

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 5 (285)
2024**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2024

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 5 (285) 2024

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 5 (285) 2024

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могила В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 3 від 29 листопада 2024 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2024

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2024

З М І С Т

Спеціальність 122

- Полупан Ю.В., Родіонов П.Ю., Дьомін М.К.**
ПОРІВНЯННЯ ДВОХ ПІДХОДІВ ДО UNIT-ТЕСТУВАННЯ ANGULAR-ДОДАТКІВ 5
- Ткаченко В. Ю., Хорошун Г.М., Шумова Л.О., Рязанцев О.І.**
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ
ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ 10

Спеціальність 131

- Stovnyuk O.V., Kyrylyuk V.O.**
EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF METHODS FOR EXPANDING
THICK-WALLED TUBES INTO TUBE SHEETS OF HEAT EXCHANGERS 16

Спеціальність 133

- Данилюк Н.Я., Артим В.І.**
ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ СТРАТЕГІЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ЕЛЕМЕНТІВ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНИМИ
ПРАКТИКАМИ КЕРУВАННЯ ПРОЄКТАМИ..... 24
- Чеведа А.М., Артим В.І.**
ВПРОВАДЖЕННЯ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ СШНУ.
ОСНОВНІ ВИГОДИ ТА ВИКЛИКИ 33

Спеціальність 141

- Стрункін Г.М.**
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ПРИ УРАХУВАННІ
АКТИВНОГО ОПОРУ У КОНТУРІ КОМУТАЦІЇ РОТОРНОГО ВИПРЯМЛЯЧА 44

Спеціальність 151

- Моркун В.С., Моркун Н. В., Поркуян О.В., Грищенко С.М., Бобров Є. Ю., Грищенко Я.О.**
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОРЯДКУ ОБЕРТОВИХ МАШИН..... 50
- Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Дуришев О. А.**
ВАЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗНАТЬ З НАРИСНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ПРИ РОЗРОБЦІ ЕСКІЗУ 59

Спеціальність 122

- Kunur T.V.**
INTERNET OF THINGS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AGRICULTURE.....65
- Ніжегородцев В.О., Білокопитов Д.С., Філоненко М. М., Лаговський В. В.**
АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ФРЕЙМВОРК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ
З МОНІТОРИНГУ GSM-ТЕХНОЛОГІЙ.....72

CONTENTS

Speciality 122

- Polupan Yu.V., Rodionov P.Yu., Domin M.K.**
COMPARISON OF TWO APPROACHES TO UNIT TESTING ANGULAR APPS 5
- Tkachenko V.Yu., Khoroshun H.M., Shumova L.O., Ryazantsev O.I.**
RESEARCH OF THE OPTIMIZATION METHODS OF THE PARAMETERS
OF ELECTRONIC DEVICES FOR BUILDING AN EXPERT SYSTEM..... 10

Speciality 131

- Stovpnyk O.V., Kyrylyuk V.O.**
EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF METHODS FOR EXPANDING THICK-WALLED
TUBES INTO TUBE SHEETS OF HEAT EXCHANGERS 16

Speciality 133

- Danyliuk N.Y., Artym V.I.**
STUDYING THE INTERACTION BETWEEN STRATEGIES FOR ENHANCING
THE DURABILITY OF OIL AND GAS EQUIPMENT AND BEST PROJECT
MANAGEMENT PRACTICES 24
- Cheverda A.M., Artym V.I.**
IMPLEMENTATION OF BIM TECHNOLOGIES FOR MONITORING AND MAINTENANCE OF SRPU. KEY
BENEFITS 33

Speciality 141

- Strunkin H.M.**
EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS
OF THE ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR TAKING
INTO ACCOUNT THE ACTIVE RESISTANCE IN THE ROTOR RECTIFIER
COMMUTATION CIRCUIT 44

