. З виходу підсилювача 11 прийнятий сигнал подається на осцилограф 12.

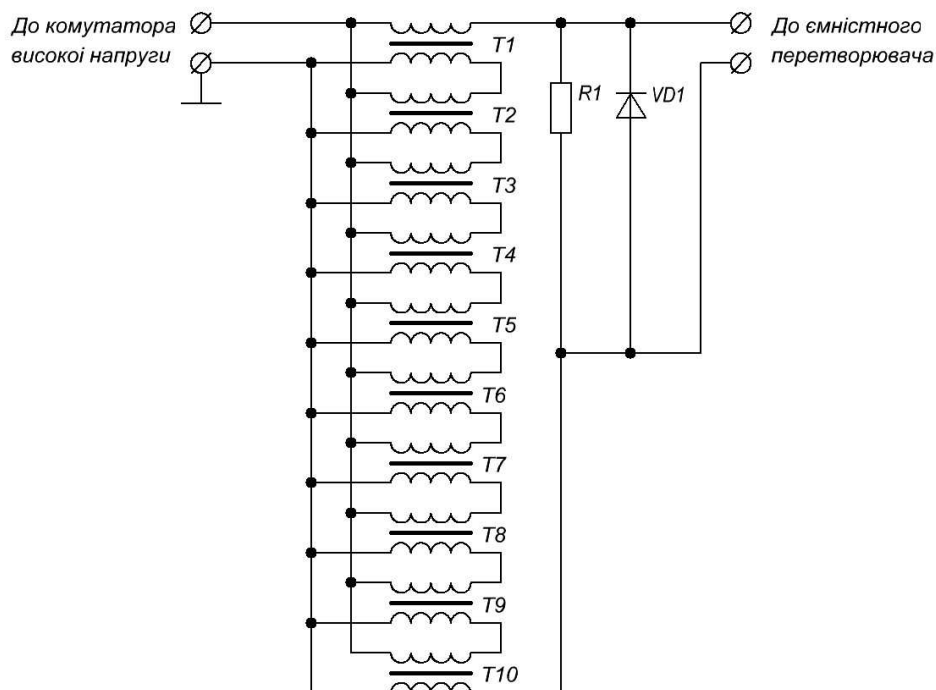


Рисунок 7 - Симетричний підвищувач широкосмуговий трансформатор

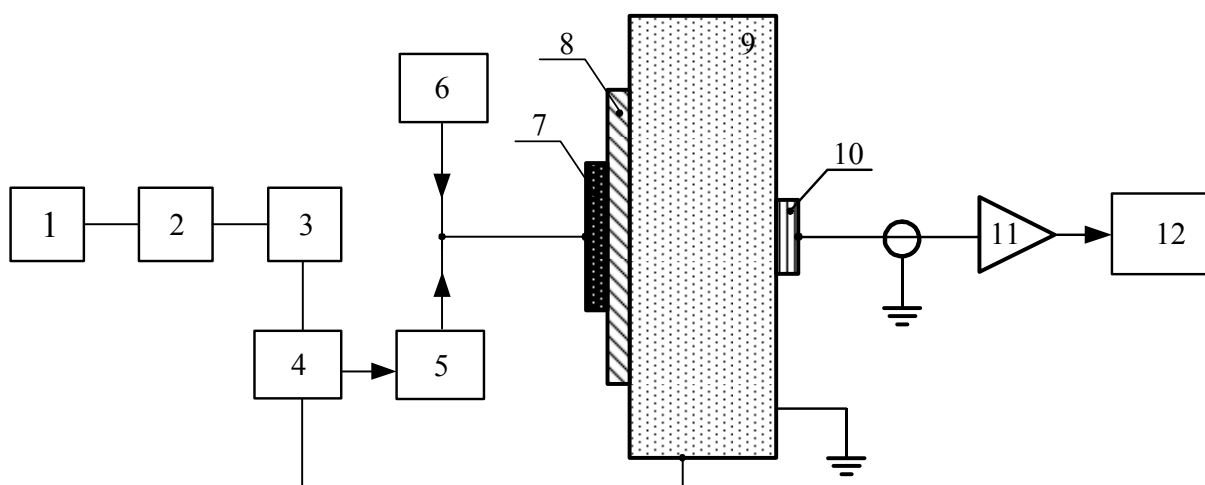


Рисунок 8 - Блок-схема експериментальної установки:

1 - генератор високочастотних імпульсів; 2 - гальванічна розв'язка; 3 - високовольтний комутатор; 4 - підвищувач широкосмуговий симетруючий трансформатор; 5 - розділовий конденсатор; 6 - джерело поляризуючої електричної напруги; 7 - електрод ЄП; 8 - діелектричний шар; 9 - об'єкт контролю; 10 - мініатюрний ПЕП; 11 - малoshумливий смуговий підсилювач; 12 - осцилограф

На рис.9 показана реалізація на екрані осцилографа ультразвукових імпульсів, що випромінюються ЄП і прийнятих мініатюрним ПЕП.

Аналіз даних наведених на рисунку 8 показує, що відношення амплітуд донних

імпульсів і завад без застосування методів обробки прийнятих донних імпульсів становить близько 13. Таким чином, підтверджується можливість проведення вимірювань.

Розробленим ГВІ за рахунок збільшення величини поляризуючої напруги і пікової

амплітуди змінної напруги можливе значне підвищення амплітуди збуджуючих ультразвукових пакетних імпульсів.

Розроблений генератор дозволяє сформувати одиночний імпульс з заданим періодом проходження. До недоліків можна віднести неможливість формування імпульсу негативної полярності, а отже, і неможливість формування більш одного періоду коливань в генерованому пакеті. Тому подальша розробка повинна передбачати можливість формування імпульсів як позитивної, так і негативної полярності, тобто двухполярного генерування високовольтних імпульсів, отже, з'явиться можливість формувати більш одного імпульсу в пакеті, що в підсумку призведе до збільшення сигнал / завада на прийомі.

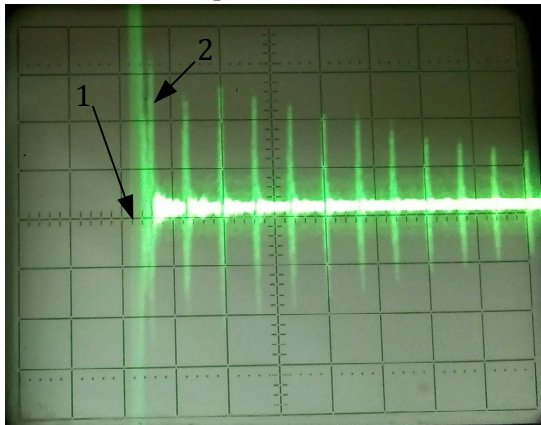


Рисунок 9. – Прийнята мініатюрним ПЕП послідовність імпульсів, сформованої від однієї послідовності імпульсів, сформованої від однієї послідовності імпульсів датчика (0.2 В / поділлка, 10 мкс / поділлка):

1 - зондуєчий імпульс; 2 - перший прийнятий донний імпульс

Висновки

1. Розроблено блок формувача послідовності імпульсів, модуль гальванічної опторазв'язки, високовольтний напівміст і підвищуючий симетричний широкополосний трансформатор для використання в складі виміральної, контрольної і діагностичної техніки на основі ЄП.

2. Запропоновано варіант практичної реалізації одно полярного генератора потужних радіоімпульсів напруги на базі мікроконтролера, силових MOSFET транзисторів і симетричного підвищуючого широкосмугового трансформатора, який забезпечує на ЄП високочастотні високовольтні імпульси позитивної та негативної полярності,

амплітудою до 1 кВ, частотою до 5 МГц тривалістю три періоди частоти заповнення.

3. Експериментально доведено можливість реалізувати випромінювання ультразвукових коливань емнісним методом на практиці, із застосуванням сучасних досягнень в області електротехніки. Показано, що співвідношення донний сигнал / шум досягає 13 разів. Можливе подальше підвищення амплітуди збуджуючих імпульсів шляхом підвищення поляризуєчої і імпульсної напруг.

Список використаних джерел

1. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Каневский И.Н. Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. Пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
3. Сучков Г.М., Ноздрачова К.Л., Міщанчук Е.В., Єроценков В.М. Прилади і методи акустичного контролю: навч. посібн. Харків : НТУ «ХПІ», 2011. 220 с.
4. W. Kuhl, G.R. Schodder and F.-K. Schröder, 'Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonics, *Acustica* 1954, No 4. P. 519-532.
5. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágori, Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air, *Meas. Sci. Techn.* 1992, No 3. P. 249-261
6. Chimenti D.E., Fortunko C.M. Characterization of composite prepreg with gas-coupled ultrasonics. *Ultrasonics* 1994. No 32. P. 261-264.
7. Rogovsky A.J. Development and application of ultrasonic dry-contact and air-contact C-scan systems for non-destructive evaluation of aerospace composites. *Mat. Eval.* 1991. No 49, P. 1491-1497.
8. Babic M. 200-kHz ultrasonic transducer coupled to the air with a radiating membrane, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* 1991 UFFC-38. P. 252-255.
9. Lynnworth L.C. Ultrasonic impedance matching from solids to gases. *IEEE Trans. Sonics, Ultrason.* 1965 SU-12. P. 37-48.
10. Gururaja T.R., Schultze W.A., Cross L.E., Newnham R.E., Auld B.A. Wang Y.J. Piezoelectric

composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites. *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 1985. SU 32. P. 481-498.

11. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. High-frequency acoustic wave measurements in air'. *Proc. IEEE 1983 Ultrason. Symp.*, Vol.1, P. 581-584.

12. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. Acoustic resonator transducer for operation in air. *Elec. Lett.* 1985. No 21. P. 694-696.

13. Krauß O., Gerlach R., Fricke J. Experimental and theoretical investigations of SiO₂-aerogel matched piezo-transducers. *Ultrason.* 1994. No 32, P. 217-222.

14. Teshigawara M., Shibata F., Teramoto H. High resolution (0.2mm) and fast response (2ms) range finder for industrial use in air. *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, P. 639-642.

15. Tone M., Yano T. and Fukumoto A. High-frequency ultrasonic transducer operating in air. *Japan. J. Appl. Phys.* 1984, No 23, P. 436-438.

16. Fortunko C.M., Schramm R.E., Teller C.M., Light G.M., McColskey J.D., Dubé W.P. Renken M.C. Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging. *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval.* 1995. Vol. 14A and 14B, Ch. 312, P. 951-958.

17. Platte M. PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing. *Ferroelectrics.* 1991, No 115. P. 229-246.

18. Ohigashi H., Koga K., Susuki M. Nakamishi T. Piezoelectric and ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) copolymers and their application to ultrasonic transducers. *Ferroelectrics* 1984, No 60. P. 263-276.

19. Newnham R.E., Skinner D.P. Cross L.E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mat. Res. Bull.* 1978. No 13. P. 525-536.

20. Sahdom A.S. Application of Micro Electro-Mechanical Sensors (MEMS) Devices with Wifi Connectivity and Cloud Data Solution for Industrial Noise and Vibration Measurements.. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1262, 1st Colloquium on Noise, Vibration and Comfort 7 March 2019, Selangor, Malaysia DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1262/1/012025>

21. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of

ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics.* 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>

22. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Теория и практика електромагнітно-акустического контролю. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография. Харків: ТОВ «Планета-принт», 2016. 230 с.

23. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Радев Х.К., Петрищев О.Н., Десятниченко А.В. Электромагнитно-акустический преобразователь для ультразвуковой толщинометрии ферромагнитных металлоизделий без удаления диэлектрического покрытия. *Технічна електродинаміка.* 2016. №2. С. 78–82.

24. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics.* No 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>

25. Мигачев С.А., Куркин М.И., Смородинский Я.Г. Бесконтактное возбуждение звука в металле видеоимпульсом электрического поля. *Дефектоскопия.* 2016. № 11. С. 48—53.

References

1. Ermolov I. N., Lange Yu. V. Nerazrushayuschiy kontrol: Spravochnik: V 7 t. Pod obsch. red. V. V. Klyueva. T. 3: Ultrazvukovoy kontrol M.: Mashinostroenie, 2004. 864 p. [in Russian]

2. Kanevskiy I.N. Salnikova E.N. Nerazrushayuschie metody kontrolya: ucheb. Posobie. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2007. 243 p. [in Russian]

3. Suchkov H.M., Nozdrachova K.L., Mishchanchuk E.V., Yeroshchenkov V.M. Prylady i metody akustychnoho kontroliu: navch. posibn. Kharkiv : NTU «KhPI», 2011. 220 p. [in Ukrainian]

4. W. Kuhl, G.R. Schodder and F.-K. Schröder, 'Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonics, *Acustica* 1954, No 4. P. 519-532.

5. W. Manthey, N. Kroemer and V. Mágori, Ultrasonic transducers and transducer arrays for

applications in air, *Meas. Sci. Techn.* 1992, No 3. P. 249-261

6. Chimenti D.E., Fortunko C.M. Characterization of composite prepreg with gas-coupled ultrasonics. *Ultrasonics* 1994. No 32. P. 261-264.

7. Rogovsky A.J. Development and application of ultrasonic dry-contact and air-contact C-scan systems for non-destructive evaluation of aerospace composites. *Mat. Eval.* 1991. No 49, P. 1491-1497.

8. Babic M. 200-kHz ultrasonic transducer coupled to the air with a radiating membrane, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* 1991 UFFC-38. P. 252-255.

9. Lynnworth L.C. Ultrasonic impedance matching from solids to gases. *IEEE Trans. Sonics, Ultrason.* 1965 SU-12. P. 37-48.

10. Gururaja T.R., Schultze W.A., Cross L.E., Newnham R.E., Auld B.A. Wang Y.J. Piezoelectric composite materials for ultrasonic transducer applications. Part I: Resonant modes of vibration of PZT rod-polymer composites. *IEEE Trans. Son. Ultrason.* 1985. SU 32. P. 481-498.

11. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. High-frequency acoustic wave measurements in air'. *Proc. IEEE 1983 Ultrason. Symp.*, Vol.1, P. 581-584.

12. Fox J.D., Khuri-Yakub B.T. Kino G.S. Acoustic resonator transducer for operation in air. *Elec. Lett.* 1985. No 21. P. 694-696.

13. Krauß O., Gerlach R., Fricke J. Experimental and theoretical investigations of SiO₂-aerogel matched piezo-transducers. *Ultrason.* 1994. No 32, P. 217-222.

14. Teshigawara M., Shibata F., Teramoto H. High resolution (0.2mm) and fast response (2ms) range finder for industrial use in air. *Proc. 1989 IEEE Ultrason. Symp.*, P. 639-642.

15. Tone M., Yano T. and Fukumoto A. High-frequency ultrasonic transducer operating in air. *Japan. J. Appl. Phys.* 1984, No 23, P. 436-L438.

16. Fortunko C.M., Schramm R.E., Teller C.M., Light G.M., McColskey J.D., Dubé W.P. Renken M.C. Pulse-echo gas-coupled ultrasonic crack detection and thickness gaging. *Proc. Rev. Quant. Nondest. Eval.* 1995. Vol. 14A and 14B, Ch. 312, P. 951-958.

17. Platte M. PVDF ultrasonic transducers for ultrasonic testing. *Ferroelectrics*. 1991, No 115. P. 229-246.

18. Ohigashi H., Koga K., Susuki M. Nakamishi T. Piezoelectric and ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) copolymers and their application to ultrasonic transducers. *Ferroelectrics* 1984, No 60. P. 263-276.

19. Newnham R.E., Skinner D.P. Cross L.E. Connectivity and piezoelectric-pyroelectric composites. *Mat. Res. Bull.* 1978. No 13. P. 525-536.

20. Sahdom A.S. Application of Micro Electro-Mechanical Sensors (MEMS) Devices with Wifi Connectivity and Cloud Data Solution for Industrial Noise and Vibration Measurements.. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1262, 1st Colloquium on Noise, Vibration and Comfort 7 March 2019, Selangor, Malaysia DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1262/1/012025>

21. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics*. 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>

22. Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Desyatnichenko A.V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustroystv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdeliy: monografiya. Harkiv: TOV «Planeta-print», 2016. 230 p. [in Russian]

23. Miguschenko R.P., Suchkov G.M., Radev H.K., Petrishchev O.N., Desyatnichenko A.V. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel dlya ultrazvukovoy tolschinometrii ferromagnitnyh metalloizdeliy bez udaleniya dielektricheskogo pokryitiya. *TehnIchna elektrodinamIka*. 2016. No2. P. 78–82. [in Russian].

24. Myhushchenko R.P., Suchkov G.M., Petrishchev O.N., Nozdrachova K.L. Model of electromechanical receiving transducers of ultrasound Rayleigh wave. *Technical Electrodynamics*. No 2016(6). P. 83-89 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.083>.

25. Migachev S.A., Kurkin M.I., Smorodinskiy Ya.G. Beskontaktnoe vzbudzhenie zvuka v metalle videoimpulsom elektricheskogo polya. *Defektoskopiya*. 2016. No. 11. P. 48-53. [in Russian].

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.514:621

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-110-118

СПЕЦІАЛЬНЕ ПРОГРАМНЕ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДВОСТУПЕНЕВОГО НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В. М. Гарасимів, О. В. Мойсеєнко, Т. Г. Гарасимів*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: viraharasymiv78@gmail.com*

Ефективність оцінювання технічного стану основного обладнання компресорних станцій залежить від вчасного попередження виникнення відмов, що, в свою чергу, визначається оцінкою технічного стану основного обладнання в умовах його експлуатації. Оскільки більшість компресорних станцій України використовують двоступеневі відцентрові нагнітачі природного газу, то в даній роботі розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення саме для двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, що дозволяє, із врахуванням особливостей побудови його проточної частини, визначити його основні параметри технічного стану.

Представлений в роботі алгоритм системи контролю параметрів технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача дозволяє визначити черговість отримання інформації від давачів, способів аналізу інформації і порядок представлення її оператору.

З метою аналізу та визначення технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу під час його експлуатації в роботі розроблене програмне забезпечення системи контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача, що оформлено у вигляді прикладного програмного модуля, написаного об'єктно-орієнтованою мовою Delphi із можливістю його інтегрування в існуюче програмне забезпечення керування роботою нагнітача. Розроблений програмний продукт забезпечує збирання та оброблення даних, ідентифікацію параметрів математичної моделі відцентрового нагнітача, визначення значень його об'ємної продуктивності до та після капітального ремонту, розрахунок параметрів технічного стану нагнітача, а також експертну оцінку технічного стану його проточної частини із використанням нечіткої логіки.

Розроблене програмне забезпечення підтримки задачі контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача перевірене під час експлуатації двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу ВЦН-650-21-2 на КС-39 «Прогрес» Богородчанського лінійного виробничого управління магістральними газопроводами. Встановлено, що технічний стан проточної частини нагнітача – допустимий.

Ключові слова: компресорна станція, відцентровий нагнітач, параметри технічного стану, програмне забезпечення, програмний модуль, SCADA-система, лінійне виробниче управління магістральними газопроводами.

Эффективность оценки технического состояния основного оборудования компрессорных станций зависит от своевременного предупреждения возникновения отказов, что, в свою очередь, определяется оценкой технического состояния основного оборудования в условиях его эксплуатации. Поскольку большинство компрессорных станций Украины используют двухступенчатые центробежные нагнетатели природного газа, то в данной работе разработано алгоритмическое и программное обеспечение именно для двухступенчатого центробежного нагнетателя природного газа, что позволяет с учетом особенностей построения его проточной части определить его основные параметры технического состояния.

Представленный в работе алгоритм системы контроля параметров технического состояния двухступенчатого центробежного нагнетателя позволяет определить очередность получения информации от датчиков, способов анализа информации и порядок представления ее оператору.

С целью анализа и определения технического состояния двухступенчатого нагнетателя природного газа при его эксплуатации в работе разработано программное обеспечение системы контроля параметров

двухступенчатого центробежного нагнетателя, что оформлено в виде прикладного программного модуля, написанного объектно-ориентированным языком Delphi с возможностью его интеграции в существующее программное обеспечение управления работой нагнетателя. Разработанный программный продукт обеспечивает сбор и обработка данных, идентификацию параметров математической модели центробежного нагнетателя, определения значений его объемной производительности до и после капитального ремонта, расчет параметров технического состояния нагнетателя, а также экспертную оценку технического состояния его проточной части с использованием нечеткой логики.

Разработанное программное обеспечение поддержки задачи контроля параметров двухступенчатого центробежного нагнетателя проверено во время эксплуатации двухступенчатого центробежного нагнетателя природного газа ВЦН-650-21-2 на КС-39 «Прогресс» Богородчанского линейного производственного управления магистральными газопроводами. Установлено, что техническое состояние проточной части нагнетателя - допустим.

Ключевые слова: компрессорная станция, центробежный нагнетатель, параметры технического состояния, программное обеспечение, программный модуль, SCADA-система, линейное производственное управление магистральными газопроводами.

Efficiency of the technical state of the compressor station basic components depends on the timely prediction of the appearance of damages. It is defined by the estimation of the technical state of the basic components during the compression process. It is known that the two-stage centrifugal compressors are commonly used in the Ukrainian compressor stations. So, application software and algorithm for the two-stage centrifugal compressor have been developed, what allows to define its technical state parameters, taking into account the construction features of the compressor volute.

The algorithm of the control system of the technical state parameters for the two-stage centrifugal compressor has been represented, what allows to define the receiving of the information order from sensors, methods of the information analysis and the representing order of the information to the operator.

Application software for the control system of the technical state parameters of the two-stage centrifugal compressor has been organized like the application program module to aim to analyze and define the technical state of the two-stage centrifugal compressor during the compression process. It was written in the object-oriented language Delphi, and with the opportunity of its integration into existing software for controlling the compressor. The software provides the capability of data collection and processing, the mathematical model parameters identification of the centrifugal compressor, determining volumetric productivity values, which correspond to the conditions where the centrifugal compressor is a new one or after its overhaul, calculating technical state parameters of the compressor and the expert estimation of the volute technical state of the two-stage centrifugal compressor based on fuzzy logic.

Application software for the parameters control of the two-stage centrifugal compressor has been tested during operation of the two-stage centrifugal compressor 650-21-2 of the compressor station 39 of Bogorodchany linear production administration of gas transmittal pipelines. Obtained results confirmed the average deterioration of the volute technical state.

Keywords: compressor station, centrifugal compressor, technical state parameters, application software, application program module, SCADA system, linear production administration of gas transmittal pipelines.

Вступ

Надійна експлуатація газотранспортної системи (ГТС) України залежить від ефективного і вчасного оцінювання технічного стану основного обладнання компресорних станцій (КС), в тому числі відцентрового нагнітача (ВЦН) та його складових елементів. Відомо, що контроль параметрів технічного стану ВЦН реалізуються під час проведення планово-попереджувальних ремонтів, що має ряд недоліків. По-перше, ВЦН може бути виведений у ремонт у справному стані при досягненні терміну чергового ремонту. По-друге, дефекти вузлів ВЦН під дією зовнішніх та суб'єктивних чинників (порушення правил

експлуатації, недосконалість конструкції) можуть розвиватися стрімко в міжремонтний період, що веде до втрати його працездатності і в подальшому до ремонтно-відновлювальних робіт [1].

Тому особливого значення контроль параметрів газоперекачувального обладнання набуває в міру розроблення автоматизованої системи, в рамках якої може бути реалізована комплексна система контролю параметрів основного і допоміжного обладнання КС, що дозволить простежити за появою і розвитком поступових відмов.

Аналіз літературних джерел

Спектр методів контролю параметрів газоперекачувальних агрегатів (ГПА) та його складових елементів є дуже широким та різноманітним, тому вибір оптимального з них у кожному конкретному випадку визначається типом агрегату, а також наявними ресурсами. Досить часто на практиці здійснюють контроль не основних параметрів роботи ГПА, а відхилень від їхніх паспортних значень [2-4]. Дані параметри носять назву параметрів технічного стану, за розбиттям простору яких визначають розпізнавання технічних станів ГПА: справний, несправний, працездатний, непрацездатний, функціонувальний, нефункціонувальний. Недоліком даних методів є те, що їхня ефективність залежить від точності обчислення фактичних характеристик агрегата та порівняння їх із його базовими характеристиками.

На сьогодні набули поширення нові методи контролю параметрів ГПА – аеротермоакустичні методи. Їх основоположником є Козирьов В. Т., який у своїй роботі [5] розглядає газотурбінний двигун (ГТД) як систему, що включає дві підсистеми (механічну та аеротермоакустичну), що взаємодіють між собою. При виконанні проектування ГТД має бути відсутня сильна енергетична взаємодія (резонанс) між механічними та аеротермоакустичними підсистемами ГТД. Згідно з теорією Гельмгольца акустична система ГТД складається з чотирьох парціальних акустичних систем, на основі яких будується математична модель об'єкта. Цей метод має високу точність, яка перевірена відповідними дослідженнями, проте потребує дорогої апаратури та підтвердження його ефективності для всіх типів ГПА.

Більшість методів контролю параметрів ГПА та його складових елементів, які розглянуті авторами праць [6-8] реалізуються під час його експлуатації та передбачають монтування додаткових датчиків, що є проблематичним, оскільки потрібна модернізація обладнання та переоформлення відповідної технічної документації. Оскільки більшість нагнітачів, які постачає промисловість в останні роки, мають два ступені [1], то актуальною є задача розроблення системи контролю параметрів

двоступеневого ВЦН з можливістю її подальшої інтеграції в склад існуючої системи автоматичного керування (САК) ГПА, що забезпечить оцінювання функціонального стану нагнітача в умовах його експлуатації.

Основна частина

Для розв'язання основних задач автоматизації технологічного процесу (ТП) компримування газу і для проектування верхнього рівня систем на КС «Богородчани» використовують SCADA-систему Citect фірми Citect. Програмне забезпечення (ПЗ) Citect включає всі необхідні функціональні блоки (тренди, звіти, драйвери, протоколи) і дозволяє реалізувати віддалений моніторинг системи управління ТП [9].

Верхній рівень САК має забезпечити отримання інформації від усіх датчиків системи, її аналізування, зберігання і представлення диспетчеру [10]. Ці дії не можуть бути виконані одночасно, тому зі створенням системи контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН потрібно визначити черговість отримання інформації від датчиків, способів аналізу інформації і порядок представлення її оператору, тобто розробити алгоритм системи контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН (рис. 1).

ПЗ системи контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН оформлене у вигляді прикладного програмного модуля, в який інтегрована низка програмних продуктів, розроблених у середовищах MatLab та Delphi, що забезпечить відображення інформації на екрані монітора автоматизованого робочого місця (АРМ) інженера. Із використанням функціональних клавіш, розміщених на робочому вікні, оператор може переглянути параметри технічного стану двоступеневого ВЦН, побудувати графіки зміни значень об'ємної продуктивності після капітального ремонту (КР) ВЦН, зміни об'ємної продуктивності ВЦН до КР, графічні результати ідентифікації параметрів математичної моделі та емпіричну модель двоступеневого ВЦН.

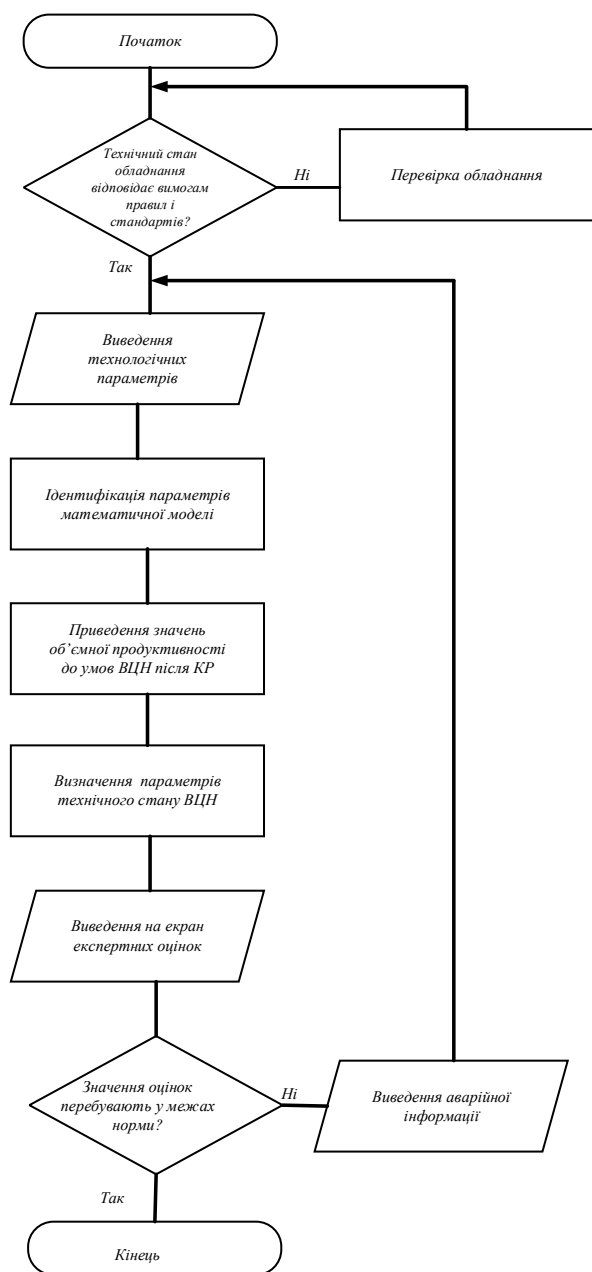


Рисунок 1 – Алгоритм системи контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН природного газу

Всі програмні продукти, об'єднані інтегратором, що написаний об'єктно-орієнтованою мовою Delphi та оформлений у вигляді об'єктного вікна в Citect. Розроблене ПЗ забезпечує реалізацію таких функцій:

- збирання та оброблення даних про технологічні параметри;
- ідентифікація параметрів математичної моделі ВЦН;

- визначення значень об'ємної продуктивності ВЦН до та після КР;
- розрахунок параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН;
- експертна оцінка технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН.

Взаємодія базового програмного комплексу та спеціального модуля пояснюється структурною схемою, наведеною на рисунку 2.

Інформаційно-вимірювальна система включає в себе давачі і виконавчі механізми для збирання інформації про значення технологічних параметрів, на основі яких контролери (САК ГПА) створюють масиви даних, які, за допомогою пристрою реєстрування інформації, реєструються в архіви для збереження значень технологічних параметрів для кожного із ВЦН.

Для розв'язку задачі контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН вхідними параметрами блоку ідентифікації параметрів математичної моделі є такі значення технологічних параметрів ВЦН: частота обертання робочого колеса, тиск газу на вході в нагнітач, тиск газу на виході нагнітача; перепад тиску на конфузори компресора нагнітача; температура газу на вході в нагнітач, температура газу на виході нагнітача.

Пристрій оброблення інформації здійснює перерахунок і приведення значень технологічних параметрів в одні часові рамки та формує базу даних (БД). Блок ідентифікації параметрів математичної моделі визначає параметри $X_i^{(0)}$, $i = \overline{0,4}$ та величини μ і k_T , які є вхідними величинами блоку побудови емпіричної моделі ВЦН, де виконується побудова емпіричної моделі ВЦН для обчислення значень об'ємної продуктивності $Q_j^{(count)}$, що перерахована до умов $Q_j^{(0)}$ [11].

Використовуючи значення величин $X_i^{(0)}$, $Q_j^{(count)}$ блок обчислення зміни параметрів технічного стану ВЦН визначає відносну зміну параметрів Δx_i , $i = \overline{0,3}$, за якими блок експертної оцінки оцінює технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН (вихідна змінна d) [12].

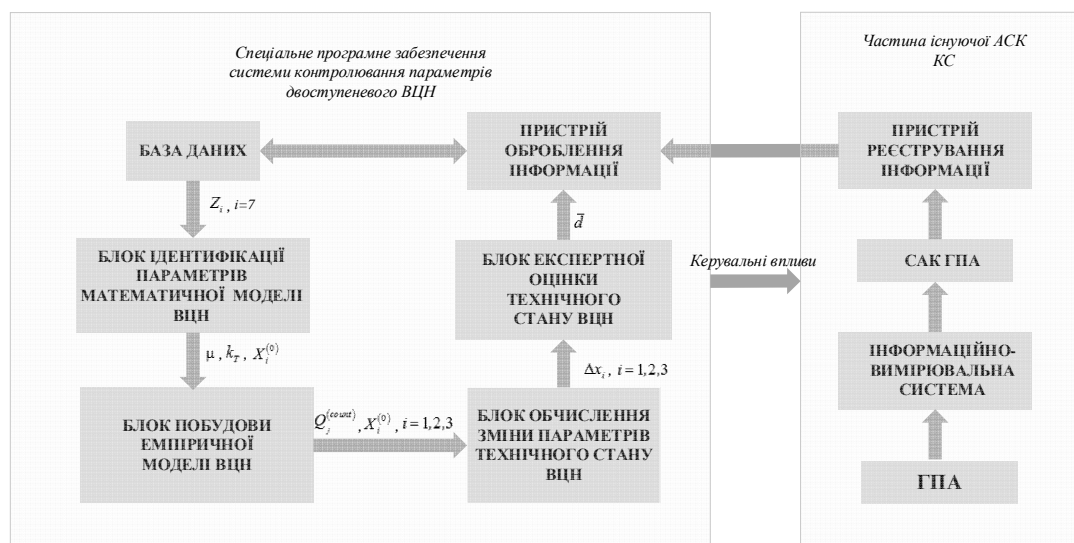


Рисунок 2 – Структурна схема системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу

БД, яка використовується для збереження інформації – це сукупність таблиць, які умовно можна поділити на службові та параметричні. Службові таблиці включають в себе інформацію про структуру самої БД, перелік вимірювальних параметрів та інше. Всі параметричні таблиці однакові за своєю структурою і містять в собі номер вимірювання, дату, час вимірювання та значення вимірюваного параметра [13].

Для роботи з Matlab як із сервером Автоматизації необхідно знати властивості та методи (інтерфейси), які надає сервер Автоматизації. Обмін даними між Delphi-додатком і Matlab з боку Delphi-додатки (диспетчера Автоматизації) здійснюється за допомогою змінних варіантного типу (тип OLEVariant). Matlab, як сервер Автоматизації, надає Delphi-додаткам свої функції PutFullMatrix і GetFullMatrix для обміну кількісьними масивами, а також функцію Execute для передавання команди на виконання операції сервером Автоматизації. Функції CreateOleObject та Quit відповідно відкривають і закривають сервер (Matlab) [10].

Після виконання зазначених дій запускається математичний блок ідентифікації параметрів математичних моделей нагнітачів, який входить до розробленого модуля програми і є окремою самостійною процедурою, що створена засобами математичного пакету Matlab.

Так як алгоритми, що розраховують параметри процесу компримування природного

газу, створені у вигляді окремих файлів системи MatLab, що мають запускатися в певній визначеній послідовності, то для їхньої консолідації в єдине ціле використовують наявні засоби цього математичного пакету.

На початковому етапі роботи сценарій зчитує із файлу input.bin, набори значень параметрів та поміщає їх у власні внутрішні структури даних – масиви.

```
x0:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x0i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X0','base',VarArrayRef(x0),VarArrayRef(x0i));
x1:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x1i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X1','base',VarArrayRef(x1),VarArrayRef(x1i));
```

У наведеному фрагменті коду відбувається передача значення змінних Matlab X_0 та X_1 у варіантні змінні (x_0, x_{0i}) й (x_1, x_{1i}) програми Delphi.

Створення графічного інтерфейсу для відображення результатів обчислень та забезпечення можливості діалогової взаємодії з користувачем здійснюється за допомогою типових елементів управління, що підтримуються будь-якою високорівневою мовою програмування.

Результати роботи математичного модуля відображаються не лише у вигляді текстової інформації (за допомогою списків), але й у вигляді графіків.

Програми модуля контролю параметрів двоступеневого ВЦН спрацьовують за вимогою диспетчера. Після запуску на екрані

відображається форма, зображена на рисунку 3. Це основна форма, що має робочу назву "Main".



Рисунок 3 – Основне вікно програми-інтегратора

Дане вікно (рис. 3) дозволяє контролювати параметри технічного стану нагнітача під час його експлуатації, обчислити їхні зміни від значень, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його КР, ідентифікувати параметри математичної моделі, побудувати емпіричну модель ВЦН та визначити поточний стан проточної частини нагнітача.

Після натиснення на кнопку "Провести розрахунок" відбувається послідовний запуск трьох сценаріїв: ідентифікації параметрів математичної моделі ВЦН, побудови емпіричної моделі ВЦН, експертної оцінки технічного стану проточної частини ВЦН.

У результаті їхнього виконання заповнюються текстові поля форм, що відповідають відповідним параметрам, та

будуються характерні графіки залежностей значень продуктивності нагнітача після КР від технологічних параметрів, графічні результати ідентифікації параметрів математичної моделі ВЦН із використанням генетичних алгоритмів, емпірична модель ВЦН [11].

У вікні відобразатиметься результат нечіткого висновку, що дозволяє установити значення вихідної змінної d та графік зміни об'ємної продуктивності ВЦН за поточний місяць. У даному випадку $d = 0,5$, що свідчить про те, що технічний стан проточної частини нагнітача – допустимий. Після натиснення на кнопку "Деталі" ідентифікації параметрів математичної моделі відбувається перехід на нову форму з відповідною назвою (рис. 4).

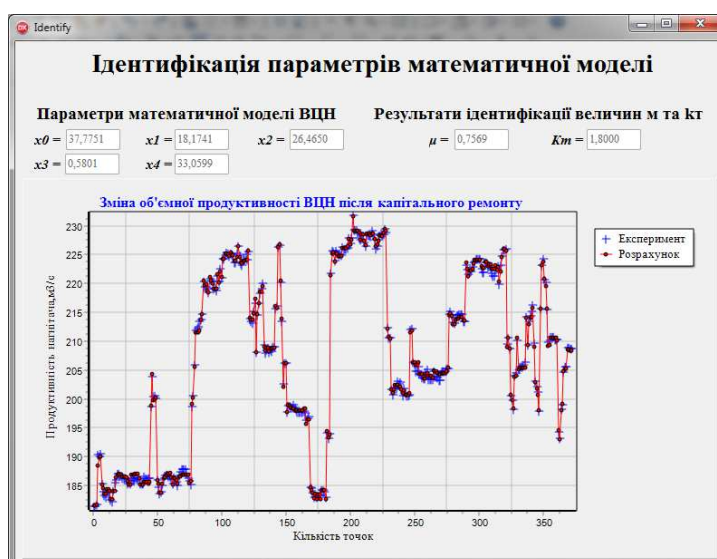


Рисунок 4 – Вікно «Ідентифікація параметрів математичної моделі»

У цьому вікні наведено параметри математичної моделі ВЦН $X_i^{(0)}$, результати ідентифікації величин μ , k_T та графік зміни значень об'ємної продуктивності нагнітача після КР. Після виходу з цієї форми відбувається перехід до основного вікна програми.

Після натиснення на кнопку "Деталі" побудови емпіричної моделі двоступеневого ВЦН відбувається перехід на нову форму з відповідною назвою (рис. 5).

У цьому вікні наведено результат синтезу емпіричної моделі ВЦН. Після виходу з цієї форми відбувається перехід до основного вікна програми.

Після натиснення на кнопку "Деталі" обчислення зміни параметрів двоступеневого ВЦН відбувається перехід на нову форму з відповідною назвою (рис. 6).

У цьому вікні наведено значення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН Δx_i , $i = \overline{0,3}$, за якими проводиться експертна оцінка поточного стану проточної частини ВЦН в основній формі з назвою "Main" (рис. 3). Після виходу з цієї форми відбувається перехід до основного вікна програми.



Рисунок 5 – Вікно «Побудова емпіричної моделі двоступеневого ВЦН»

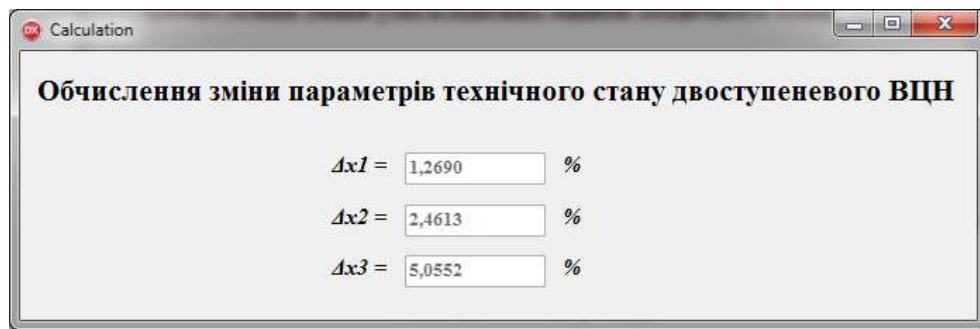


Рисунок 6 – Вікно «Обчислення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН»

Така організація забезпечує компактне відображення великої кількості графіків та текстової інформації, дозволяючи швидко переключатися між ними. Повний текст програми-інтегратора наведено у роботі [14].

Висновки

Розроблено блок-схему алгоритму системи контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН, що встановлює черговість отримання інформації від датчиків, способів аналізу інформації та порядок представлення її оператору

Також розроблено прикладний програмний продукт підтримки задачі контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН, написаний об'єктно-орієнтованою мовою Delphi, із можливістю його інтегрування в існуюче програмне забезпечення SCADA-системи Citect.

Список використаних джерел

1. Довідник інженера диспетчерської служби / за заг. ред. канд. техн. наук Ю.В. Пономарьова та М.П. Химка. Київ : УЦЕБОПнафтогаз, 2009. 245 с.
2. Горбійчук М.І., Скріпка О.А. Метод обчислення базових значень діагностичних ознак відцентрового нагнітача природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2005. № 15. С. 36–40.
3. Horbiychuk M. I., Humeniuk T. V., Povarchuk D. D. Fuzzy Identification of Technological Objects. *Energy Engineering and Control Systems*. 2015. № 1(1). P. 35–42.
4. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Нейрообчислювачі параметрів нагнітачів природного газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2002. № 5. С. 39–41.

5. Козырев В. Т. Автоколебательная аэротермоакустика газотурбинных двигателей. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 456 с.

6. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. Самара : Самарский государственный технический университет, 2009. 130 с.

7. Кузьо І. В., Шоловій Ю. П., Флюнт О. Р. Розвиток методів діагностики основного обладнання компресорних станцій. *Трубопровідний транспорт*. 2013. № 6 (84). С. 18–20.

8. Harihara P. Parasuram, Parlos Alexander G. Fault diagnosis of centrifugal pumps using motor electrical signals. USA, Texas : A&M University, 2012. 32 p.

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

10. Заячук Я. І. Система адаптивного управління процесом компримування природного газу. *Нафтогазова енергетика*. 2008. № 3 (8). С. 131–136.

11. Горбійчук М. І., Медведчук В. М. Метод параметричної ідентифікації технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу. *Нафтогазова енергетика*. 2015. № 1 (23). С. 78–85.

12. Гарасимів В. М., Гарасимів Т. Г., Мойсеєнко 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.

13. Заячук Я.І. Комп'ютерна система оптимального керування роботою відцентрових нагнітачів природного газу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. № 1. С. 258–263.

14. Гарасимів В. М. Ідентифікація та контроль параметрів двоступеневого нагнітача природного газу із використанням методів штучного інтелекту : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. Івано-Франківськ, 2018. 211 с.

References

1. Dovidnyk inzhenera dyspetcherskoi sluzhby / za zah. red. kand. tekhn. nauk Yu.V. Ponomarova ta M.P. Khymka. Kyiv : UTsEBOpnaftohaz, 2009. 245 p. [in Ukrainian]

2. Horbiichuk M.I., Skripka O.A. Metod obchyslennia bazovykh znachen diahnostychnykh oznak vidtsentrovoho nahnitacha pryrodnoho hazu. Metody ta prylady kontroliu yakosti. 2005. No 15. P. 36–40. [in Ukrainian]

3. Horbiychuk M. I., Humeniuk T. V., Povarchuk D. D. Fuzzy Identification of Technological Objects. Energy Engineering and Control Systems. 2015. № 1(1). P. 35–42.

4. Horbiichuk M. I., Kohutiak M. I., Kovaliv Ye. O. Neuroobchysliuvachi parametriv nahnitachiv pryrodnoho hazu. Naftova i hazova promyslovisht. 2002. No 5. P. 39–41. [in Ukrainian]

5. Kozyrev V. T. Avtokolebatelnaya aerotermostakustika gazoturbinnnykh dvigateley. Moskva : MG TU im. N. E. Baumana, 2005. 456 p. [in Russian]

6. Diligenskaya A.N. Identifikatsiya obektov upravleniya. Samara : Samarskiy gosudarstvenniy tekhnicheskii universitet, 2009. 130 p. [in Russian]

7. Kuzo I. V., Sholovii Yu. P., Fliunt O. R. Rozvytok metodiv diahnostyky osnovnoho obladnannia kompresornykh stantsii. Truboprovodnyi transport. 2013. No 6 (84). P. 18–20. [in Ukrainian]

8. Harihara P. Parasuram, Parlos Alexander G. Fault diagnosis of centrifugal pumps using motor electrical signals. USA, Texas : A&M University, 2012. 32 p.

9. Kovaliv Ye. O. Optymizatsiia roboty hazoperekachuvalnykh ahrehativ z riznymy typamy pryvodiv. Naftohazova enerhetyka. 2007. No 2 (3). P. 80–86. [in Ukrainian]

10. Zaiachuk Ya. I. Systema adaptivnoho P. 131–136.

11. Horbiichuk M. I., Medvedchuk V. M. Metod parametrychnoi identyfikatsii tekhnichnoho stanu dvostupenevoho vidtsentrovoho nahnitacha pryrodnoho hazu. Naftohazova enerhetyka. 2015. No 1 (23). P. 78–85. [in Ukrainian]

12. Harasymiv V. M., Harasymiv T. H., Moiseienko O. V. Systema otsiniuvannia tekhnichnoho stanu protochnoi chastyny dvostupenevoho nahnitacha pryrodnoho hazu na osnovi nechitkoi lohiky. Metody ta prylady kontroliu yakosti. 2018. No 1 (40). P. 70–78. [in Ukrainian]

13. Zaiachuk Ya.I. Kompiuterna systema optymalnoho keruvannia robotoiu vidtsentrovnykh nahnitachiv pryrodnoho hazu. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2010. No 1. P. 258–263. [in Ukrainian]

14. Harasymiv V. M. Identyfikatsiia ta kontrol parametriv dvostupenevoho nahnitacha pryrodnoho hazu iz vykorystanniam metodiv shtuchnoho intelektu : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.13.07. Ivano-Frankivsk, 2018. 211 p. [in Ukrainian]

УДК 681.518:622.248

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-119-137

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ КЕРУВАННІ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН В УСКЛАДНЕНИХ УМОВАХ

В. М. Шавранський, В. І. Шекета, М. В. Шавранський

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

Розглянуто задачу розробки методу ідентифікації ускладнень, що виникають в процесі буріння свердловин на нафту і газ, який функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом різного роду збурень на основі методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки.

Запропоновано методичний підхід до оцінки рівня ускладнень в процесі буріння свердловин на нафту і газ, що ґрунтується на принципах лінгвістичності параметрів процесу буріння, лінгвістичності та ієрархічності знань про ускладнення в процесі буріння свердловин.

Розроблено математичні моделі контрольованого об'єкту, які, на відміну від детермінованих математичних моделей, дозволяють описувати на природній мові причинно-наслідкові зв'язки між параметрами процесу буріння і можливим ускладненням. Ці моделі відображають логіку міркувань оператора з залученням нечислової і нечіткої інформації спеціаліста-експерта, що дозволяє формалізувати процедури прийняття рішень на базі Fuzzy Logic з використанням параметрів і показників процесу буріння свердловин на нафту і газ.

Запропоновано структуру системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень.

Представлено результати імітаційного моделювання розроблених методів моделювання ускладнень на основі методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки. Показано їх переваги перед відомими за точністю в задачах ідентифікації оцінювання та контролю в умовах невизначеності щодо структури та параметрів об'єкта.

Виявлено реальні ускладнення, усунення яких підвищить рівень безпеки процесу буріння свердловин. Показано, що розроблені методи і моделі можуть знайти застосування для моделювання та ідентифікації широкого класу ускладнень на бурових установках, що функціонують в умовах апріорної та поточної невизначеності щодо їх структури, параметрів та геосередовища.

Ключові слова: нечітка система контролю, ідентифікація нестационарних процесів, Fuzzy-моделювання, динамічний об'єкт керування (буріння), логіко-лінгвістичні правила.

Рассмотрена задача разработки метода идентификации осложненных, возникающих в процессе бурения скважин на нефть и газ, функционирующего в условиях априорной и текущей неопределенности под влиянием разного рода возмущений на основе методов теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Предложен методический подход к оценке уровня осложнений в процессе бурения скважин на нефть и газ, основанной на принципах лингвистичности параметров бурения, лингвистичности и иерархичности знаний об осложнении в процессе бурения скважин.

Разработаны математические модели контролируемого объекта, которые, в отличие от детерминированных математических моделей, позволяют описывать на естественном языке причинно-следственные связи между параметрами процесса бурения и возможные осложнения.

Эти модели отражают логику рассуждений оператора с привлечением нечисловой и нечеткой информации специалиста-эксперта, позволяет формализовать процедуры принятия решений на базе Fuzzy Logic с использованием параметров и показателей процесса бурения скважин на нефть и газ.

Предложена структура системы поддержки принятия решений при управлении процессом бурения скважин в условиях осложнений.

Представлены результаты имитационного моделирования разработанных методов моделирования осложнений на основе методов теории нечетких множеств и нечеткой логики. Показано их преимущества перед известными по точности в задачах идентификации оценки и контролю в условиях неопределенности относительно структуры и параметров объекта.

Обнаруженные реальные осложнения, устранение которых повысит уровень безопасности процесса бурения скважин. Показано, что разработанные методы и модели могут найти применение для моделирования и идентификации широкого класса осложнений на буровых установках, функционирующих в условиях априорной и текущей неопределенности относительно их структуры, параметров и геосредовища.

Ключевые слова: нечеткая система контроля, идентификация нестационарных процессов, Fuzzy-моделирования, динамический объект управления (бурение), логико-лингвистические правила.

The problem of development of the method of identification of complications arising in the process of drilling of oil and gas wells, which operates under the conditions of a priori and current uncertainty under the influence of various perturbations based on methods of fuzzy set theory and fuzzy logic, is considered.

A methodological approach to the estimation of the level of complications in the drilling of oil and gas wells, based on the principles of linguistic parameters of the drilling process, linguistic and hierarchical knowledge about the complications in the drilling of wells is proposed.

Mathematical models of a controlled object have been developed that, unlike deterministic mathematical models, allow to describe in natural language the cause and effect relationships between the parameters of the drilling process and the possible complication. These models reflect the logic of the operator's reasoning with the involvement of non-numerical and fuzzy information from an expert to formalize Fuzzy Logic decision-making procedures using the parameters and indicators of the oil and gas drilling process.

The structure of the decision support system for controlling the drilling of wells in the conditions of complications is proposed.

The results of simulation modeling of the developed methods of modeling of complications based on the methods of fuzzy set theory and fuzzy logic are presented. Their advantages over the well-known in accuracy of the tasks of identification of an estimation and control in the conditions of uncertainty concerning structure and parameters of object are shown.

The real complications have been identified, the elimination of which will increase the level of safety of the drilling process. It is shown that the developed methods and models can find application for modeling and identification of a wide class of complications on drilling rigs operating under the conditions of a priori and current uncertainty regarding their structure, parameters and geographic environment.

Keywords: fuzzy control system, non-stationary process identification, Fuzzy modeling, dynamic control object (drilling), logic-linguistic rules.

Вступ

Прийняття рішень щодо керування процесом буріння свердловин в умовах ускладнень є підзадачею загальної проблеми оптимального керування цим процесом, яка реалізується інтегрованою системою автоматизованого управління.

Буріння свердловин на нафту і газ – це надзвичайно складний технологічний процес, особливістю динаміки якого є нестационарність, нелінійність та невідтворюваність, а також взаємозв'язок більшості процесів з змінами, що виникають у стовбурі свердловини і навколишньому масиві гірських порід. Різноманітність геолого-технологічних умов часто призводить до виникнення непрогнозованих ускладнень і необхідності прийняття кваліфікованого рішення в обмежений проміжок часу. Найважливішим питанням підвищення якості робіт в бурінні свердловин на нафту і газ є зменшення кількості ускладнень і виключення аварій, що пов'язане із

використанням сучасних методів контролю, керування і комп'ютерної техніки.

Проте цілий ряд питань, пов'язаних з контролем ускладнень в процесі буріння свердловин на нафту і газ, залишаються маловивченими і недостатньо розробленими. Це обумовлено тим, що має місце априорна та поточна невизначеність і об'єкт функціонує під впливом зовнішніх завад, що недосяжні для вимірювань. Використання відомих методів, що ґрунтуються на детермінованих моделях, не дозволяє ефективно здійснювати контроль і керування процесом буріння свердловин на нафту і газ з метою запобігання ускладнень. Деякі ознаки ускладнень співпадають з ознаками інших ситуацій – зміни меж пластів гірських порід, зношення озброєння і опор долота, осипання і обвалювання порід у свердловині і т. д. Для керування таким об'єктом методи класичної теорії керування найчастіше виявляються неефективними, оскільки ґрунтуються, в основному, на припущенні про лінійність об'єкта.

У той же час, як показує практика, поточний контроль за розпізнаванням ускладнень і керуванням процесом буріння досить ефективно здійснює досвідчений оператор-бурильник. Для цього використовує свій досвід і професійні навички у вигляді нечітких правил. Тому для прийняття рішення за допомогою технічних засобів контролю та керування доцільно використовувати методи теорії нечітких множин і Fuzzy Logic. У зв'язку з цим є актуальною і доцільною розробка спеціалізованої архітектури інтелектуальної системи, що дозволяє ефективно підтримувати прийняття рішень бурильником при керуванні процесом буріння свердловин на нафту і газ в умовах ускладнень.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одним із способів досягнення більш швидкого і більш інтелектуального будівництва свердловин в роботі [1] виділено підвищення рівня автоматизації процесу буріння. Для цього розроблено три нових технології, що спрямовані на поліпшення якості буріння. До них відносяться: програмне забезпечення для автоматизації управління, метод відстеження якості бурильних труб на основі радіочастотної ідентифікації, давачі для вимірювання параметрів бурового розчину. Під час вимірювань на платформі Statford C в Норвезькій зоні Північного моря зазначені технології були не тільки випробувані одночасно, але й стали основою для організації обміну даними в реальному часі і формувалися в єдину інтегровану систему автоматизації процесу буріння. Показано, що на даний час зазначені технології спрямовані на скорочення непродуктивного часу під час проведення бурових робіт. Для цього вводяться оперативні гарантії безпосередньо на буровому обладнанні, автоматизація допоміжних операцій та формування очікуваних значень параметрів для підтримки рішень з виявлення нештатних ситуацій – ускладнень.

Як основні нештатні ситуації розглядаються лише такі, як вихід за межі допустимої області осьової швидкості бурильної колони та швидкості потоку промивальної рідини. Залишились невирішеними питання, що зв'язані з розробкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні

бурінням свердловини в умовах ускладнень. Такими ускладненнями є зони з аномально високими пластовими тисками, звуження стовбура свердловини, газопрояви при високих пластових тисках, обвалювання стінок свердловини, втрати промивальної рідини в свердловині та ін.

Причиною цього є об'єктивні труднощі, що обумовлені надзвичайною складністю об'єкта керування. Дійсно, цей процес є нестационарним, випадковим і таким, що розвивається в часі за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта керування під впливом завад, недосяжних для вимірювань. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути перехід до автономних комп'ютерно-інтегрованих технологій бурових робіт. Саме такий підхід використано в роботі [2], яка ґрунтується на роботах [3, 4]. В роботі [5] запропоновано використання моделей, побудованих на засадах штучних нейронних мереж, як одного із методів теорії нейродинаміки. Проте ця теорія знаходиться на початковому етапі розвитку і наявні результати мають локальний характер. Шлях до автоматизації процесу буріння запропоновано описувати в термінах трьох рівнів: перший – система пропонує вказівки для бурильників, другий – приймає рішення із схвалення бурильника, третій – кроки до автономної системи. Тут бурильник, який може бути поза межами бурового майданчика, втручається тільки при необхідності. Проте автоматизація процесу буріння вимагає наявності системи, яка має здатність справлятися з мінливістю і невизначеністю геосередовища безпосередньо на свердловині на основі моделей [6, 7] різносторонньої інформації від наземних та глибинних давачів в режимі on-line [8]. Ці системи повинні реагувати на такі зміни, як літологія при збереженні оптимальної продуктивності, тим самим збільшувати працездатність і ефективність [9]. Основою є використання не тільки вимірювальної інформації, але й знань місцевої геології, досвіду персоналу бурової установки та умов буріння [10]. Автоматизована система оновлює модель з використанням даних в режимі реального часу. Моделювати рішення досвідченого бурильника адаптуються до

результатів недосконалих прогнозувань на засадах синергетики [11], або штучних нейронних мереж [12].

Водночас, у працях зазначених авторів не приділяється увага питанням створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень. Проте саме для адаптації до умов, що змінюються, ця система має змінювати експлуатаційні параметри, такі як навантаження на гаку, швидкість обертання колони, витрата нагнітання бурових насосів.

Отже, все це дозволяє зробити висновок, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень на засадах методів теорії нечітких множин і Fuzzy-logic [13]. Це дозволить значно розширити перспективи ефективного застосування нечітких систем реального часу для контролю та керування технологічних процесів буріння свердловин на нафту і газ, що функціонують в умовах невизначеності.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є створення спеціалізованої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на засадах методів Fuzzy Logic для підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин на нафту і газ та запобігання ускладнень за рахунок отримання інформації про фактичні параметри при бурінні.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– розробити логіко-лінгвістичні Fuzzy-моделі для виявлення ускладнень, що виникають у процесі буріння свердловин на нафту і газ;

– провести імітаційне моделювання розроблених методів і моделі, а також інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння в умовах ускладнень.

Матеріали і методи досліджень інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень

Методологія підтримки прийняття рішення (ППР) включає використання різних

методів і прийомів, які можна частково або повністю формалізувати. Для досягнення поставленої мети проведені теоретичні дослідження з використанням методів теорії розмірностей при розробці інформаційної моделі ускладнень, що виникають в процесі буріння свердловин на нафту і газ. Використано методи моделювання та ідентифікації систем – для моделювання об'єкта керування на основі вхідних і вихідних даних процесу буріння свердловин в умовах ускладнень. При розробці логіко-лінгвістичних моделей прийняття рішення про можливість виникнення ускладнень застосовано методи теорії нечітких множин і нечіткої логіки методів, а також експертні оцінки при побудові функцій належності нечітких параметрів. Методи математичної статистики використано при дослідженні взаємозв'язків параметрів і показників процесу буріння свердловин на нафту і газ. Дослідження розробленої системи керування на основі експертних даних проводилось за допомогою методів комп'ютерного моделювання. Обробка результатів опитування експертів проводилася з використанням методів теорії подібності і математичної статистики.

Методи пошуку рішень з логіко-лінгвістичними моделями і методами, які базуються на знаннях фахівців-експертів, моделях людських міркувань, неklasичних логіках і накопиченому досвіді.

Результати досліджень інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

Розробка логіко-лінгвістичних Fuzzy-моделей ускладнень, що виникають у процесі буріння свердловин на нафту і газ

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) орієнтовані на завдання, які погано формалізуються і слабоструктуровані в різних, як правило, динамічних ситуаціях [14]. Специфікою таких завдань є:

– неможливість отримання усієї об'єктивної інформації, необхідної для вирішення завдання, і у зв'язку з цим, необхідність вимушено використовувати суб'єктивну, евристичну інформацію;

– присутність недетермінізму в процесі пошуку рішень;

– необхідність корекції і вступу

додаткової інформації в процесі пошуку рішення, активна участь в ньому особи, що приймає рішення (ОПР);

– необхідність отримання рішення в умовах часових обмежень.

Перераховані чинники не дозволяють успішно використовувати для вирішення таких завдань строгі алгоритмічні методи і моделі теорії прийняття рішень [15].

Загальною функцією контролю для запобігання ускладнень при проводці вертикальних ділянок стовбура свердловини є визначення стану об'єкта контролю і виявлення ознак ускладнень, що потребують керуючих впливів [16].

Стан бурового інструменту в кожен момент часу t з певною вірогідністю і точністю, опираючись на постановку задачі контролю і розуміння природи процесу функціонування об'єкту, можна охарактеризувати набором таких величин $Z(t) = \{n(t), h(t), V(t), p(t), P(t), M(t), Q_{\text{вх}}(t), Q_{\text{вих}}(t)\}$, де $n(t)$ – швидкість обертання, $h(t)$ – переміщення бурової колони, $V_M(t)$ – механічна швидкість, $p(t)$ – тиск бурового розчину на викиді насосів, $P(t)$ – осьове зусилля на долото, $M(t)$ – крутний момент або $N(t)$ потужність, що витрачається на обертання бурової колони; $Q_{\text{вх}}(t)$ – витрата бурового розчину на вході в свердловину і на виході $Q_{\text{вих}}(t)$. При переході від одного миттєвого стану до іншого значення $n, V_M, P, M, Q_{\text{вх}}, Q_{\text{вих}}$ змінюються, тобто вони є функціями стану і часу t .

Найважливішими впливами і параметрами контролю та керування процесу буріння свердловин на нафту і газ з метою запобігання ускладнень є:

– вхідні керувальні впливи $X(t) = \{P(t), n(t), Q_{\text{вх}}(t)\}$, які вимірюються в реальному часі;

– збурювальні параметри $A(t) = \{T, H, P_p\}$, які для кожного інтервалу буріння свердловини задаються геолого-технологічний наряд (ГТН);

– параметри, що визначаються режимами буріння $Z(t) = \{x, y_{\text{б.к.}}, y_{\text{б.у.}}\}$ є не керованим збуренням;

– фізико-механічні і абразивні властивості **B** порід, які є прогнозовані за геолого-

технологічним нарядом (ГТН), згідно стратиграфічного розрізу, але є неконтрольованими і не прогнозованими збуреннями.

Тут x – характеристики долота; $y_{\text{б.у.}}$ – параметри бурової установки; $y_{\text{б.к.}}$ – параметри бурової колони; T – температура в свердловині; H – сила статичного опору тертя; P_p – пластовий тиск.

Таким чином, характеристики стану об'єкта $Y_i(t)$ пов'язані з вхідними контрольованими величинами $X(t)$ і збурювальними параметрами в процесі буріння $A(t)$ і параметрами, що визначаються режимами буріння $Z(t)$.

$$Y_i(t) = F_i[X(t), A(t), B, t], i = 1, \dots, n.$$

Загальна інформаційна модель “вхід-вихід” об'єкта контролю параметрів процесу буріння свердловин на нафту і газ зображена на рис. 1.

Для правильного вибору контрольованих величин визначимо клас задачі контролю та керування процесу буріння свердловин для запобігання ускладнень. У зв'язку з тим, що процес буріння свердловин на нафту і газ є нестационарним випадковим процесом, що розвивається в часі, цей варіант контролю відповідає визначенню подій в умовах апріорної невизначеності [17].

Представимо ускладнення процесу буріння свердловин однорівневою еталонною моделлю OSI, з множиною вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_n і однією вихідною змінною y :

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Як вхідні змінні x_i виберемо ознаки ускладнень процесу буріння свердловин, що відповідають рівню моделі OSI. Вихідна змінна y представляє собою показник міри можливості певного ускладнення в процесі буріння свердловин.

Введемо наступні основні формалізми, необхідні для побудови нечітких лінгвістичних баз знань [16].

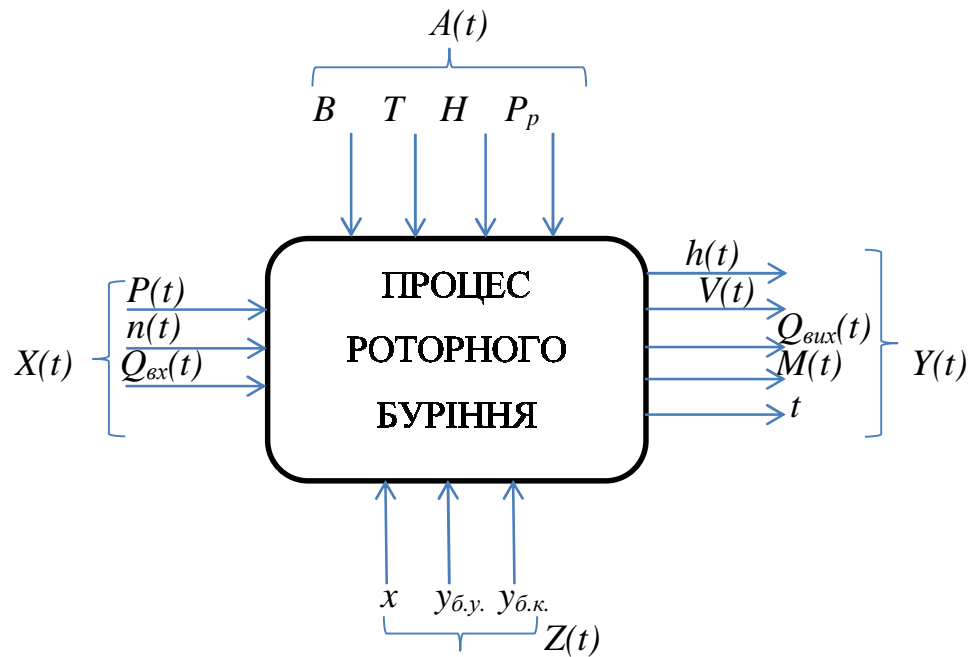


Рисунок 1 – Загальна інформаційна модель об’єкта контролю для запобігання ускладнень в процесі буріння свердловин на нафту і газ

Прийmemo, що змінні x_i і y можуть приймати такі значення.

Область застосування значень змінних будуть:

$$U_i = [\underline{x}_i, \overline{x}_i] \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$Y = [\underline{y}, \overline{y}] \quad (3)$$

де \underline{x}_i і \overline{x}_i – нижнє і верхнє значення вхідних змінних процесу буріння свердловин на нафту і газ x_i , $i = \overline{1, n}$; \underline{y} і \overline{y} – нижнє і верхнє значення вхідної змінної y .

Найбільш зручною для експерта формою представлення знань імплікативного вигляду є звичайна для людини – лінгвістична форма. При цьому експерт оперує нечіткими, розмитими категоріями [17].

Прийmemo, що вектор $X^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ – фіксовані значення вхідних змінних процесу буріння свердловин, тобто, показів давачів, де $x_i^* \in U_i$, $i = \overline{1, 2, \dots, n}$.

Завдання прийняття рішення полягає в тому, щоб на основі вектора X^* визначити вихід

$y^* \in Y$.

Необхідною умовою формального рішення такої задачі є наявність залежності (1). Для встановлення такої залежності будемо розглядати вхідні змінні процесу буріння свердловин на нафту і газ x_i , $i = \overline{1, 2, \dots, n}$ і вихідну змінну y як лінгвістичні змінні [17], задані на універсальних множинах (2), (3).

Для оцінки лінгвістичних змінних x_i , $i = \overline{1, 2, \dots, n}$ і y будемо використовувати якісні терми з наступних терм-множин:

A_i – терм-множина вхідної змінної процесу буріння свердловин x_i , $i = \overline{1, 2, \dots, n}$;

D_i – терм-множина вихідної змінної y , тобто міра певного ускладнення;

де a_i^p – p -й лінгвістичний терм змінної x_i ,

$$p = \overline{1, l_i}, \quad i = \overline{1, n};$$

d_j – j -й терм змінної y ; m – число різних рішень в даній предметній області.

Потужності терм-множин A_i , $i = \overline{1, n}$, можуть бути різні

$$l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n.$$

Назва окремих термів $a_i^1, a_i^2, \dots, a_i^{l_i}$ можуть також відрізнятися один від одного для різних лінгвістичних змінних $x_i, i=1, 2, \dots, n$.

Лінгвістичні терми вхідних і вихідних змінних

$$a_i^p \in A_i \text{ і } d_j \in D, p = \overline{1, l_i}$$

$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$; розглядатимемо як нечіткі

множини, задані на універсальній множині U_i і Y , що визначені відношеннями (2)÷(5).

Якщо $x_i, i=1, 2, \dots, n$ і $y \in$ кількісними змінними, то нечіткі множини $a_i^p \in A_i$ і

$d_j \in D$ визначаються як [17, 22]:

$$a_i^p = \int_{\underline{x_i}}^{\overline{x_i}} \frac{\mu^{a_i^p j}(x_i)}{x_i} dx_i, \quad (4)$$

$$a_j = \int_{\underline{d}}^{\overline{d}} \frac{\mu^j(d)}{d} dd, \quad (5)$$

де $\mu^{a_i^p}(x_i)$ – функція належності значення вхідної змінної;

$$x_i \in [x_i, \overline{x_i}] \text{ терму } a_i^p \in A_i, i = \overline{1, n};$$

$\mu^j(d)$ – функція належності значення вихідної змінної;

$y \in [y, \overline{y}]$ терму – рішенню.

Цей етап побудови нечіткої моделі, на якій визначаються лінгвістичні оцінки змінних для формалізації функції належності, дістав назву фазифікації змінних.

Відповідно до (1) виберемо MISO – структуру (Multi Input – Single Output) [13] нечіткої бази знань. Виберемо також N експериментальних даних, що зв'язують входи і виходи об'єкта дослідження, і розподілимо їх таким чином:

$$N = k_1 + k_2 + \dots + k_m,$$

де k_j – число експериментальних даних, отриманих від експертів, які відповідають вихідному рішенню $d_j, j=1, 2, \dots, m, m$ – число вихідних рішень, причому в загальному випадку $k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_m$.

Припустимо, що число відібраних експериментальних даних менше повного перебору поєднань рівнів l_i зміни вхідних змінних, тобто $N < l_1 \cdot l_2 \cdot \dots \cdot l_i \cdot \dots \cdot l_n, i = \overline{1, n}$.

Пронумеруємо N експериментальних даних таким чином:

11, 12, 13, ..., $1K_1$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_1 ;

21, 22, 23, ..., $2K_2$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_2 ;

.....
 $j1, j2, j3, \dots, jk_j$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_j ;

.....
 $m1, m2, m3, \dots, mK_m$ – номери комбінацій вхідних змінних для рішення d_m ;

Матрицею знань, яка пов'язує вхідні змінні $x_i, i = \overline{1, n}$ і вихідну змінну y , назовемо таблицю (табл. 1).

Матриця знань визначає систему логіко-лінгвістичних висловлювань експерта типу «ЯКЩО – ТО, ІНАКШЕ», які зв'язують значення вхідних змінних $a_i^p, i=1, 2, \dots, n$; з одним із можливих типів рішень $d_j, j=1, 2, \dots, m$:

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО}(x_1 = a_1^{11})I(x_2 = a_2^{11})I \dots I(x_n = a_n^{11}) \text{ АБО} \\ &(x_1 = a_1^{12})I(x_2 = a_2^{12})I \dots I(x_n = a_n^{12}) \text{ АБО} \dots \\ &\dots (x_1 = a_1^{1k_1})I(x_2 = a_2^{1k_1})I \dots I(x_n = a_n^{1k_1}), \text{ ТО} \\ &y = d_1, \text{ ІНАКШЕ} \\ &\text{ЯКЩО}(x_1 = a_1^{21})I(x_2 = a_2^{21})I \dots I(x_n = a_n^{21}) \text{ АБО} \\ &(x_1 = a_1^{22})I(x_2 = a_2^{22})I \dots I(x_n = a_n^{22}) \text{ АБО} \dots \\ &\dots (x_1 = a_1^{2k_2})I(x_2 = a_2^{2k_2})I \dots I(x_n = a_n^{2k_2}), \text{ ТО} \\ &y = d_2, \text{ ІНАКШЕ} \\ &\text{ЯКЩО}(x_1 = a_1^{m1})I(x_2 = a_2^{m1})I \dots I(x_n = a_n^{m1}) \text{ АБО} \\ &(x_1 = a_1^{m2})I(x_2 = a_2^{m2})I \dots I(x_n = a_n^{m2}) \text{ АБО} \dots \\ &\dots (x_1 = a_1^{mk_1})I(x_2 = a_2^{mk_1})I \dots I(x_n = a_n^{mk_1}), \text{ ТО} \\ &y = d_m, \end{aligned} \quad (6)$$

де $d_j, j=1, 2, \dots, m$ – лінгвістична оцінка вихідної змінної y , яка визначається з терм – множини D ;

a_1^{jp} – лінгвістична оцінка вхідної змінної

x_i в p -му рядку j -й диз'юнкції, яка вибирається з відповідної терм-множини $A_j, i = 1, n, j = 1, m, p = 1, k_j$;

k_j – кількість правил, яка визначає значення $y=d_j$.

Таблиця 1 – Структура матриці знань щодо процесу буріння свердловини

Номера вхідних комбінацій значень	Вхідні змінні x						Вихідна змінна y
	x_1	x_2	...	x_i	...	x_n	
11	a_1^{11}	a_2^{11}	...	a_i^{11}	...	a_n^{11}	d_1
12	a_1^{12}	a_2^{12}	...	a_i^{12}	...	a_n^{12}	d_1
...							...
1 K_1	$a_1^{1K_1}$	$a_2^{1K_2}$	...	$a_i^{1K_1}$	...	$a_n^{1K_1}$	d_1
...							...
J_1	a_1^{j1}	a_2^{j1}	...	a_i^{j1}	...	a_n^{j1}	d_j
J_2	a_1^{j2}	a_2^{j2}	...	a_i^{j2}	...	a_n^{j2}	d_j
...							...
jK_j	$a_1^{1K_j}$	$a_2^{1K_j}$	...	$a_i^{1K_j}$	...	$a_n^{1K_j}$	d_j
...							...
m_1	a_1^{m1}	a_2^{m1}	...	a_i^{m1}	...	a_n^{m1}	d_m
m_2	a_1^{m2}	a_2^{m2}	...	a_i^{m2}	...	a_n^{m2}	d_m
...							...
mK_m	$a_1^{mK_m}$	$a_2^{mK_m}$	...	$a_j^{mK_m}$	...	$a_n^{mK_m}$	d_m

Таку систему логічних висловлювань експерта про вплив факторів $\{X_j\}$ на значення вихідної змінної y назвемо нечіткою базою знань [18–22].

Використовуючи операції $\cup(A \text{БО}) \cap (I)$ систему логічних висловлювань (6) запишемо в такому вигляді:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcup_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Для врахування різного типу універсальності експерта в адекватності правил використовуємо вагові коефіцієнти. Нечітку базу знань (7) з ваговими коефіцієнтами правил перепишемо таким чином:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcup_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \text{ з вагою } \omega_{jp} \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

де $\omega_{jp} \in [0, 1]$ - ваговий коефіцієнт правила з номером jp .

Таку базу знань (8) називають базою знань Мамдані [15].

Використовуючи матрицю знань (табл. 1) або ізоморфну їй систему логічних висловлювань (6) або (7), побудуємо систему нечітких логічних рівнянь, які дозволяють визначати значення функцій належності різних рішень при фіксованих значеннях вхідних змінних процесу буріння свердловин на нафту і газ.

Компактно систему логічних рівнянь запишемо таким чином:

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (9)$$

Розглянемо математичну модель системи нечіткого логічного висновку і дефазифікацію вихідного показника.

Основою для проведення операції

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{j1}) \text{ I } (x_2 = a_2^{j1}) \text{ I } \dots \text{ I } (x_n = a_n^{j1}), \text{ ТО } d = d_j, \\ \text{де } a_1^{j1} \in U_1, a_2^{j1} \in U_2, \dots, a_n^{j1} \in U_n, d_j \in W, U_i (i = \overline{1, n}) \in W. \end{aligned} \quad (10)$$

нечіткого логічного висновку є база знань, що містить нечіткі висловлювання і функції належності для відповідних лінгвістичних термів.

Ідея алгоритму для вирішення цього завдання полягає у використанні композиційного правила виведення Л. Заде, що встановило зв'язок між однією вхідною змінною процесу буріння свердловин на нафту і газ і однією вихідною [13, 15]. Це правило узагальнюється на систему одного виходу і n входів, що відповідає повній матриці знань (табл. 1).

Схема процесу нечіткого логічного висновку включає три етапи (рис. 2): введення нечіткості (фазифікація) вхідного параметра процесу буріння, нечіткий логічний вивід і приведення до чіткості (дефазифікація).

Розглянемо на матриці знань (табл. 1) рядок з номером j_1 . Цьому рядку відповідає наступне нечітке логічне висловлювання для певного ускладнення процесу буріння на нафту і газ:

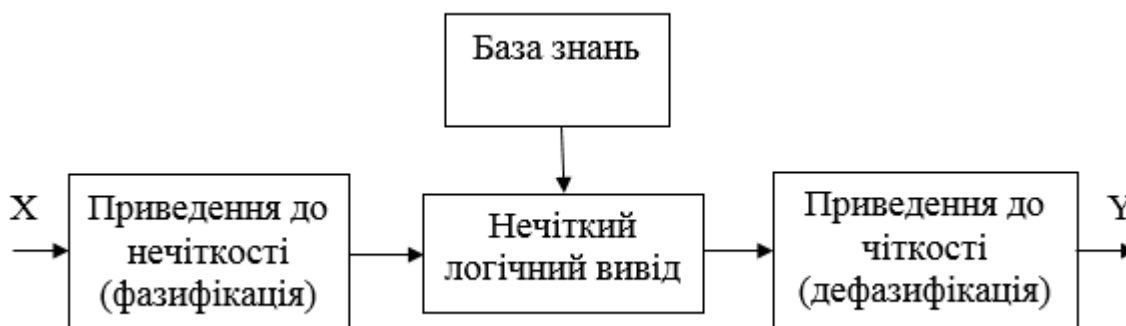


Рисунок 2 – Система нечіткого логічного виводу

Вираз (10) може бути представлений [22] у вигляді системи елементарних висловлювань наступного вигляду для певного (конкретного) ускладнення, що може виникнути в процесі буріння свердловини:

$$\begin{aligned} & \text{ЯКЩО}(x_1 = a_1^{j1}), \text{ТО } d = d_j \\ & I \\ & \text{ЯКЩО}(x_2 = a_2^{j1}), \text{ТО } d = d_j \\ & I \dots\dots\dots \\ & \text{ЯКЩО}(x_n = a_n^{j1}), \text{ТО } d = d_j \end{aligned} \quad (11)$$

Отже, як модель ускладнень процесу буріння свердловин доцільно використовувати розроблену логіко-лінгвістичну Fuzzy-модель, що здатна забезпечити підтримку прийняття рішень в реальному часі.

5. 2. Імітаційне моделювання інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в умовах ускладнень

Проведеними дослідженнями ускладнень процесу буріння вибрано ознаки розпізнавання чотирьох видів ускладнень.

Результати досліджень зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати вибору ознак розпізнавання для основних видів ускладнень

Ускладнення	Давачі контролю параметрів процесу буріння свердловин на нафту і газ
Поглинання бурових і тампонажних розчинів	6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 8 – давач рівня в прийомних ємностях; 10 – давач температури бурового розчину; 7 – давач витрати бурового розчину в нагнітальній лінії;
Газонафтопрояви	1 – давач глибини (давач обертів валу бурової лебідки); 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 9 – давач густини бурового розчину; 10 – давач температури бурового розчину;
Порушення цілісності стінок свердловини	1 – давач глибини (давач обертів валу бурової лебідки); 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 9 – давач густини бурового розчину; 8 – давач рівня в прийомних ємностях;
Прихват бурового інструменту	1 – давач глибини (давач обертів валу бурової лебідки); 12 – давач навантаження на гаку; 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину; 2 – давач крутного моменту на роторі.

Ознаки частково дублюються, що не є доцільно представити вибрані ознаки у вигляді несподіванкою, оскільки одна і та ж ознака може бути інформативною для декількох ускладнень одночасно. З врахуванням цього табл. 3.

Таблиця 3 – Ознаки, які використовуються для виявлення ускладнень

№ п/п	Ознаки (давач)	Поглинання бурових і тампонажних розчинів	Газонафтопрояви	Порушення цілісності стінок свердловини	Прихват бурового інструменту
1	1	–	+	+	+
2	6	+	+	+	+
3	8	+	–	+	–
4	9	–	+	+	–
5	10	+	+	–	–
6	12	–	–	–	+
7	7	+	–	–	–
8	2	–	–	–	+

Практикою буріння встановлено такі ознаки флюїдопроявів [23]:

- збільшення об'єму (рівня) бурового розчину в ємкостях циркуляційної системи;
- підвищення витрати (швидкості) бурового розчину, що виходить із свердловини при незмінній подачі бурових насосів;
- зменшення проти розрахункового об'єму бурового розчину, що доливається в свердловину при спуску бурильної колони;
- підвищення газомісту в буровому розчині;
- зростання механічної швидкості буріння;
- зміна показників властивостей бурового розчину;
- зміна тиску на бурових насосах.

Останні три ознаки можуть виникати не тільки в результаті проявів, але і за іншими побічними причинами.

Прихвати колон труб класифікуються [23] як ускладнення.

Ознаки, за якими можна визначати або уточнювати виникнення «прихватів бурового снаряда дробом» [16]:

- вільна циркуляція промивальної рідини;
- «мертве» становище аварійного снаряда, тобто якщо буровий інструмент до ускладнення знаходився на деякій відстані від вибою, то після прихвата він не рухається ні вгору, ні вниз і не обертається.

Ознаки, за якими можна визначати виникнення цих ускладнень (за винятком обвалу стінок свердловини при раптовій і повній втраті циркуляції):

– можливість руху бурового снаряда вниз, якщо перед початком ускладнення він був піднятий над вибоєм;

– наявність циркуляції промивальної рідини, яка при тривалій ліквідації ускладнення припиняється;

– якщо ліквідація ускладнення проводиться за допомогою особливого промивального снаряда, що опускається в свердловину, то він зупиняється вище перехідника.

З табл. 3 бачимо, що найбільш інформативними ознаками, які доцільно використовувати при розпізнанні більшості ускладнень, є:

– 6 – давач тиску нагнітання бурового розчину;

– 1 – давач глибини (датчик обертів валу бурової лебідки);

– 8 – давач рівня в прийомних ємкостях.

Також існують ознаки, специфічні для конкретних ситуацій:

– 2 – давач крутного моменту на роторі (тільки для ускладнення «Прихват бурового інструменту»);

– 7 – давач витрати бурового розчину в нагнітальній лінії (тільки для ускладнення «Поглинання бурових і тампонажних розчинів»);

– 9 – давач густини бурового розчину (тільки для ускладнення «Газонафтопрояви»);

– 10 – давач температури бурового розчину (тільки для ускладнення «Газонафтопрояви»);

– 12 – давач навантаження на гаку (тільки для ускладнення «Прихват бурового

інструменту».

Для оцінювання і визначення функцій належності для бази правил потрібно визначити ступінь нечіткості вхідних величин, які подають інформацію з давачів для виявлення ускладнень. В табл. 3 наведено ознаки цих ускладнень, які давачі, тобто які параметри є найбільш інформативними для розробленої ІСППР.

Розроблено анкети для опитування експертів. Всього в опитуванні брало участь 7 експертів – це інженери-бурильники Прикарпатського управління бурових робіт УБР, які завдяки своєму досвіду можуть виступати компетентними експертами.

Результати обробки анкетних даних (табл. 4), з врахуванням теоретичних викладок, записані і вигляді такої системи нечітких логічних правил про вплив джерел ускладнень фізичного рівня на стан процесу буріння у цілому:

П1. Якщо x_1 «низький» і x_7 «низький» і x_4

«середній» то у «високий»;

П2. Якщо x_1 «низький» і x_7 «низький» і x_4 «низький» то у «високий»;

П3. Якщо x_1 «низький» і x_7 «середній» і x_4 «середній» то у «вище середнього»;

П4. Якщо x_1 «низький» і x_7 «середній» і x_4 «низький» то у «вище середнього»;

П5. Якщо x_1 «низький» і x_7 «високий» і x_4 «середній» то у «середній» ;

П6. Якщо x_1 «низький» і x_7 «високий» і x_4 «низький» то у «вище середнього»;

.....

П107. Якщо x_5 «низький» і x_6 «низьке» і x_2 «нижче середнього» і x_1 «низький» то у «нижче середнього».

Вагові коефіцієнти правил П1-П107 рівні 1, оскільки при грубому налаштуванні бази знань таке значення задовольняє вимогам особи, яка приймає рішення.

Таблиця 4 – Вхідні і вихідна лінгвістичні змінні і їх терми для процесу буріння свердловини при ускладненнях

Позначення лінгвістичних змінних	Найменування джерела аномалій	Значення лінгвістичних термів для вхідних і вихідних змінних
x_1	Давач тиску нагнітання бурового розчину	Низька, середня, висока
x_2	Давач глибини (давач швидкості обертання валу бурової лебідки)	Низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий
x_3	Давач температури бурового розчину	Низька, нормальна, висока
x_4	Давач рівня в прийомних ємностях	Низький, середній, високий
x_5	Давач крутного моменту ротора	Низький, середній, високий
x_6	Давач навантаження на гаку	Низьке, середнє, високе
x_7	Давач витрати в нагнітальній лінії	Низький, середній, високий
x_8	Давач густини бурового розчину	Низька, середня, висока
У	Можливість ускладнення в процесі буріння	Низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока

Для програмного забезпечення ІСППР, можна використовувати будь-який персональний комп'ютер (ПК) (рис. 3) з вільною

віртуальною пам'яттю не менше 256 Мбайт.

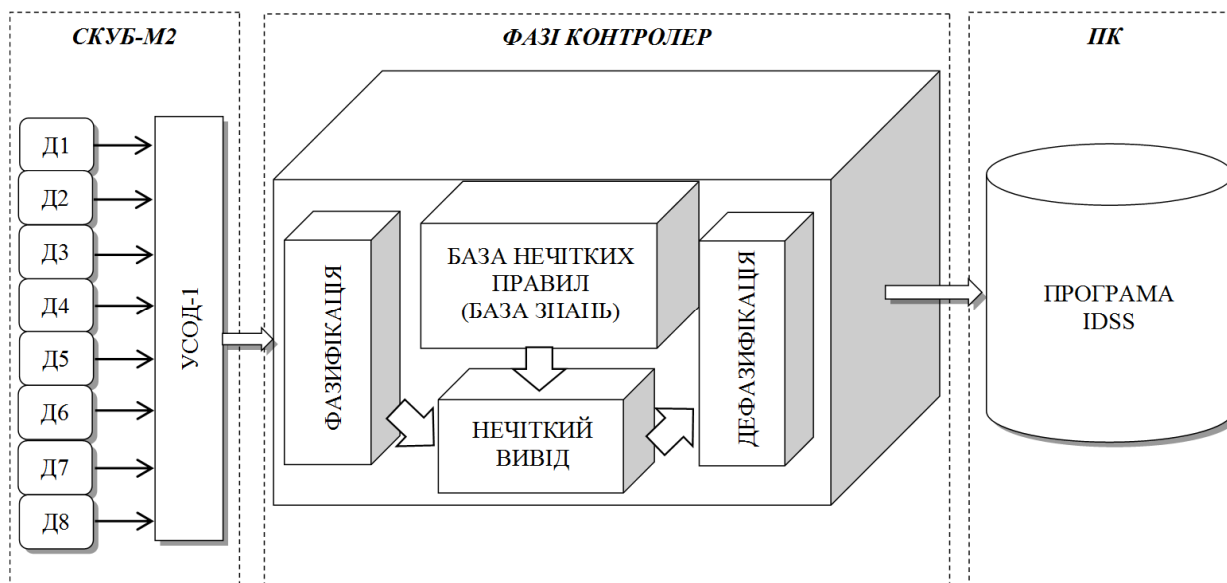


Рисунок 3 – Загальна схема роботи ІСППР: СКУБ-М2 – система контролю та керування процесу буріння свердловин, модернізована; УСОД-1 – пристрій для збору та обробки даних

Здійснено імітаційне моделювання роботи ІСППР, зокрема розглянуто методику проведення експерименту з перевірки працездатності розробленої ІСППР в програмному продукті MatLab Simulink. Випробування проводилися методом тестування. Схема моделі ІСППР в MatLab Simulink представлена на рис. 4.

Моделювання проводилось впродовж 5 днів (120 год). Результати моделювання показані на рис. 4, 5 і ці результати використаємо для налаштування нечіткої бази знань та вагових коефіцієнтів правил. Розглянемо випадок роботи моделі і бази правил в *Fuzzy Logic Controller* при якому $x_1=1$, $x_2=17$, $x_3=41$, $x_4=65$, $x_5=17$, $x_6=1750$, $x_7=0,03$, $x_8=850$, $y=46,3$ (рис. 6). Опишемо за допомогою нечіткої логіки результат роботи нечіткого контролера в MatLab Simulink. Для цього скористаємось формулами з п. 5. 1.

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } \mu_1(y) &= \min\{\max\{1;1;0\}\} = \min\{0\} \\ \text{АБО } \mu_2(y) &= \min\{\max\{1;1;0\}\} = \min\{0\} \\ \text{АБО } \mu_3(y) &= \min\{\max\{1;1;1\}\} = \min\{1\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dots\dots\dots \\ \text{АБО } \mu_{106}(y) &= \min\{\max\{0;0;0,5;0\}\} = \min\{0\} \\ \text{АБО } \mu_{107}(y) &= \min\{\max\{0;0;0,5;0\}\} = \min\{0\}. \end{aligned}$$

Отже отримаємо такі результати

$$\begin{aligned} \mu_3(y), \mu_{67}(y), \mu_{103}(y) \\ \mu_3(y) &= \min\{\max\{1;1;1\}\} = \min\{1\} \\ \mu_{67}(y) &= \min\{\max\{1;0,63;1\}\} = \min\{0,63\} \\ \mu_{103}(y) &= \min\{\max\{1;0,63;0,5;1\}\} = \min\{0,5\} \end{aligned}$$

Проводимо дефазифікацію.

$$y = \frac{\int_0^{20} 0,5 dx + \int_{40}^{60} 0,63 dx + \int_{60}^{80} 1 dx}{1 + 0,63 + 0,5} = 46,152$$

В програмному продукті Matlab результат склав $y=46,3$.

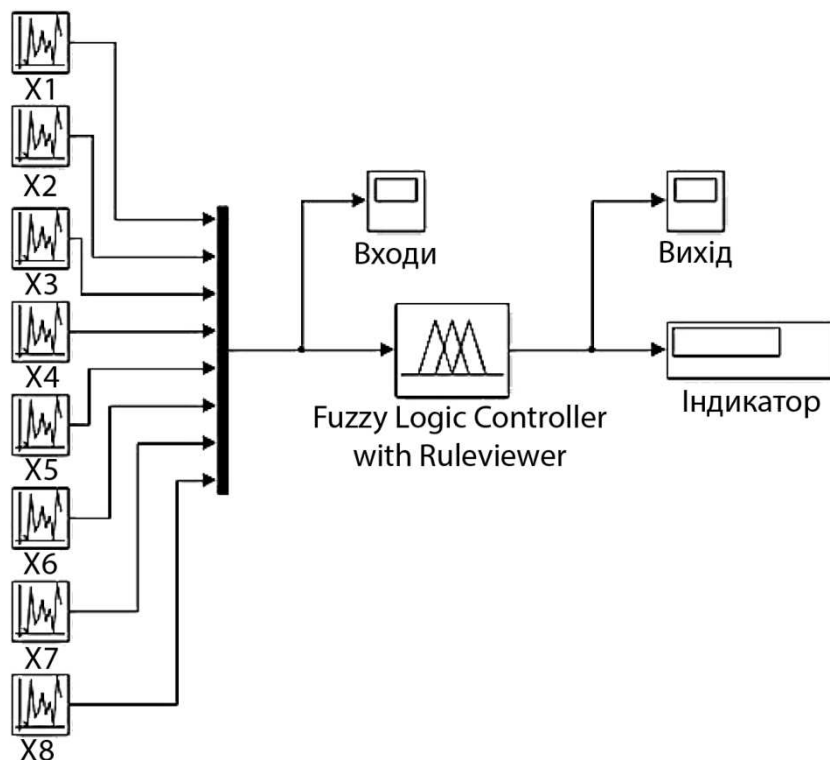


Рисунок 4 – Схема моделі ІСПП в MatLab Simulink

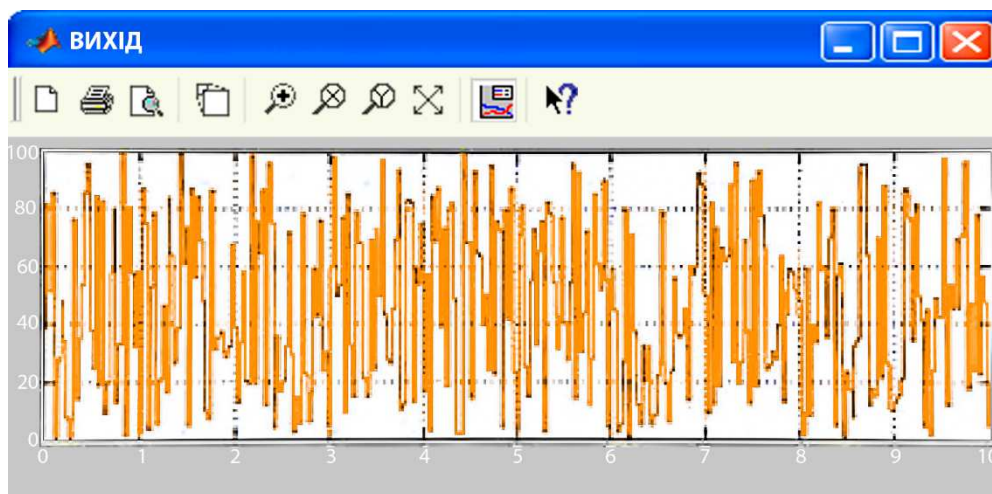


Рисунок 5 – Вікно результату дефазифікації в Simulink

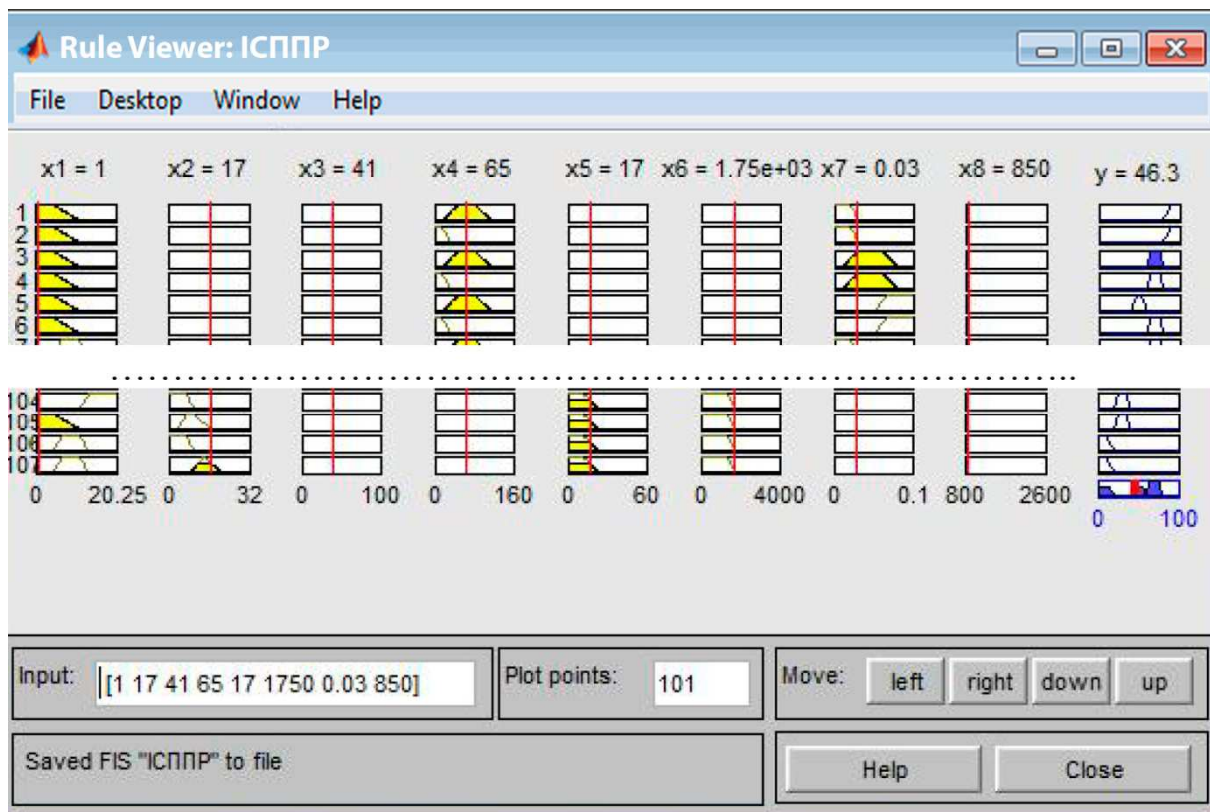


Рисунок 6 – Вікно роботи правил в Simulink

Проведено імітаційне моделювання розробленої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень при керуванні процесом буріння свердловин в умовах ускладнень. Проаналізувавши результати досліджень бачимо, що програма працює вірно.

Обговорення результатів розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень

Отримані матриця знань щодо процесу буріння свердловин, ознаки, що використовуються для виявлення ускладнень, вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, а також схема моделі ІСППР в Matlab є розвитком детермінованих і стохастичних моделей різноманітних ускладнень процесу буріння свердловин на нафту і газ. Ці моделі забезпечують виявлення в реальному часі виникаючих змін сигналів довільної природи в умовах структурної та параметричної невизначеності.

Вироблено Fuzzy-підхід щодо формування та вибору первинної інформації, який базується

на застосуванні трикутних функцій належності. Уніфікація їх досягнута за рахунок того, що різні за фізичним змістом кількісні та якісні показники процесу буріння відображаються на єдину універсальну множину. Потужність цієї множини рівна числу термів і на якій задані нечіткі підмножини кожного із термів. Розроблено загальну структуру ІСППР для контролю та керування процесу буріння свердловин на нафту і газ в умовах ускладнень. Для цього виділені множини керованих, некерованих, збурюючих та вихідних технологічних параметрів. Система забезпечує підвищену точність фазифікації вхідних сигналів з функціями належності трикутної форми. Це досягається шляхом апріорного формування аналітичних залежностей для визначення точок перетину функцій належності вхідних нечітких сигналів та лінгвістичних термів.

Розроблена ІСППР може застосовуватися також при бурінні на тверді корисні копалини і воду, а також на морських бурових платформах, що значно розширює можливості практичного застосування результатів роботи.

Обмеженнями є можливість застосування результатів дослідження лише для роторного способу буріння глибоких свердловин. Для буріння гвинтовими вибійними двигунами і електробурами надглибоких свердловин розроблені Fuzzy-моделі повинні отримати подальший розвиток, як базові у формі предметно-незалежної інтелектуальної оболонки.

Недоліком даного дослідження є те, що розроблена ІСППР є комплексом апаратно-програмних засобів для автоматизованого збору, обробки та інтерпретації геологічної і технологічної інформації щодо виявлення ускладнень лише в процесі роторного буріння. Для буріння свердловин занурними двигунами (гідравлічними та електричними) ІСППР має бути доповнена інформацією щодо їх функціонування на вибої свердловини. Окрім цього вона є складовою локальних інформаційно-вимірювальних систем контролю та управління процесом будівництва нафтових і газових свердловин на нижньому рівні управління. Для використання отриманої інформації на верхньому рівні управління нафтової компанії в ІСППР має бути передбачена передача інформації з бурового майданчика на сервер нафтогазової компанії. Ця інформація як прецедент залишається доступною для ретроспективного перегляду та аналізу ускладнень на інших бурових установках компанії.

В перспективі цей недолік може бути усунутий, а ІСППР отримує подальший розвиток шляхом використання прецедентного підходу і хмарних технологій.

Прецедентний підхід ґрунтується на використанні у системі бази прецедентів і є методом вирішення нових проблем на основі вже відомих рішень. Такий підхід сприяє аналізуванню та врахуванню усіх особливих і нештатних ситуацій (ускладнень), які у конкретний момент негативно впливають на процес поглиблення свердловини.

У хмарних технологіях використовують сервер нафтової компанії з базою прецедентів, в якій зберігаються конкретні дані про проблемні ситуації, що виникли в процесі поглиблення раніше пробурених свердловин. База правил формується із прикладних програм, що реалізують необхідні обчислення, включаючи і

задачі статичної оптимізації процесу буріння свердловин.

Висновки

Розроблено Fuzzy-модель ускладнень процесу буріння свердловин на нафту і газ, яка використана в інтелектуальній системі прийняття рішень для виявлення ускладнень в реальному часі. Fuzzy-модель дозволяє визначити склад і характеристики вхідних і вихідних змінних інтелектуальної системи, нечітку базу правил, модель функції належності лінгвістичних змінних, модель системи нечіткого логічного висновку і дефазифікацію вихідного показника.

Проведено імітаційне моделювання ІСППР для запобігання ускладнень. Система на відміну від відомих, ґрунтується на методах теорії нечітких множин і нечіткої логіки та на неперервній інформації від давачів (осьового зусилля на долото, частоти обертання ротора, проходки, температури бурового розчину). Опитування здавачів здійснюється через (1÷3) с. Це дає можливість ефективно запобігати ускладненню в реальному часі в широкому діапазоні зміни параметрів процесу буріння, забезпечити безаварійну провідку свердловин.

Список використаних джерел

1. Larsen H.F. The Automated Drilling Pilot on Statfjord C / H.F.Larsen, T.E.Alfsen, R.Kvalsund, F.P.Iversen, M.Welmer, S.Ekrene. Paper IADC/SPE 128234, presented at the 2010 IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, 2-4 February, 2010, 11 p.
2. Drilling Automation / W. Aldred, J.Bourque, C.Chapman, G.Downton, I.Falconer, F.Florence, E.G.Zurite, C.Nieto, R.Stauder, M.Zamara. *Oil field Review Summer*. 2012; 24, no 2, Copyright 2012, Schlumberge, P.18-27.
3. Multyparameter Autodrilling Carabilities Provide Drilling / Economic Benefits / F. Florence, M.Porche, R.Thomes, R.Fox. Paper SPE/IADC 119965, presented at the 2010 SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, March 17-19, 2009.
4. Automated Closed-Loop Drilling winh ROP Optimization Algorithm Significantly Reduces Drilling Time and Improvers Downhole Tool Reliability / C.D. Chapman, I.L.Sanchez

Flores, R. De Leon Perez, H.Yu. Paper IADC/SPE 151736, presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California, March 6-8, 2012.

5. E.E. Okpo, A.Dosumnu, B.S.Odagme Artificial Neural Network Model for Predicting Wellbore Instability. MS/SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2-4 August, Lagos, Nigeria, 2016.

6. Cayeux E., Daireaux B. 2009. Early Detection of Drilling Conditions Deterioration Using Real-Time Calibration of Computer Models: Field Example from North Sea Drilling Operations. Paper SPE 119435 presented at the SPE/ IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, March 17-19, 2009.

7. Eric Cayeux, Benoit Daireaux, Erik Dvergsnes, Gunnstein Saelevik. – Early Symptom Detection on the Basis of Real-Time Evaluation of Downhole Conditions: Principles and Result From Several North Sea Drilling Operations. Society of Petroleum Engineers. SPE Drilling & Completion. 2012.

8. Jacobs T. Automated Drilling Technologies Showing Promise. *Drilling Automation*. June, 2015. P.50-55.

9. John P. de Wardt, Calvin E. Innabinnett, Moray L. Laing, John D. Macpherson System Architecture and Operations States for Drilling and Completion: The Foundation to Real Performance Measurement and Drilling System Automation. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 1-3 March, Fort Worth, Texas, USA, 2016.

10. Bang J., Jegbefume O., Ledroz A., Thompson J., 2015. Wellbore Tortuosity Analyzed by a Novel Method May Help to Improve Drilling, Completion, and Production Operations, Paper SPE/IADC-173103, presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, United Kingdom, March 17-19.

11. Оганов Г.С., Ширин-Заде С.А., Парамонов А.А. Динамический анализ процесса углубления скважин. *Вестник ассоциации буровых подрядчиков*. 2009. №1. С.40-44.

12. Шавранський М.В., Кучмистенко О.В. Інтелектуальна система для розпізнавання об'єктів на оптичних зображеннях з використанням каскадних нейронних мереж. *Нафтогазова енергетика*. 2018. № 1(29) С.50-53

13. Jacek Kluska. Exact Fuzzy Modeling of conventional control system . Proceedings of 12-th

East-West Fuzzy Colloquium. Zittau, Germany, 2005. P.113-125.

14. Kondratenko Y., Sydorenko S., Kravchenko D. Fuzzy control systems of non-stationary plants with variable parameters. Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. – Zittau, Germany, 2005. P.140-152.

15. Sokolov A., Wagenknecht M. Choctic Mamdani Recurrent Models. Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau, Germany, 2005. P.272-278.

16. Демчина М.М. Використання нечітких правил для подання знань в інтелектуальних системах нафтогазової предметної області. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2012. №1(31). С.132-141.

17. Стухляк П.Д., Іванченко О.В., Букетов А.В., Долгов М.А. Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник. — Херсон: Айлант, 2011. — 371 с.

18. Bodyanskiy Ye., Teslenko N. General regression neuro-fuzzy network for identification of nonstationary plants. *Information Technologies and Knowledge*. 2008. №2. 136-142.

19. Kuzemin O., Toroev A., Klymov I. Development of fuzzy-logic model for prediction of the avalanche-dangerous situations risk. *International Disaster Risk Conference*. Davos, 2008. С.135.

20. Sokolov A., Bakumenko N. Linguistic approximation of dynamic object. Proceedings of 10-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau, Germany, 2002. P. 225-262.

21. Інтелектуальний пристрій на нечіткій логіці для розпізнавання образів у бурінні / Л.Я.Чигур, Г.Н.Семенов, І.І.Чигур, М.І.Когутяк, Я.Р.Когуч, М.В.Шавранський. *Нафтогазова енергетика*. 2009. №1(10).С. 75-77.

22. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия - Телеком, 2007. 288с.

23. Степанов Н.В. Моделирование и прогноз осложнений при бурении скважин. М.: Недра, 1989. 252 с.

References

1. Larsen H.F. The Automated Drilling Pilot on Statfjord C / H.F.Larsen, T.E.Alfsen, R.Kvalsund, F.P.Iversen, M.Welmer, S.Ekrene. Paper IADC/SPE 128234, presented at the 2010 IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, 2-4 February, 2010, 11 p.
2. Drilling Automation / W. Aldred, J.Bourque, C.Chapman, G.Downton, I.Falconer, F.Florence, E.G.Zurite, C.Nieto, R.Stauder, M.Zamara. Oil field Review Summer. 2012; 24, No 2, Copyright 2012, Schlumberge, P.18-27.
3. Multiparameter Autodrilling Capabilities Provide Drilling / Economic Benefits / F. Florence, M.Porche, R.Thomes, R.Fox. Paper SPE/IADC 119965, presented at the 2010 SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, March 17-19, 2009.
4. Automated Closed-Loop Drilling with ROP Optimization Algorithm Significantly Reduces Drilling Time and Improves Downhole Tool Reliability / C.D. Chapman, I.L.Sanchez Flores, R. De Leon Perez, H.Yu. Paper IADC/SPE 151736, presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California, March 6-8, 2012.
5. E.E. Okpo, A.Dosumnu, B.S.Odagme Artificial Neural Network Model for Predicting Wellbore Instability. MS/SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2-4 August, Lagos, Nigeria, 2016.
6. Cayeux E., Daireaux B. 2009. Early Detection of Drilling Conditions Deterioration Using Real-Time Calibration of Computer Models: Field Example from North Sea Drilling Operations. Paper SPE 119435 presented at the SPE/ IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, March 17-19, 2009.
7. Eric Cayeux, Benoit Daireaux, Erik Dvergsnes, Gunnstein Saelevik. – Early Symptom Detection on the Basis of Real-Time Evaluation of Downhole Conditions: Principles and Result From Several North Sea Drilling Operations. Society of Petroleum Engineers. SPE Drilling & Completion. 2012.
8. Jacobs T. Automated Drilling Technologies Showing Promise. Drilling Automation. June, 2015. P.50-55.
9. John P. de Wardt, Calvin E. Innabinnett, Moray L. Laing, John D. Macpherson System Architecture and Operations States for Drilling and Completion: The Foundation to Real Performance Measurement and Drilling System Automation. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 1-3 March, Fort Worth, Texas, USA, 2016.
10. Bang J., Jegbefume O., Ledroz A., Thompson J., 2015. Wellbore Tortuosity Analyzed by a Novel Method May Help to Improve Drilling, Completion, and Production Operations, Paper SPE/IADC-173103, presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, United Kingdom, March 17-19.
11. Oganov G.S., Shirin-Zade S.A., Paramonov A.A. Dinamicheskii analiz protsessa uglubleniya skvazhin. *Vesnik assotsiatsii burovnykh podryadchikov*. 2009. No1. P.40-44
12. Shavranskyi M.V., Kuchmystenko O.V. Intelktualna systema dlia rozpoznavannia ob'ektiv na optychnykh zobrazhenniakh z vykorystanniam kaskadnykh neironnykh merezh. *Naftohazova enerhetyka*. 2018. No 1(29). P. 50-53[in Ukrainian]
13. Jacek Kluska. Exact Fuzzy Modeling of conventional control system. Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau, Germany, 2005. P.113-125.
14. Kondratenko Y., Sydorenko S., Kravchenko D. Fuzzy control systems of non-stationary plants with variable parameters. Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. – Zittau, Germany, 2005. P.140-152.
15. Sokolov A., Wagenknecht M. Chotic Mamdani Recurrent Models. Proceedings of 12-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau, Germany, 2005. P.272-278.
16. Demchyna M.M. Vykorystannia nechitkykh pravyl dlia podannia znan v intelektualnykh systemakh naftohazovoi predmetnoi oblasti. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2012. No1(31). P.132-141. [in Ukrainian]
17. Stuxlyak P. D., Ivanchenko O. V., Buketov A. V., Dolgov M. A. Teoriya informatsiyi (informatsijno-vy`miryval`ni sy`stemy`, poxy`bky`, identyfikatsiya): navchal`ny`j posibny`k. — Xerson: Ajlant, 2011. — 371 s. [in Russian]
18. Bodyanskiy Ye., Teslenko N. General regression neuro-fuzzy network for identification of nonstationary plants. Information Technologies and Knowledge. 2008. No2. P. 136-142.

19.Kuzemin O., Toroev A., Klymov I. Development of fuzzy-logic model for prediction of the avalanche-dangerous situations risk. International Disaster Risk Conference. Davos, 2008. P.135.

20.Sokolov A., Bakumenko N. Linguistic approximation of dynamic object. Proceedings of 10-th East-West Fuzzy Colloquium. Zittau, Germany, 2002. P. 225-262.

21.Intelektualnyi prystrii na nechitkii lohitsi dlia rozpiznavannia obraziv u burinni / L.Ia.Chyhur,

H.N.Sementsov, I.I.Chyhur, M.I.Kohutiak, Ya.R.Kohuch, M.V.Shavranskyi. Naftohazova enerhetyka. 2009. No 1(10). P. 75-77. [in Ukrainian]

22.Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB. M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2007. 288p. [in Russian]

23. Stepanov N.V. Modelirovanie i prognoz oslozhneniy pri bureanii skvazhin. M.: Nedra, 1989. 252 p. [in Russian]

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 514.862

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-138-143

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ЕПІДЕМІОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ COVID-19

А. П. Олійник, Л. І. Фешанич, Є. А. Олійник

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

У роботі розглядаються математичні моделі розвитку та поширення епідемій. Такі моделі базуються на апараті задач Коші для нелінійних звичайних диференціальних рівнянь із широким класом початкових умов. Розроблено та обґрунтовано методику вибору коефіцієнтів системи, описано їх зміст та вплив на параметри системи. Запропоновано та обґрунтовано методику задання початкових умов задачі. Проаналізовано різні варіанти моделей епідемій на етапі опису ситуації з поширенням COVID-19 обґрунтовано доцільність вибору апарату систем нелінійних звичайних диференціальних рівнянь без урахування загалом аргументів через необхідність розробки експрес-методу моделювання процесу поширення епідемій. Напрямок математичного моделювання епідеміологічних ситуацій розвинуто шляхом врахування засобів лікування, впливу на розвиток епідемій економічної ситуації в країні, наявності інших факторів позитивного (рівня комунікації населення, його мобільності, методики лікування, освіченості населення, кліматичних впливів, сезонних особливостей тощо) та негативного впливу (стихійних лих, політичної ситуації в країні). З точки зору математичного моделювання проаналізовано значення коефіцієнтів та їх динаміку, виявлено межі їх зміни для ефективного опису та прогнозування розвитку процесів, що моделюються.

Для чисельної реалізації моделі використано методи Рунге-Кутта, точність яких вибирається з урахуванням особливостей модельованих процесів. У роботі створено програмний комплекс для реалізації моделей мовою C++ та з використанням стандартних програмних пакетів. Розрахунки підтвердили ефективність запропонованої моделі для опису епідемій і пандемій інфекцій та вірусів різної природи, вона точно описує якісну поведінку систем і процесів, що вивчаються. Встановлено, що всі коефіцієнти моделі якісно точно описують їх вплив на поведінку моделі в цілому, відображають об'єктивні тенденції, що спостерігаються при детальному вивченні поширення COVID-19 в Китаї та в Європі. Визначено напрями можливих подальших досліджень.

Ключові слова: епідемії вірусних інфекцій, моделювання, системи коефіцієнтів, диференціальні рівняння, чисельні методи реалізації.

В работе рассматриваются математические модели и развития и распространения эпидемий. Такие модели базируются на аппарате задач Коши для нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений с широким классом начальных условий. Разработаны и обоснованы методика выбора коэффициентов системы, описаны их содержание и влияние на параметры системы. Предложена и обоснована методика задания начальных условий задачи. Проанализированы различные варианты моделей эпидемий, на этапе описания ситуации с распространением COVID-19 обоснована целесообразность выбора аппарата систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений без учета загалом аргументов за необходимость разработки экспрес-метода моделирования процесса распространения эпидемий. Направление математического моделирования эпидемиологических ситуаций развито путем учета средств лечения, влияния на развитие эпидемий экономической ситуации в стране, наличия других факторов положительного (уровень коммуникации населения, его мобильности, методики лечения, образованности населения, климатических воздействий, сезонных особенностей и т.д.) и отрицательного воздействия (стихийных бедствий, политической ситуации в стране). С точки зрения математического моделирования проанализировано

значення коефіцієнтів і їх динаміка, виявлені межі їх змін для ефективного опису і прогнозування розвитку моделюваних процесів.

Для чисельної реалізації моделі використані методи Рунге-Кутта, точність яких вибирається з урахуванням особливостей моделюваних процесів. В роботі створено програмний комплекс для реалізації моделей на мові C++ і з використанням стандартних програмних пакетів. Розрахунки підтвердили ефективність запропонованої моделі для опису епідемій і пандемій інфекцій і вірусів різної природи: вона точно описує поведінку досліджуваних систем і процесів. Встановлено, що всі коефіцієнти моделі якісно точно описують їх вплив на поведінку моделі в цілому, відображають об'єктивні тенденції, спостережувані при детальній вивченні поширення COVID-19 в Китаї і в Європі. Визначено напрями можливих подальших досліджень.

Ключові слова: епідемії вірусних інфекцій, моделювання, системи коефіцієнтів, диференціальне рівняння, чисельні методи реалізації.

The paper deals with mathematical models of epidemic development and spread. Such models are based on the Cauchy apparatus for nonlinear ordinary differential equations with a wide class of initial conditions. The methodology for selecting the system coefficients is developed and substantiated, their content and influence on the system parameters are described. The method of setting the initial conditions of the problem is proposed and substantiated. Different variants of epidemic models have been analyzed, at the stage of describing the situation with COVID-19 spread, the expediency of choosing the apparatus of systems of nonlinear ordinary differential equations without taking into account argumentation due to the need to develop an express method of simulating the epidemic propagation process is substantiated. The direction of mathematical modeling of epidemiological situations was developed by taking into account the treatment means, influencing the development of epidemics of the economic situation in the country, the presence of other factors positive (the level of communication of the population, its mobility, treatment methods, education of the population, climatic influences, seasonal effects, etc.) and negative factors. distress, political situation in the country). From the point of view of mathematical modeling, the values of the coefficients and their dynamics are analyzed, the limits of their change are revealed for the efficient description and forecasting of the development of the simulated processes.

The numerical implementation of the model uses Runge-Kutta methods, the accuracy of which is selected in the light of the peculiarities of the simulated processes. The calculations confirmed the effectiveness of the proposed model for describing epidemics and pandemics of infections and viruses of various nature, it accurately describes the qualitative behavior of the systems and processes under study, found that all the coefficients of the model accurately describe their impact on the behavior of the model as a whole, reflect trends observed in the detailed study of the spread of COVID-19 in China and Europe. Directions for possible further research have been identified.

Keywords: viral infections epidemics, modeling, coefficient systems, differential equations, numerical implementation methods.

Вступ

В останні десятиліття у багатьох країнах світу спостерігаємо численні спалахи як «новітніх» епідемій, викликаних раніше невідомими чи малодослідженими вірусами (пташиний грип, свинячий грип, атипова пневмонія, лихоманка Ебола), так і відновленням епідемій здавалося б вже подоланих захворювань, відомих у попередні десятиліття (туберкульоз, чума та ін.). Крім того, необхідно досліджувати і перебіг традиційних інфекцій, наприклад, щорічних епідемій гострих респіраторних захворювань і грипу.

Проте найсерйознішим випробуванням стала пандемія COVID-19, що охопила практично всю планету і призвела до глибоких катастрофічних наслідків для світової системи

охорони здоров'я, економічних, транспортних, гуманітарних комплексів більшості країн світу.

Епідеміологи в процесі наукової і практичної діяльності у більшості застосовують комплексну методику вивчення об'єкта. Епідеміологічний процес вивчають переважно шляхом спостереження. Сам процес виявлення й епідеміологічного обстеження кожного конкретного випадку інфекційної хвороби потребує застосування методів спостереження в осередках хвороби, зокрема, можливості інфікування деякими хворобами, простеження тривалості імунітету після перенесеної інфекції, а також спеціальних методів.

Для того, щоб уявити загальну картину захворюваності, оцінити розвиток епідемічного процесу в часі, поширеність його на певній території, зібраний матеріал необхідно обробити

математичним способом, отримавши при цьому основні статистичних показників [1,2, 4-5, 8, 12-16]. Попри велику цінність статистичного дослідження, для вирішення багатьох епідеміологічних питань його іноді буває недостатньо.

Основний зміст роботи

Математичне моделювання – засіб, що дозволяє досягти значно більшої точності, ніж описові методи. Математична модель дає частковий опис певних аспектів реальної дійсності, а її істинність цілком залежить від точності цього зображення [5, 8].

Модель епідемії інфекційної хвороби дозволяє оцінити динаміку зміни кількості здорового, інфікованого та такого, що має імунітет до даної інфекції населення, і можна бути записана за допомогою системи звичайних диференціальних рівнянь [1, 15, 16]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -x_1(t)x_2(t-\tau_1) + x_2(t-\tau_2) + f_1(t), \\ \frac{dx_2}{dt} = x_1(t)x_2(t-\tau_1) + x_2(t) - f_1(t), \\ \frac{dx_3}{dt} = x_2(t) - x_2(t-\tau_2) + f_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

з початковими умовами

$$x_1(0) = N_0, \quad x_2(0) = N_1, \quad x_3(0) = x_4(0) = 0. \quad (2)$$

де

$$f_1(t) = \frac{c_1}{(t - t_1/2)^2 + 1},$$

$$f_2(t) = \frac{c_2}{(t - t_2)^2 + 1},$$

x_1 – кількість здорового населення; x_2 – кількість інфікованого населення; x_3 – кількість населення, яке має імунітет до даного типу інфекції; τ_1 – час інкубаційного періоду хвороби; τ_2 – час, протягом котрого набутий організмом імунітет до хвороби втрачається;

Функції $f_1(t), f_2(t)$ обираються неперервними, спадаючими до нуля при $t \rightarrow +\infty$; $c_1(t), c_2(t)$ – коефіцієнти, що моделюють інтенсивність впливів. Легко

перевірити, що функції $f_1(t), f_2(t)$ мають єдиний максимум, який, з точки зору моделювання відповідних процесів, припадає на максимум розвитку епідемії (кількості людей, що захворіли).

Проте вказана модель є досить детальною, вона розглядає динаміку розвитку епідемій в часі, з можливими їх циклічними повторами, тоді як при моделюванні пандемії COVID-19 доцільно скористатись моделями одного циклу, що базуються на відомих результатах [4, 13-16].

Розглядається наступна модель: нехай $y_1(t)$ – кількість здорового населення, $y_2(t)$ – кількість людей, уражених вірусом, $y_3(t)$ – кількість пацієнтів, що виздоровіли та набули імунітету, $y_4(t)$ – людські втрати в процесі пандемії. Тоді для опису динамік пандемії використовується наступна система:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -k_1 y_1(t) y_2(t) \\ \frac{dy_2}{dt} = y_1(t) y_2(t) - k_2 y_2(t) \\ \frac{dy_3}{dt} = k_3 y_2(t) \\ \frac{dy_4}{dt} = \epsilon y_2(t) \end{cases} \quad (3)$$

з початковими умовами

$$y_1(t) = N_0, \quad y_2(t) = n, \quad y_3(t) = 0, \quad y_4(t) = 0. \quad (4)$$

Коефіцієнт k_1 характеризує рівень взаємодії, контактів, зустрічей здорових та інфікованих людей, при цьому моделюється рівень протиепідеміологічних заходів, які впроваджуються урядами постраждалих країн з метою недопущення таких небажаних взаємодій, значення цього коефіцієнту тим менше, чим ефективнішими є проти епідеміологічні заходи, коефіцієнт k_2 встановлює, що рівень поширення вірусу знижується по мірі того, скільки людей заразились, його величина також залежить від того, наскільки ефективними є проти епідеміологічні заходи в плані недопущення контактів зі здоровим людьми та ефективності лікування, коефіцієнт

k_3 характеризує здатність особин, що перехворіли, до вироблення антитіл до вказаного вірусу – при пандемії COVIN-19 повідомлялось про повторні захворювання людей, що вилікувались від коронавірусу, коефіцієнт ε характеризує смертність від інфекції. Важливого значення набуває вивчення величин N_0 та n , які характеризують відповідно кількість населення країни та початкове число інфікованих, що потрапило на її територію в момент першого прояву інфекції в даній країні.

а) метод другого порядку точності:

$$k_1 = f(t_n, y_n), \quad k_2 = f(t_n + 0,5\tau, y_n + 0,5\tau k_1), \quad y_{n+1} = y_n + \tau k_2;$$

б) метод третього порядку точності:

$$k_1 = f(t_n, y_n), \quad k_2 = f(t_n + 0,5\tau, y_n + 0,5\tau k_1), \quad k_3 = f(t_n + \tau, y_n - \tau k_1 + 2\tau k_2),$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{\tau}{6}(k_1 + 4k_2 + k_3);$$

в) метод четвертого порядку точності:

$$k_1 = f(t_n, y_n), \quad k_2 = f(t_n + 0,5\tau, y_n + 0,5\tau k_1),$$

$$k_3 = f(t_n + 0,5\tau, y_n + 0,5\tau k_1), \quad k_4 = f(t_n + \tau, y_n + \tau k_3), \quad (6)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{\tau}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4).$$

Тут: τ – крок по часу, який вибирається з міркувань точності,

t_n, y_n – відповідно значення часу та вектора розв'язання в момент часу n .

Проведено широкий клас розрахунків, а саме:

1. Встановлено, що при $n=0$ розв'язком системи (4) є сталі величини, що відповідає реальному змісту задачі – епідемія не буде поширюватись при відсутності її носіїв в даному регіоні;

2. Проведено дослідження залежності розв'язку від значення коефіцієнта k_1 - на рисунках 1 та 2 наведено результати розв'язку при $k_1 = 0.1, k_1 = 0.5$,

3. Досліджено залежність процесу від початкової кількості носіїв вірусу: $N_0 = 10, n =$

Результати розрахунків та їх аналіз.

Для розв'язання системи звичайних диференціальних рівнянь виду виду::

$$\frac{du}{dt} = f(t, u), \quad u(0) = u_0, \quad (5)$$

до якого може бути зведена система (3), використано методи Рунге-Кутта різного порядку точності в залежності від необхідного рівня точності розв'язку, наприклад [7, 9,10], де:

0.1 – рис.1, $N_0 = 10, n = 1.0$ – рис.3, $N_0 = 10, n = 1,5$ – рис.4. При інших однакових значеннях параметрів задачі рис.1 ($k_1 = 0.1$) демонструє менш інтенсивний темп поширення епідемії, ніж при $k_1 = 0.5$, що ілюструє рис.2 – при $k_1 = 0.1$ меншою є і загальна кількість осіб, що заразились, і темп розвитку епідемії, і кількість хворих;

4. Проведено дослідження залежності $y_2(t), y_3(t), y_4(t)$ від параметра k_2 (рис.5 та 6).

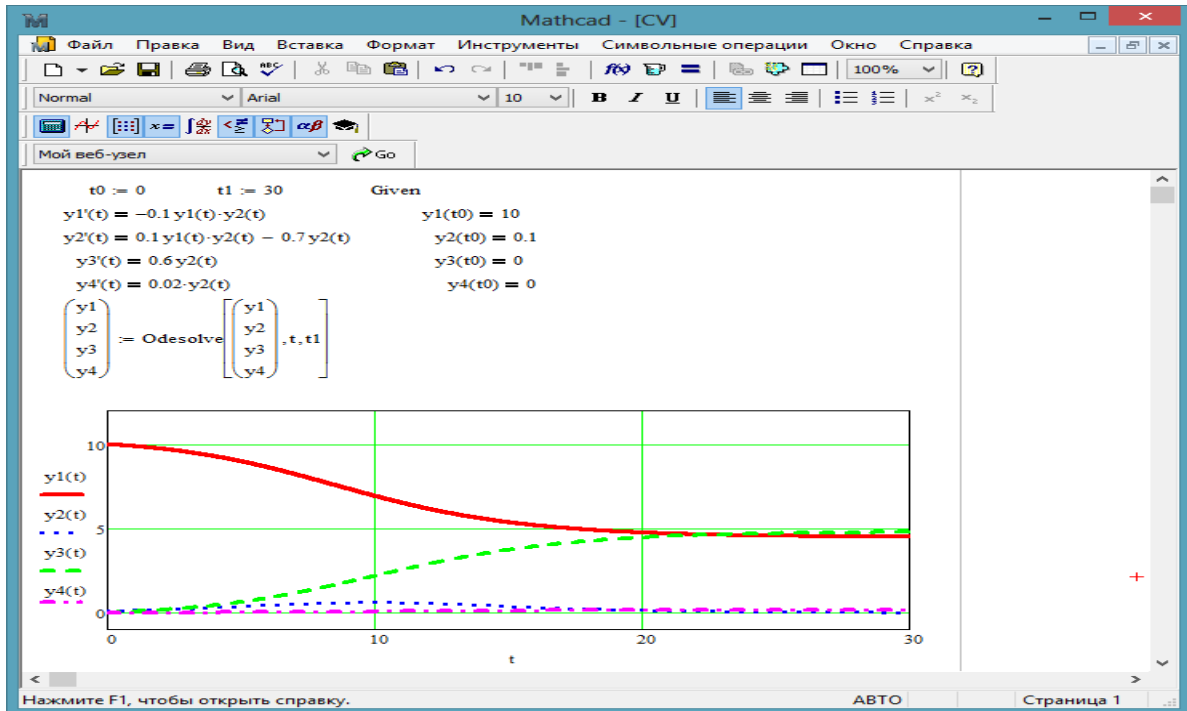


Рисунок 1 – Розподіл величин $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ при $k_1 = 0.1$, $n=0.1$.

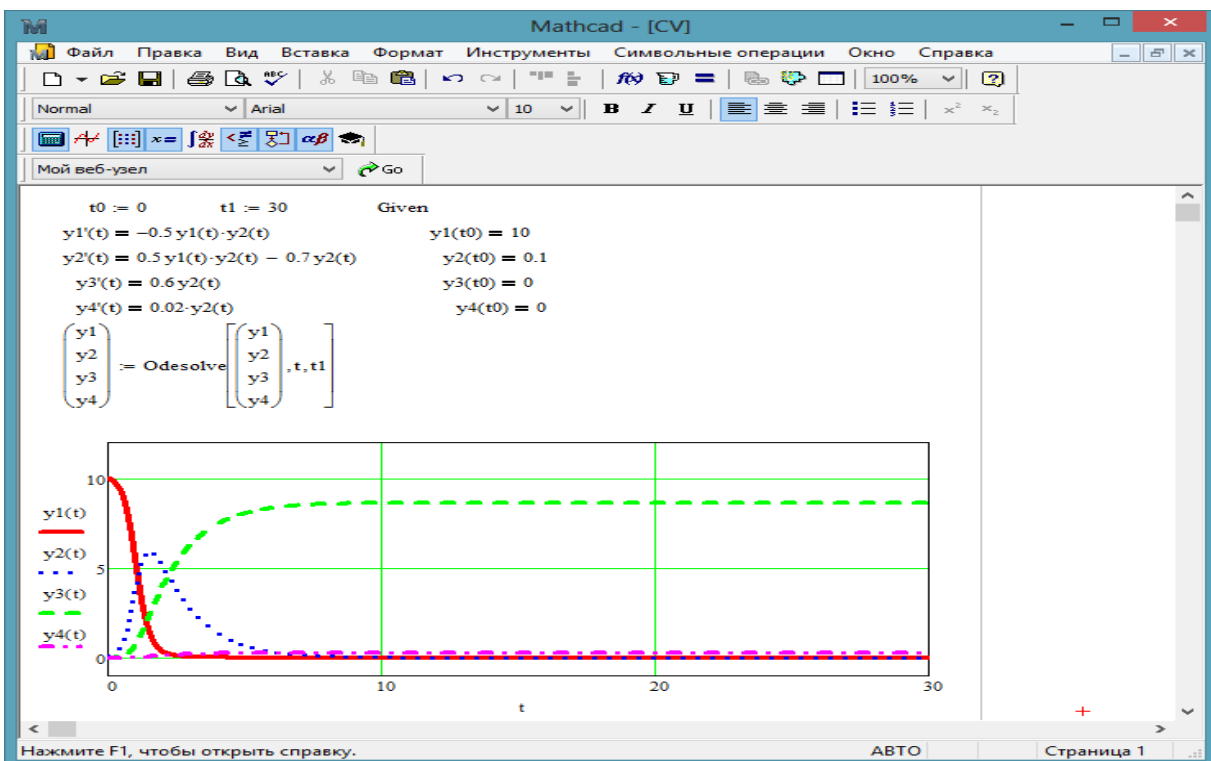


Рисунок 2 – Розподіл величин $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ при $k_1 = 0.5$

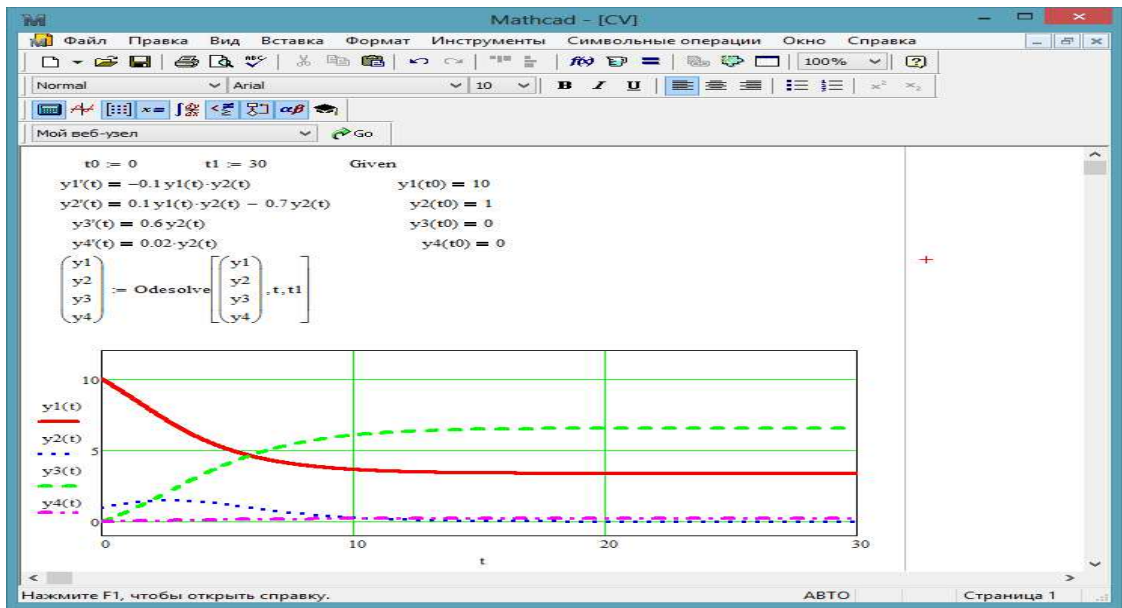


Рисунок 3 – Розподіл величин $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ при $k_1 = 0.1$, $n=1.0$

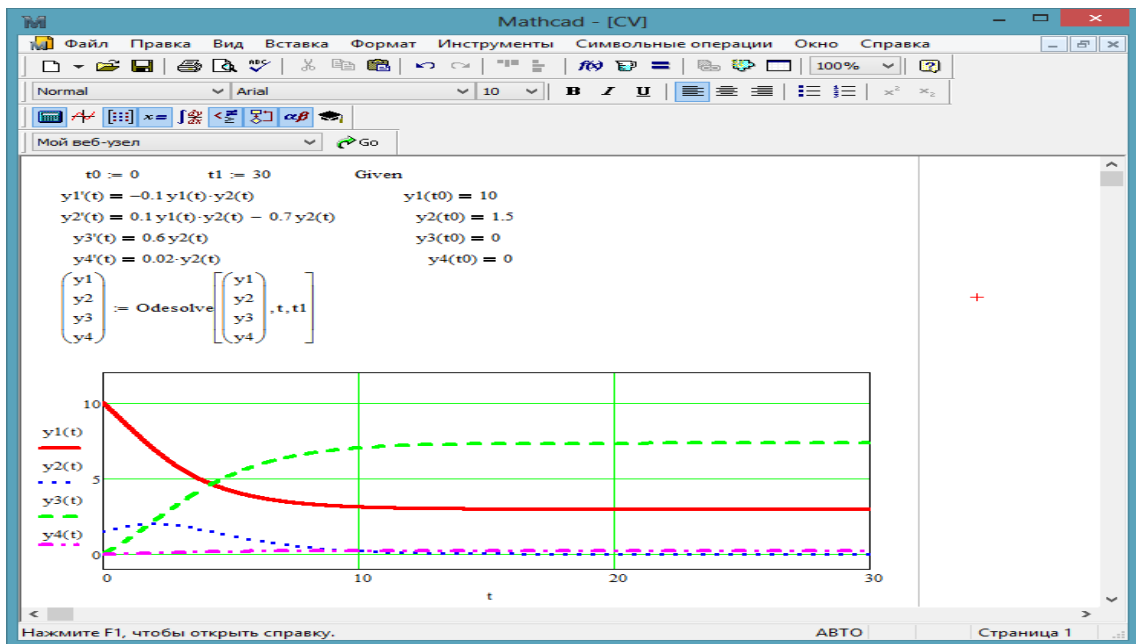


Рисунок 4 – Розподіл величин $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ при $k_1 = 0.1$, $n=1.5$

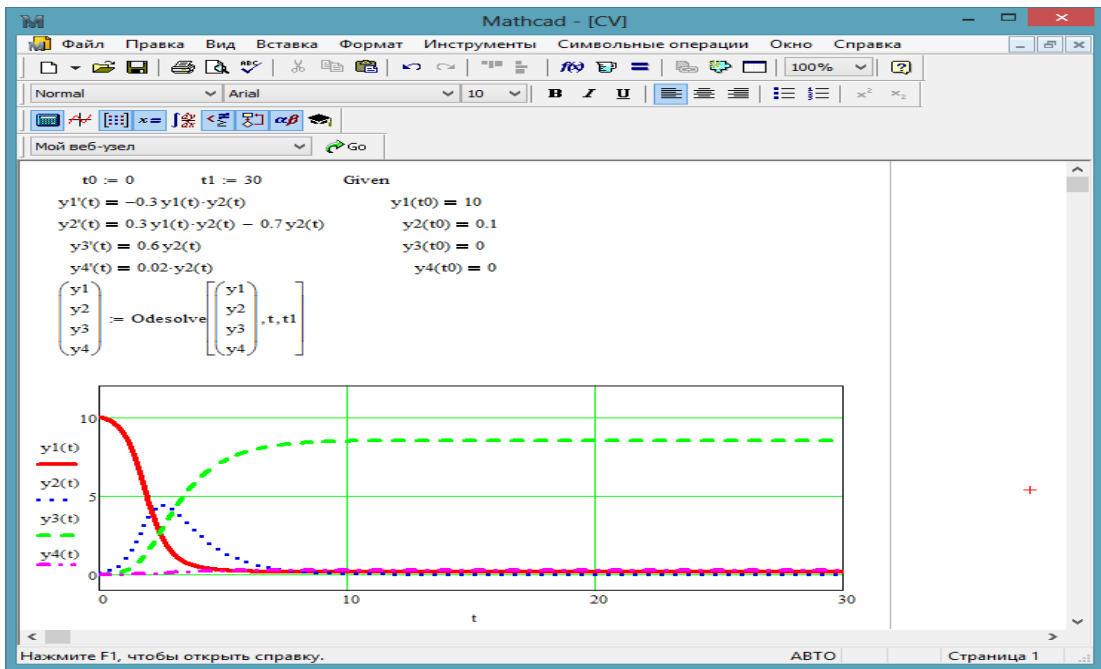


Рисунок 5 – Розподіл величин $y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)$ при $k_2=0.7, n=$

1

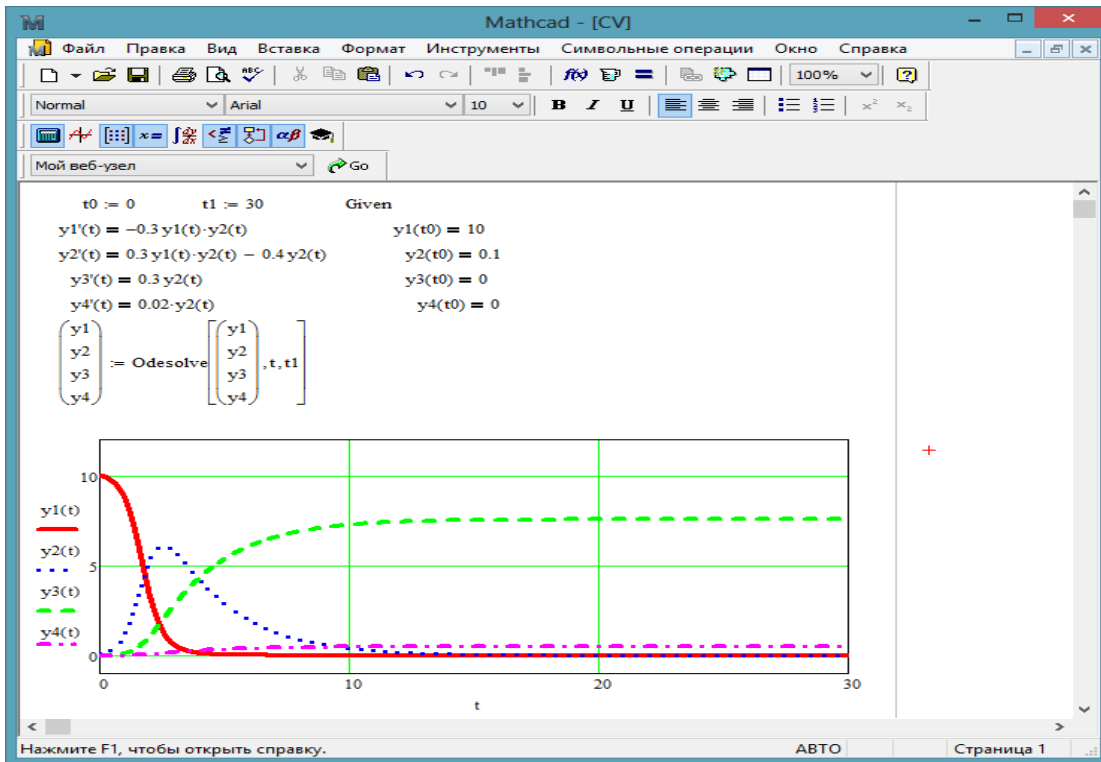


Рисунок 6 – Розподіл величин $y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)$ при $k_2=0.4, n=0/1$

При $k_2=0.7$ рівень захворюваності нижчий, ніж при $k_2=0.4$ – що відповідає допущенню про те, що k_2 характеризує ефективність системи охорони здоров'я в плані боротьби з епідемією.

Висновки.

За результатами проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

- розрахунки підтвердили ефективність запропонованої моделі для опису епідемій та пандемій інфекцій та вірусів різної природи, вона точно описує якісну поведінку систем і процесів, що вивчаються;
- всі коефіцієнти моделі якісно точно описують їх вплив на поведінку моделі в цілому, відображають об'єктивні тенденції, що спостерігаються при детальному вивченні поширення COVID-19 в Китаї та в Європі;
- реально проведено великі серії розрахунків, які підтверджують адекватність моделі та вибору коефіцієнтів, навести всі чисельні результати в одній роботі неможливо через обмеження по розміру публікації;
- всі наведені чисельні результати стосуються умовних одиниць, напрямок подальшого дослідження може бути пов'язаний з переходом до реальних кількісних параметрів систем.

Список використаних джерел

1. Бабский В.Г., Мышкис А. Д. Математические модели в биологии, связанные с учетом последствия / В. Г. Бабский. М. Мир, 1983. 383 с.
2. Беляков В. Д., Кравцов Ю. В., Герасимов Л. Н. Состояние и перспектива математического моделирования в эпидемиологии. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 1990. № 6. С. 109–113.
3. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М. : Наука, 1976. 286 с.
4. Марчук И. Г. Математические модели в иммунологии: вычислительные методы и эксперименты. М. : Наука, 1991. 304 с.
5. Романюха А. А. Математические модели в иммунологии и эпидемиологии

инфекционных заболеваний. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 293 с.

6. Самойленко А. М., Перестюк М. О., Парасюк І. О. Дифференціальні рівняння. К. : Либідь, 2003. 600 с.

7. Фельдман Л. П., Петренко А. І., Дмитрієва О. А. Чисельні методи в інформатиці. К. : Видавнича група ВНУ, 2006. 480 с.

8. Хусаинов Д. Я., Шатирко А. В. Введение в моделирование динамических систем. І. І. Харченко. К. : КНУ ім. Тарас Шевченка, 2010. 130 с.

9. Шахно С. М., Дудикевич А. Т., Левицька С. М. Практикум з чисельних методів. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2013. 432 с.

10. Эдвардс Ч. Г. Пенни Д. Э. Дифференциальные уравнения и краевые задачи: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB. М. : ООО "И. Д. Вильямс", 2008. 1104 с.

11. Bocharov G., Rihan F. A. Numerical modelling in biosciences using delay differential equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2000. Vol. 125. P. 183–199.

12. Brauer F., Castillo-Chavez C. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, 2012. 508 p.

13. Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1990. 512 с.

14. Andriy Oliynyk, Eugene Oliynyk, Olexandr Pyptiuk, Róża Dzierżak, Małgorzata Szatkowska, Svetlana Uvaysova, Ainur Kozbekova. The human body metabolism process mathematical simulation based on Lotka-Volterra model. *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017 104453L (7 August 2017)*; doi: 10.1117/12.2280972. 7 p.

15. Олійник А.П., Олійник Є.А. Математичне моделювання процесів обміну речовин в організмі людини та його програмна реалізація. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. №1(38). С. 112-118.

16. Олійник Е. А., Гой Т. П. Математическое моделирование эпидемиологических процессов с помощью дифференциальных уравнений с

запаздывающим аргументом. Материалы Международного симпозиума «Современные проблемы математики. Методы, модели, приложения», 17–20 нояб. 2015 г. Воронеж : ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2015. С. 34–37.

References

1. Babskiy V.G., Myishkis A. D. *Matematicheskie modeli v biologii, svyazannyye s uchetom posledeystvyya*. M. Mir, 1983. 383 p. [in Russian]
2. Belyakov V. D., Kravtsov Yu. V. , Gerasimov L. N. *Sostoyaniye i perspektiva matematicheskogo modelirovaniya v epidemiologii*. Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii. 1990. No 6. P. 109–113. [in Russian]
3. Volterra V. *Matematicheskaya teoriya borby za suschestvovaniye*. M. : Nauka, 1976. 286 p. [in Russian]
4. Marchuk I. G. *Matematicheskie modeli v immunologii: vyichislitelnyye metody i eksperimenty*. M. : Nauka, 1991. 304 p. [in Russian]
5. Romanyuha A. A. *Matematicheskie modeli v immunologii i epidemiologii infektsionnykh zabolevaniy*. M. : BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. 293 p. [in Russian]
6. Samoilenko A. M., Perestyuk M. O. , Parasyuk I. O. . *Diferentsialni rivnyannya*. K. : LibId, 2003. 600 p. [in Ukrainian]
7. Feldman L. P., Petrenko A. I., DmitriEva O. A. *Chiselni metody v informatitsi*. K. : Vidavnicha grupa BHV, 2006. 480 p. [in Ukrainian]
8. Husainov D. Ya., Shatirko A. V. *Vvedennyya v modelyuvannya dinamichnykh sistem*. I. I. Harchenko. K. : KNU Im. Taras Shevchenka, 2010. 130 p. [in Russian]
9. Shahno S. M., Dudikevich A. T., Levitska S. M. . *Praktikum z chiselnykh metodiv*. Lviv : LNU Imeni Ivana Franka, 2013. 432 p. [in Ukrainian]
10. Edvards Ch. G. Penni D. E. *Differentsialnyye uravneniya i kraevyye zadachi: modelirovaniye i vyichisleniye s pomoshchyu Mathematica, Maple i MATLAB*. M. : OOO "I. D. Vilyams", 2008. 1104 p. [in Russian]
11. Bocharov G., Rihan F. A. *Numerical modelling in biosciences using delay differential equations*. Journal of Computational and Applied Mathematics. 2000. Vol. 125. P. 183–199.
12. Brauer F., Castillo-Chavez C. *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*. Springer, 2012. 508 p.
13. Hayrer E., Nersett S., Vanner G.. *Resheniye obyiknovennykh differentsialnykh uravneniy*. M.: Mir, 1990. 512 p. [in Russian]
14. Andriy Oliynyk, Eugene Oliynyk, Olexandr Pyptiuk, Róza Dzierżak, Małgorzata Szatkowska, Svetlana Uvaysova, Ainur Kozbekova. *The human body metabolism process mathematical simulation based on Lotka-Volterra model*. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017 104453L (7 August 2017); doi: 10.1117/12.2280972. 7 p.
15. Oliynyk A.P., Oliynyk E.A. *Matematichne modelyuvannya protsesiv obminu rechovin v organizmi lyudyni ta yogo programna realizatsiya. Metodi ta priladi kontrolyu yakosti*. 2017. No 1(38). P. 112-118. [in Ukrainian]
16. Oliynyk E. A., Goy T. P. *Matematicheskoye modelirovaniye epidemiologicheskikh protsessov s pomoshchyu differentsialnykh uravneniy s zapazdyvayushchim argumentom*. Materialy Mezhdunar. molodezhnogo simpoziuma «Sovremennyye problemy matematiki. Metody. modeli. prilozheniya». 17–20 noyab. 2015 g. Voronezh : FGBOU VPO «VGLTA». 2015. P. 34–37. [in Russian]

УДК 5691.263

DOI 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-147-154

МОДЕЛЮВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИЩОЇ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗА НАЯВНИХ ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

І. В. Рибіцький, О. М. Карнаш, М. О. Карнаш

*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: rybitsky@gmail.com*

Розглянуто вплив зобов'язань нашої держави про імплементацію Третього енергетичного пакету на ринок газу. Показано, що відсутність в споживачів природного газу інформації про кількість та вартість спожитої енергії створює певні проблеми при формуванні ринку газу. Описано існуючі на даний час методи та технічні засоби, які їх реалізують, для визначення енергетичних характеристик природного газу, а також подано перелік нормативного забезпечення, яке регламентує цю діяльність. Доведено необхідність удосконалення існуючих методів та технічних засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу, з метою забезпечення їх роботоздатності на газових мережах низького тиску.

Вимірювання якості природного газу (його теплотворної здатності) є складним та дорогим процесом. Як правило вона на даний час вимірюється тільки самими газотранспортуючими та газопостачаючими компаніями на точка входу та виходу газотранспортної системи, а також в окремих точках на рівні газорозподільчих станцій. Вимірювання здійснюється за допомогою промислових потокових чи стаціонарних лабораторних хроматографів, вартість яких сягає сотень тисяч євро. Окрім цього обслуговування таких хроматографів є дорівартісним, а їх робота вимагає наявності висококваліфікованих працівників. Простому побутовому споживачеві такі вимірювання є недоступними в основному через вартість заміру однієї проби, яка може сягати десятків тисяч гривень і тому він може вдовільнитись тільки інформацією, яку йому надає газопостачальна організація. В такій схемі взаємовідносин постачальник – споживач криється конфлікт інтересів, оскільки організація, яка продає газ сама і визначає (вимірює) його якість. Аналіз останніх досліджень в галузі контролю якості природного газу, зокрема його теплотворної здатності, показав, що найбільш перспективними з точки зору вартості та можливості застосування на різних ділянках транспортування газу, від видобування до споживання, є кореляційні методи.

Аналіз останніх досліджень в галузі контролю якості природного газу, зокрема його теплотворної здатності, показав, що найбільш перспективними з точки зору вартості та можливості застосування на різних ділянках транспортування газу, від видобування до споживання, є кореляційні методи.

Отримано нову кореляційну залежність між фізико-хімічними властивостями природного газу (швидкістю поширення ультразвукових коливань та вмістом діоксиду вуглецю в пробі природного газу) та вищою теплою згоряння природного газу. Удосконалено метод контролю теплоти згоряння природного газу, підвищено точність вимірювання та розширено функціональні можливості.

Ключові слова: теплота згоряння; природний газ; ультразвук; діоксид вуглецю; якість газу; фізико-хімічні показники.

Рассмотрено влияние обязательств нашего государства о имплементации Третьего энергетического пакета на рынок газа. Показано, что отсутствие у потребителей природного газа информации о количестве и стоимости потребленной энергии создает определенные проблемы при формировании рынка газа. Описаны существующие в настоящее время методы и технические средства, которые их реализуют, для определения энергетических характеристик природного газа, а также перечислено нормативное обеспечения, регламентирующее эту деятельность. Доказана необходимость усовершенствования существующих методов и технических средств измерения теплоты сгорания природного газа, с целью обеспечения их работоспособности на газовых сетях низкого давления.

Измерение качества природного газа (его теплотворной способности) является сложным и дорогим процессом. Как правило она в настоящее время измеряется только самыми газотранспортными и газопоставляющими компаниями на точке входа и выхода газотранспортной системы, а также в отдельных точках на уровне газораспределительных станций. Измерение осуществляется с помощью промышленных

поточних или стационарных лабораторных хроматографов, стоимость которых достигает сотен тысяч евро. Кроме этого обслуживания таких хроматографов является дорогостоящим, а их работа требует наличия высококвалифицированных работников. Простом бытовом потребителю такие измерения недоступны в основном из-за стоимости замера одной пробы, которая может достигать десятков тысяч гривен и поэтому он может вдовольниться только информацией, которые ему предоставляет газопоставляющая организация. В такой схеме взаимоотношений поставщик - потребитель кроется конфликт интересов, поскольку организация, которая продает газ сам и определяет (измеряет) его качество. Анализ последних исследований в области контроля качества природного газа, в частности его теплотворной способности, показал, что наиболее перспективными с точки зрения стоимости и возможности применения на различных участках транспортировки газа, от добычи до потребления, являются корреляционные методы.

Получена новая корреляционная зависимость между физико-химическими свойствами природного газа (скорости распространения ультразвуковых колебаний и содержанием диоксида углерода в пробе природного газа) и выше теплотой сгорания природного газа. Усовершенствован метод контроля теплоты сгорания природного газа, повышена точность измерения и расширены функциональные возможности.

Ключевые слова: теплота сгорания; природный газ; ультразвук; диоксид углерода; качество газа; физико-химические показатели.

The impact of our state's commitments on the implementation of the Third Energy Package on the gas market is considered. It is shown that the lack of natural gas consumers information about the amount and cost of energy consumed creates certain problems in the formation of the gas market. The currently existing methods and technical means that implement them to determine the energy characteristics of natural gas are described, as well as a list of regulations governing this activity. The necessity of improving the existing methods and technical means of measuring the heat of combustion of natural gas in order to ensure their operability on low pressure gas networks is proved. Measuring the quality of natural gas (its calorific value) is a complex and expensive process. As a rule, it is currently measured only by the gas transmission and gas supply companies at the point of entry and exit of the gas transmission system, as well as at individual points at the level of gas distribution stations. Measurements are made using industrial flow or stationary laboratory chromatographs, which cost hundreds of thousands of euros. In addition, the maintenance of such chromatographs is expensive, and their work requires highly qualified workers. Such measurements are not available to the average household consumer mainly due to the cost of measuring one sample, which can reach tens of thousands of hryvnias, and therefore he can be satisfied only with the information provided to him by the gas supply organization. In such a scheme of supplier-consumer relationship lies a conflict of interest, because the organization that sells gas itself and determines (measures) its quality. An analysis of recent research in the field of natural gas quality control, in particular its calorific value, has shown that the most promising in terms of cost and applicability in different areas of gas transportation, from production to consumption, are correlation methods.

A new correlation was obtained between the physicochemical properties of natural gas (the rate of propagation of ultrasonic vibrations and the content of carbon dioxide in the sample of natural gas) and the higher heat of combustion of natural gas. The method of natural gas combustion heat control has been improved, measurement accuracy has been increased and functionality has been expanded.

Key words: heat of combustion; natural gas; ultrasound; carbon dioxide; gas quality; physico-chemical parameters.

Вступ

В 2015 році Верховною Радою України був прийнятий Закон України «Про ринок природного газу» [1]. Цей закон запроваджує засади функціонування ринку природного газу в Україні на принципах вільної конкуренції, захисту прав споживачів та безпеки постачання природного газу, а також створення регіональних ринків природного газу. Передувало прийняттю цього Закону підписання в 2014 році Україною Угоди про асоціацію з ЄС, наслідком якої стали зобов'язання взяті нашою державою про

імплементацію Третього енергетичного пакету, зокрема актів законодавства Енергетичного Співтовариства у сфері енергетики, а саме: Директиви 2009/73/ЄС про спільні правила внутрішнього ринку природного газу [2]; Регламенту (ЄС) 715/2009 про умови доступу до мереж транспортування природного газу та яким скасовується Регламент (ЄС) 1775/2005; Директиви 2004/67/ЄС про здійснення заходів для забезпечення безпеки постачання природного газу.

Згадані реформи покликані інтегрувати наш ринок газу до європейського ринку та, що

важливо, підсилити енергетичну безпеку нашої держави. Також одним із позитивних нововведень даних реформ є запровадження використання енергетичних одиниць при розрахунках за природний газ. Згадане запровадження створює передумови подолання численних проблем, які існують в українській газовій сфері, зокрема: відсутність у споживачів реальної інформації про кількість та вартість спожитої енергії; розбаланси на газовому ринку, які пов'язані з різною якістю газу та її зміною в часі; труднощі при подальшому розвитку оптового ринку газу в Україні; різна якість природного газу, який видобувається в Україні. З огляду на вищесказане, для забезпечення функціонування українського ринку газу потрібно переглянути існуючі способи вимірювання кількості природного газу як енергетичного товару.

Вимірювання якості природного газу (його теплотворної здатності) є складним та дорогим процесом. Як правило вона на даний час вимірюється тільки самими газотранспортуючими та газопастачаючими компаніями на точка входу та виходу газотранспортної системи, а також в окремих точках на рівні газорозподільчих станцій. Вимірювання здійснюється за допомогою промислових поточкових чи стаціонарних лабораторних хроматографів, вартість яких сягає сотень тисяч євро. Окрім цього обслуговування таких хроматографів є дорівартісним, а їх робота вимагає наявності висококваліфікованих працівників [3, 4]. Простому побутовому споживачеві такі вимірювання є недоступними в основному через вартість заміру однієї проби, яка може сягати десятків тисяч гривень і тому він може вдовільнитись тільки інформацією, які йому надає газопостачальна організація. В такій схемі взаємовідносин постачальник – споживач криється конфлікт інтересів, оскільки організація, яка продає газ сама і визначає (вимірює) його якість.

З огляду на вищесказане, питання розроблення, реалізації та впровадження простих та недорогих систем вимірювання якості природного газу є актуальним.

Формування цілей статті

В зв'язку з актуальністю питання визначення якості природного газу, було сформульовано наступні цілі:

- провести аналіз існуючих методів та технічних засобів контролю якості природного газу;

- удосконалити існуючі методи та засоби контролю якості природного газу, а також провести моделювання їх удосконалених можливостей з метою забезпечення ринку відносно недорогими та доступними різним споживачам технічними засобами контролю якості природного газу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання пошуку нових методів та розроблення технічних засобів контролю якості природного газу достатньо глибоко досліджується багатьма вченими, а процедура визначення енергії природного газу прийнята в міжнародному стандарті ISO 15112, який в 2009 році набув чинності і в Україні [5]. Визначення теплоти згорання природного газу в Україні регламентується стандартом, який гармонізований з міжнародним, ДСТУ ISO 15971:2014 [6], в якому визначення теплоти згорання природного газу здійснюється за трьома методами: прямим, непрямим та кореляційним.

Прямі методи вимірювання гуртуються на вимірюванні за допомогою термометричних вимірювань вивільненої теплоти під час повного спалювання природного газу [6]. Хоча прилади, які реалізують даний метод відносяться до приладів 1-го класу і відповідно володіють високою точністю, проте вони не дають можливість визначення енергії потоку природного газу, оскільки через теплову інерцію повільно реагують на зміну реального значення теплоти згорання природного газу, потребують спалювання газової проби, організації відводу продуктів горіння та мають значні масо-габаритні показники.

Вимірювання теплоти згорання природного газу непрямыми методами базується на розрахунковому підході з використанням хроматографів для визначення компонентного складу проби газу [7]. Незважаючи на домінування даних методів в газовій промисловості на даний час та їх високу точність вимірювання, вони володіють рядом

недоліків, основний з яких це їх вартість, пов'язаної з необхідністю створення відповідної інфраструктури та постійне технічне обслуговування висококваліфікованим персоналом.

Кореляційні методи вимірювання теплоти згоряння природного газу базуються на вимірюванні окремої чи групи фізико-хімічних властивостей газу і використанні отриманої в результаті експериментальних досліджень залежності між окремою чи частіше групою фізико-хімічних властивостей газу і теплою його згоряння [3]. Прилади, які реалізують кореляційні методи є порівняно невеликими, значно дешевшими у порівнянні з приладами, що реалізують прямі та непрямі методи, є достатньо швидко дійними та не потребують спалювання газової проби. На даний час існує декілька моделей приладів, що реалізують даний метод вимірювання, проте жоден з них не розрахований на роботу в газових мережах низького тиску, тобто на рівні побутових споживачів.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз останніх досліджень в галузі контролю якості природного газу, зокрема його теплотворної здатності, показав, що найбільш перспективними з точки зору вартості та можливості застосування на різних ділянках транспортування газу, від видобування до споживання, є кореляційні методи.

На зважаючи на те, що на даний час за кордоном існують приладові реалізації даних методів, проте вони не дозволяють проводити вимірювання на всіх ділянках транспортування газу, зокрема на мережах низького тиску.

Дану проблему намагаються вирішити колектив науковців Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Зокрема з 2009 року і по сьогодні на кафедрі «Енергетичного менеджменту та технічної діагностики» тривають дослідження з розроблення нового кореляційного методу контролю енергетичних характеристик природного газу. За цей час дослідження пройшли шлях від створення лабораторного стенду [3] до промислового взірця приладу [4]. Розроблений взірець приладу реалізує комплексний кореляційний підхід до контролю теплоти згоряння

природного газу. На основі багаточисельних експериментальних досліджень вдалось отримати, реалізовану за допомогою штучних нейронних мереж, залежність між такими фізико-хімічними властивостями природного газу як швидкість поширення ультразвукових коливань в природному газі, вмістом в ньому діоксиду вуглець та значення нижчої теплоти згоряння природного газу [8 - 10]. Крім того з метою розширення можливостей використання приладу як в побутових умовах, так і в умовах промислу за різних температур навколишнього середовища та природного газу, а також з метою підвищення точності вимірювання нижчої теплоти згоряння, були проведені дослідження залежностей зміни швидкості поширення ультразвукових коливань в природному газі від його температури [11]. Проведені дослідження та удосконалення дозволили забезпечити проведення вимірювання теплоти згоряння природного газу за допомогою розробленого приладу з зведеною до діапазону похибкою 4,1%.

Проте на стадії розроблення приладу основною метою було тільки отримання кореляційної залежності між згаданими фізико-хімічними властивостями та тільки значенням нижчої теплоти згоряння природного газу. В даній статті висвітлені результати моделювання можливості визначення вищої теплоти згоряння природного газу шляхом пошуку нових кореляційних залежностей між досліджуваними фізико-хімічними властивостями природного газу (швидкістю поширення ультразвукових коливань та вмістом діоксиду вуглецю в пробі природного газу) та вищою теплою згоряння природного газу.

Висвітлення основного матеріалу.

З метою підвищення точності вимірювань та розширення можливостей приладу було проведено моделювання можливості виведення нової кореляційної залежності між значенням вищої теплоти згоряння природного газу та значеннями швидкості поширення ультразвукових коливань в ньому та вмістом діоксиду вуглецю. Вибір тільки двох фізико-хімічних параметрів природного газу (швидкість поширення ультразвукових коливань та вміст діоксиду вуглецю) пов'язаний з технічними особливостями розробленого приладу для контролю нижчої теплоти згоряння

[4]. Вимірювання фізико-хімічних параметрів природного газу за допомогою згаданого приладу відбувається в спеціально розробленій герметичній вимірювальній камері, в якій розміщені: давач визначення вмісту діоксиду вуглецю газу (CO₂), який працює по принципу недеспергованої інфрачервоної спектроскопії (NDIR), виробництва компанії Daunament з чутливістю вимірювання концентрації діоксиду вуглецю в газовій суміші 0,01%; давач температури, для приведення фізико-хімічних параметрів природного газу до стандартних умов за експериментально дослідженою залежністю; два ультразвукові п'єзоелектричні перетворювачі з частотою збудження 1 МГц, які розміщені на певній відстані один від одного та виготовлені за оригінальною технологією, що містить елементи know how та обладнані багатошаровим узгоджуючим шаром для забезпечення вводу ультразвукового сигналу з частотою 1 МГц в газове середовище вимірювальної камери.

Отримана залежність, за якою приладом відбувається розрахунок значення нижчої теплоти згоряння природного газу за вимірними параметрами таких фізико-хімічними властивостей природного газу як швидкість поширення ультразвукових коливань в природному газі, вмістом в ньому діоксиду вуглецю стала результатом довготривалих та багаточисельних експериментальних випробувань на різних реальних сумішах (пробах) природного газу. Введення додаткових вимірювальних параметрів, вимагає внесення конструктивних змін в прилад, пошуку необхідних давачів, що потягне за собою збільшення вартості та складності виготовлення приладу, а також проведення нових довготривалих та дорогавартісних випробувань на нових сумішах природного газу.

З огляду на вищесказане, було прийнято рішення проведення моделювання можливості визначення вищої теплоти згоряння природного газу шляхом пошуку нових кореляційних залежностей між досліджуваними фізико-хімічними властивостями природного газу (швидкістю поширення ультразвукових коливань та вмістом діоксиду вуглецю в пробі природного газу) та вищою теплою згоряння природного газу. Вища теплота згоряння - це повна кількість енергії, що виділяється при

повному згорянні 1 кг або 1 м³ природного газу за умови, що водень, який міститься в ньому, згоряє з утворенням води.

На основі аналізу протоколів фізико-хімічних показників природного газу [13], які розміщені у вільному доступі, було створено базу з 1040 наборів даних різних сумішей природного газу з даними про їх хімічний склад, фізичні параметри, вищої/нижчої теплоти згоряння та вищого/нижчого значення числа Воббе. Ці протоколи фізико-хімічних показників природного газу отримані за допомогою хроматографічного методу на різних ділянках відбору різними філіями, а також компаніями, що не входять в структуру АТ «Укртрансгаз». Всього було проаналізовано більше 5000 протоколів за більш ніж 400-ми маршрутами в всіх областях України (крім ОРЛО та АР «Крим»). Варто зазначити, що вимірювання за допомогою хроматографів в АТ «Укртрансгаз» в основному здійснюється шляхом відбору на окремих маршрутах проб газу в пробовідбірники з подальшим їх перевезенням до хроматографічних лабораторій, які розміщені в управліннях. Тобто такий процес є затратним за часом та коштами.

Сформована база містить різні набори фізико-хімічних показників природного газу, зокрема діапазон зміни (табл. 1): нижчої теплоти згоряння від 7760ккал/м³ до 8907ккал/м³; діоксиду вуглецю від 0,0001% мол. до 4,83% мол.; метану від 75% мол. до 99% мол.; вищої теплоти згоряння від 8615ккал/м³ до 9843ккал/м³.

Для розрахунку швидкості поширення ультразвукових коливань в природному газі скористаємось рівнянням, яке подане в ISO 20765-1:2005 (рівняння AGA8) [12]. Метод базується на відомих термодинамічних залежностях між швидкістю звуку, показником адіабати газу та коефіцієнтом стисливості газу, а рівняння має вигляд:

$$V = 18,591 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T \cdot K}{\rho_c}}, \quad (1)$$

де: V - швидкість ультразвукових коливань в природному газі, м/с; $k=1,3$ - показник адіабати; $K=0,9978$ - коефіцієнт стисливості природного газу; $T = 293,15\text{K}$ - температура газу; ρ_c - густина газу, кг/м³, з протоколів

фізико-хімічних показників природного газу (табл. 1).

Результати розрахунку швидкості поширення ультразвукових коливань в вибраних для моделювання наборах сумішей газу подано в табл. 1. Діапазон зміни швидкості складає від 391м/с до 442 м/с.

Шляхом проведення регресійного аналізу залежностей між досліджуваними фізико-хімічними властивостями природного газу (швидкістю поширення ультразвукових коливань V та вмістом діоксиду вуглецю XCO2 в пробі природного газу) та вищою теплою згоряння природного газу QB з використанням методу найменших квадратів, було отримано наступне рівняння:

QB = 108 + QH * (1,052434 + 10^-4 * V - sqrt(6 - XCO2) / 6500) * (2)

З використанням встановленої залежності (2) було розраховано значення вищої теплоти згоряння природного газу в залежності від

значення його нижчої теплоти згоряння, швидкості поширення ультразвукових коливань та вмісту в ньому діоксиду вуглецю, які можна виміряти за допомогою вищезгаданого приладу для контролю нижчої теплоти згоряння. Результати розрахунку подано в табл. 1.

За результатами проведених моделювань, було побудовано порівняльні графіки зміни нижчої, вищої (за даним протоколом) та вищої розрахованої теплоти згоряння для всього діапазону наборів даних (рисунок 1).

Аналіз отриманих результатів проведеного моделювання показує, що максимальне розходження значень вищої теплоти згоряння природного газу за даними протоколів фізико-хімічних показників та значень, отриманих за допомогою отриманої залежності (2) складає не більше ±4 ккал/м³, а приведена до діапазону 1147ккал/м³ похибка вимірювань складає не більше 0,7%.

Таблиця 1 - База наборів різних сумішей природного газу з даними про їх хімічний склад, фізичні параметри

Table with multiple columns: No пробир, мольна частка, компонентний склад, фізико-хімічні показники газу, температура вимірювання згоряння, теплота згоряння, швидкість поширення ультразвукових коливань, різниця QH-QB.

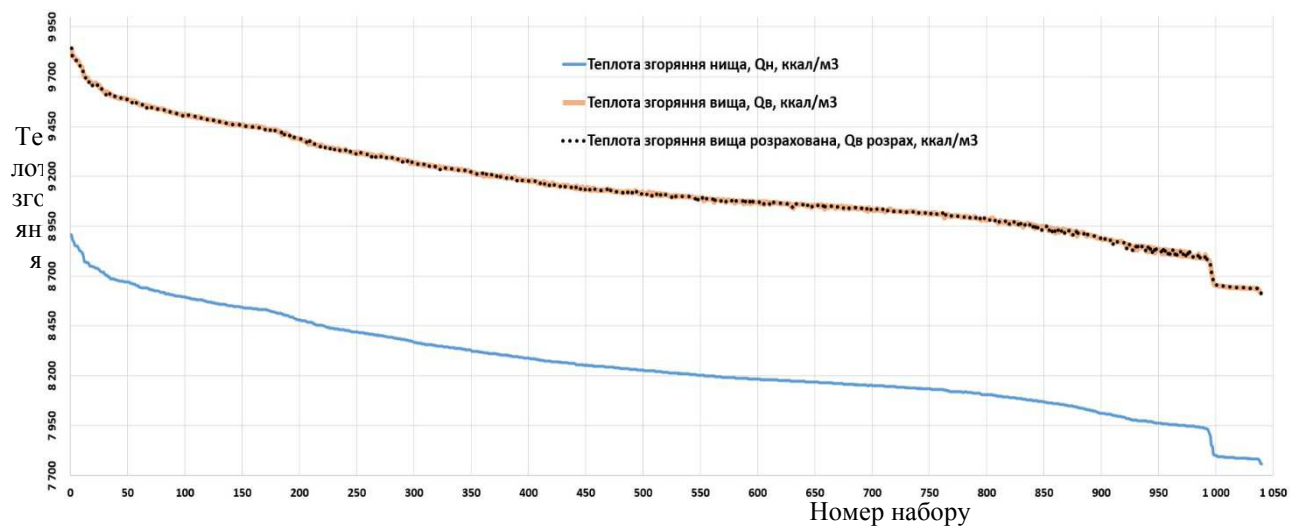


Рисунок 1 - Зміни нижчої, вищої (за даним паспортів) та вищої розрахованої теплоти згоряння від номера набору даних

За результатами проведеного моделювання з метою пошуку нових кореляційних залежностей між досліджуваними фізико-хімічними властивостями природного газу (швидкістю поширення ультразвукових коливань та вмістом діоксиду вуглецю в пробі природного газу) та вищою теплотою згоряння природного газу, можемо зробити наступні висновки:

1) Розроблення нових високоточних та недорогих приладів для контролю якості природного газу, зокрема його теплоти згоряння є актуальною задачею, особливо для газових мереж низького тиску.

2) Отримана залежність для визначення вищої теплоти згоряння дозволяє використовувати можливості розробленого приладу для контролю якості природного газу без зміни його конструкції та збільшення вартості виготовлення.

Проведені моделювання дозволять удосконалити метод контролю теплоти згоряння природного газу та розширити діапазон вимірювання приладу, який його реалізує.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про ринок природного газу» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19>.
2. Директива Європейського Парламенту та Ради 2009/73/ЄС від 13 липня 2009 року URL: <http://old.minjust.gov.ua/file/32544.docx>.

3. Rybitskyi I., Karpash O., Darvai I., Karpash M. New low-cost method for determination of heating value of natural gas. *Wiertnictwo. Nafta. Gaz. Vol. 28, Issue 1-2. Krakow, 2011. P.333-338, ISSN 1507-0042.*

4. Рибіцький І.В. Виготовлення, налагодження та промислова апробація в умовах ПАТ «Укртрансгаз» приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу / І.В. Рибіцький, М.О. Карпаш, А.В. Яворський, П.М. Райтер, І.О. Орлов, М.І. Болховітін // *Нафтогазова галузь України*. 2018. - №4. С. 32-37. УДК 620.179.

5. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії.

6. ДСТУ ISO 15971:2014. Природний газ. Вимірювання властивостей.

7. ДСТУ ISO 6976:2009. Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу.

8. Taras Koturbash, Maksym Karpash, Iryna Darvai, Ihor Rybitskyi, Vladimir Kutcherjv / Development of new instant technology of gas quality determination / *Proceedings of the ASME 2013 Power Conference, Power2013, July 29-August 1, 2013, Boston, Massachusetts, USA (Scopus) DOI: 10.1115/POWER2013-98089.*

- 9 Патент на винахід UA 92846. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Карпаш О.М., Дарвай І.Я.,

Карпаш М.О., Яворський А.В., Рибіцький І.В. (Україна). Опубл. 10.12.2010, Бюл.№ 23, 2010р.

10. Патент на корисну модель UA 40002 U. Ультразвуковий перетворювач для безконтактного вимірювання товщини матеріалів при використанні повітряно-акустичного зв'язку / Карпаш О.М., Рибіцький І.В., Карпаш М.О. (Україна). Опубл. 25.03.2009р, Бюл. № 6, 2009 р.

11. Рибіцький І.В. Урахування температури природного газу при експрес-визначенні його теплоти згоряння / І.В. Рибіцький, І.І. Височанський, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш // Нафтогазова енергетика. – 2017. - №2(28). С. 83-88.

12. ISO 20765-1:2005 Natural gas. Calculation of thermodynamic properties. Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications.

13. Якість газу. АТ «Укртрансгаз». URL: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>.

References

1. Zakon Ukrainy «Pro rynek pryrodnoho hazu» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19>.

2. Dyrektyva Yevropeys'koho Parlamentu ta Rady 2009/73/YES vid 13 lypnya 2009 roku: URL: <http://old.minjust.gov.ua/file/32544.docx>.

3. Rybitskyi I., Karpash O., Darvai I., Karpash M. New low-cost method for determination of heating value of natural gas. *Wiertnictwo. Nafta. Gaz*. Vol. 28, Issue 1-2. Krakow, 2011, p.333-338, ISSN 1507-0042.

4. I.V. Rybits'kyi, M.O. Karpash, A.V. Yavors'kyi, P.M. Rayter, I.O. Orlov, M.I. Bolkhovitin Vyhovlennya, nalazhzhennya ta promyslova aprobatsiya v umovakh PAT «Ukrtrans-haz» prykladu dlya ekspres-kontrolyu teploty z-horyannya pryrodnoho hazu / // *Naftohazova haluz' Ukrainy*. 2018. - №4. P. 32-37.

5. DSTU ISO 15112:2009. Pryrodnyy haz. Vyznachennya enerhiyi.

6. DSTU ISO 15971:2014. Pryrodnyy haz. Vymiryuvannya vlastyivostey.

7. DSTU ISO 6976:2009. Pryrodnyy haz. Obchyslennya teploty z-horyannya, vidnosnoyi hustyny i chysla Vobbe na osnovi komponentnoho skladu.

8. Taras Koturbash, Maksym Karpash, Iryna Darvai, Ihor Rybitskyi, Vladimir Kutcherjv / Development of new instant technology of gas quality determination / Proceedings of the ASME 2013 Power Conference, Power2013, July 29-August 1, 2013, Boston, Massachusetts, USA (Scopus) DOI: 10.1115/POWER2013-98089.

9 Patent na vynakhid UA 92846. Sposib ekspres-vyznachennya teploty z-horyannya pryrodnoho hazu / Karpash O.M., Darvai I.YA., Karpash M.O., Yavors'kyi A.V., Rybits'kyi I.V. (Ukrayina). Opubl. 10.12.2010, Byul.№ 23, 2010.

10. Patent na korysnu model' UA 40002 U. Ul'trazvukovyy peretvoryuvach dlya bezkontaktneho vymiryuvannya tovshchyny materialiv pry vykorystanni povitryano-akustychnoho zv'yazku / Karpash O.M., Rybits'kyi I.V., Karpash M.O. (Ukrayina). Opubl. 25.03.2009r, Byul. № 6, 2009.

11. Rybits'kyi I.V. Urakhuvannya temperatury pryrodnoho hazu pry ekspres-vyznachenni yoho teploty z-horyannya / I.V. Rybits'kyi, I.I. Vysochans'kyi, O.M. Karpash, M.O. Karpash // *Naftohazova enerhetyka*. – 2017. - №2(28). P. 83-88.

12. ISO 20765-1:2005 Natural gas. Calculation of thermodynamic properties. Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications.

13. Yakist' hazu. АТ «Ukrtrans-haz». URL: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>

ВИМОГИ ДО ПОДАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Рукописи статей, що подаються до університетських науково-технічних журналів, повинні бути актуальними, зрозумілими, повноцінними, виконані на високому науково-технічному рівні і відповідати нафтогазовому профілю, містити наукову і практичну новизну, викликати інтерес у читачів наукової спільноти.

Рекомендації щодо написання статті:

Стаття не містить елементів плагіату (включаючи перевидання статті або її частин, подання одночасно в декілька журналів, використання текстів та ілюстрацій без дозволу їх правовласника) і автоплагіату.

Стаття не містить орфографічних і граматичних помилок. Статтю написано грамотно.

Стаття завершена, не фрагментарна, логічна, не «архівного» чи «статистичного» характеру.

Стаття спрямована на вирішення конкретних цілей і задач нафтогазової проблематики.

Стаття висвітлює важливі регіональні дослідження, які не можуть бути проведені в іншій місцевості і відображають конкретні географічні, кліматичні, соціально-економічні проблеми.

Стаття здатна як доповнити і розширити бази Scopus і Web of Science, так і зробити новий внесок у нафтогазову галузь науки, сформувати нові дискусійні теми, відкрити нові перспективи співпраці в науковій галузі.

Авторам настійно рекомендується перевіряти кінцеві варіанти статті на помилки, перш ніж повернути виправлений рукопис до редакції, оскільки врахування запізнілих поправок не гарантується.

Відповідальність за зміст статті і коректність викладеного матеріалу несе автор.

До редакції звичайною поштою надсилаються:

- два примірники рукопису статті (включаючи ілюстрації і таблиці) *українською, російською або англійською* мовами, надруковані на папері формату А4 (210x297 мм);
- довідка про авторів;

До редакції електронною поштою на адресу журналу або он-лайн на сайт університету надсилаються:

Журнал «Методи та прилади контролю якості»
<http://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky>.
E-mail: mmi@nung.edu.ua

Стаття повинна бути структурована за такими пунктами:

1. **Назва статті** відтворює її зміст та привертає увагу наукової аудиторії, в тому числі міжнародну. Містить не більше 12 слів.
2. **Кількість авторів** – не більше 10 (причому не більше 4 з однієї організації).
3. **Анотація** викладена в одному абзаці (не поділяється на підрозділи), зрозуміла, містить короткий опис проведених досліджень, розкриває основні результати роботи; ціль статті сформульовано коректно.
Обсяг анотації разом із ключовими словами – не менш як 1800 знаків.
4. **Ключові слова** повинні конкретизувати інформацію про дослідження, але не узагальнювати її. Складаються з 3-6 словосполучень, відокремлені за допомогою крапки з комою, не повторюються в назві статті, відповідають змісту роботи.
5. **Вступ** дає змогу оцінити сучасний стан проблеми на світовому рівні. Завершується вступ формулюванням **мети роботи** – «виявити...», «охарактеризувати...», «з'ясувати...». В тексті вступу відсутні квадратні дужки з більш ніж 3 джерелами.
6. **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій**, в яких започатковано вирішення даної проблеми і на які посилається автор.
7. **Висвітлення 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 і максимальне уникає їх.
Кількість дослідів повинна бути достатньою, об'єм вибірок має відповідати аналогічним дослідженням, опублікованим в міжнародних наукових виданнях. Дослідні дані обробляють коректними статистичними методами (перевагу надавати якомога сучаснішим багатомірним). Аналіз результатів містить достатнє статистичне обґрунтування і відповідає загальноновизнаним нормам нафтогазової галузі.
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 ГОСТ 7.1:2006 "Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання" та ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання". Також **необхідно подати транслітерацію** літератури, напр. за посиланням ukrlit.org.

Рекомендований обсяг рукопису статті – від 7 стор.

Електронний варіант статті повинен задовольняти таким вимогам:

1. Стаття набирається у редакторі Microsoft Word на аркуші формату 210x297 мм, поля (мм): верхнє – 20, нижнє – 25, лівє – 30, правє – 15.

2. Порядок набору:

УДК (Times New Roman (Cyr), кегль 11, без абзацного відступу, вирівнювання – зліва).

Назва статті (Arial (Cyr), кегль 14, bold, прописом, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 9 пт).

Ініціали, прізвище автора (співавторів) (Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру). Прізвище відповідального за подання статті автора повинно бути позначене зірочкою.

Назва організації, її повна поштова адреса, адреса електронної пошти (Times New Roman (Cyr), кегль 11, italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка знизу – 12 пт). Якщо автори статті представляють декілька організацій, то необхідно для кожної організації аналогічно вказати її назву, повну поштову адресу і адресу електронної пошти.

Анотації українською, російською та англійською мовами – кегль (менший від основного тексту статті) – 10, інтервал - 1,0. Повинна містити не менш як 1800 знаків.

Основний текст набирається таким чином:

2.1. Стиль “звичайний”, гарнітура - Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

Текст статті, в якому повинні бути вказані вище елементи, обсягом від 7 сторінок.

2.2. Відбивки по тексту не використовуються за винятком підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відокремлюються відбивками “перед” – 9, “після” – 6).

3. Для набирання **формул** використовується редактор формул **Equation v. 3.0.** або Math Type 6,9 **Стилі:** **Text** – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** - Times New Roman (Cyr), italic, L.C.Greek – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** - Times New Roman (Cyr), **Number** - Times New Roman (Cyr). **Розміри:** **Full** – 11, **Subscript/Superscript** – 8, **Sub-Subscript/Superscript** – 8, Symbol – 14, **Sub-Symbol** – 10.

Забороняється використовувати вбудований у MS Office версій 10 і вище редактор формул!

Для наочності рекомендується формули відокремлювати відбивками зверху і знизу – 6 пт.

Формули компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм!!!

4. **Таблиці** повинні бути складені лаконічно, зрозуміло і містити мінімальні відомості, необхідні для ілюстрування суті статті. Таблиці не повинні дублювати результати, представлені в інших місцях рукопису (наприклад, у вигляді графіків).

Назва таблиці: Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 6 пт.

Таблиці компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм або 165 мм !!!

5. **Ілюстрації** до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані у растровому (векторному) форматі (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF, CDR) і додаватися окремим файлом.

Забороняється використовувати графічний редактор MS WORD!!!

Ілюстрації типу фотографій повинні бути відскановані з роздільною здатністю не менше 400 dpi і/або додаватися в оригіналі.

Усі рисунки, графіки і фотографії можуть бути чорнобілими, кольоровими або півтоновими.

Ілюстрації, перескановані з періодики та накреслені вручну, не приймаються!!!

Підписи до ілюстрацій: Times New Roman (Cyr), кегль 10, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. **Написи в ілюстраціях** виконуються гарнітурою Arial.

Забороняється використовувати аббревіатуру в назвах.

6. Використані автором літературні джерела, на які є посилання у тексті, наводяться у кінці статті загальним списком у порядку згадування. До нього слід включати лише джерела, на які є посилання у статті. У тексті порядковий номер (згідно списку) літературного джерела, на яке посилаються, подається у квадратних дужках, наприклад, [4]. Обов'язково оформити **REFERENCES** через translit.kh.ua.

Додатково до тексту статті додається файл з довідкою про авторів
(для присвоєння індексу DOI кожній публікації).

ДОВІДКА ПРО АВТОРА

1. Автор (укр. і англ.) _____
(Прізвище, ім'я, по батькові)
2. Науковий ступінь _____
3. Вчене звання, ID ORCID _____
4. Місце роботи (повна назва організації та адреса укр. і англ.) _____
5. Контактний номер телефону _____
6. Електронна пошта _____
7. Поштова адреса з індексом (на яку необхідно направити примірник збірника наукових праць) _____
8. Назва публікації (укр. і англ.) _____
9. Анотації трьома мовами з ключовими словами (укр., рос., англ.) _____
10. Дата подання статті до редакції _____

Якщо авторів декілька, довідку можна оформити одну з чітким вказанням прізвищ і місця роботи українською і англійською мовами.

Рукописи, які не враховують наведені вище вимоги, повертаються автору без розгляду по суті. Датою надходження рукопису статті в редакцію вважається дата надсилання її кінцевого варіанта.