Speciality 151

- Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuian O.V., Hryshchenko S.M., Bobrov E.Yu., Hryshchenko Ya.O.**
DETERMINATION OF THE VIBRATION PARAMETERS OF A DRILLING RIG USING
THE METHOD OF COMPUTED ORDER TRACKING OF ROTATING MACHINES 50
- Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Duryshv O. A.**
THE IMPORTANCE OF USING DESCRIPTIVE GEOMETRY KNOWLEDGE
WHEN DEVELOPING A SKETCH..... 59

Speciality 122

- Kunup T.V.**
INTERNET OF THINGS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AGRICULTURE.....65
- Nizhehorodtsev V.O., Bilokopytov D.S., Filonenko M. M., Lagovsky V. V.**
HARDWARE AND SOFTWARE FRAMEWORK OF AN INTELLIGENT SYSTEM
FOR DATA COLLECTION FROM GSM TECHNOLOGY MONITORING.....72

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-5-9>

УДК 004.41

ПОРІВНЯННЯ ДВОХ ПІДХОДІВ ДО UNIT-ТЕСТУВАННЯ ANGULAR-ДОДАТКІВ

Полупан Ю.В., Родіонов П.Ю., Дьомін М.К.

COMPARISON OF TWO APPROACHES TO UNIT TESTING ANGULAR APPS

Polupan Yu.V., Rodionov P.Yu., Domin M.K.

В сучасному світі реактивні системи набирають все більшої популярності, при цьому в основі реактивності є робота з асинхронними потоками даних. Тестування реактивних систем стоїть окремою задачею, в якій є низка відкритих питань, наприклад, вимірювання ефективності тестів, використовуючи той чи інший підхід до тестування.

Для тестування Angular-додатків в роботі було обрано два підходи: 1) з використанням зв'язки Jasmine + Karma, що встановлюється за замовчуванням при створенні додатку; 2) з використанням Jest.

В статті тестується Angular-додаток, який має 7 тестів, 3 з яких – тести синхронних блоків коду і 4 – для асинхронних блоків. При тестуванні використовувались інструменти, що пропонує Angular із коробки та фреймворк Jest.

Для вимірювання ефективності Unit-тестів, як правило, використовуються чотири критерії [2, 4]: захист від помилок (protection against bugs); стійкість до рефакторингу (resilience to refactoring); швидкість зворотнього зв'язку (fast feedback); простота підтримки (maintain ability). Порівнюючи різні підходи до тестування можна визначити як той чи інший підхід впливає на конкретний критерій ефективності Unit-тестів, підвищуючи його, або навпаки зменшуючи. Як відомо, на сьогодні не існує автоматичного способу вимірювання ефективності з отриманням значень для кожного критерію і тому кожен тест потрібно оцінювати окремо. Для отримання значення по критерію «швидкість зворотнього зв'язку» будемо використовувати час виконання тестів, в тому числі з визначенням відсотка покриття коду тестами при допомозі команди coverage. Цей критерій показує, що чим швидше виконується тест на етапі розробки, тим менше часу витрачається на усунення знайдених помилок, тим самим, значно підвищуючи ефективність Unit-тестів.

В результаті порівняння роботи двох фреймворків для тестування, можна зробити висновок, що при використанні Jest тести виконуються в середньому на 60% швидше за рахунок того, що система відстежує зміни файлів та не виконує непотрібних дій. При тестуванні асинхронного коду така ж тенденція (збільшення швидкості тестування на 60%) зберігається, тому Jest відмінно підходить для виконання тестування Angular-проектів, які містять багато асинхронного коду.

Так як ефективність Unit-тестів залежить від швидкості зворотнього зв'язку (fast feedback), то, використовуючи Jest, ми, тим самим, значно підвищуємо ефективність Unit-тестування та всього проекту цілому.

Ключові слова: Unit-тестування, Angular-додаток, Jasmine, Karma, Jest, модульні тести, --test coverage, Angular CLI, ChromeHeadless, реактивність, синхронний та асинхронний код.

Вступ

В останні десятиліття тестування програмного забезпечення розвивається дуже швидко. Раніше була доступна лише невелика кількість інструментів для цього, але тепер є величезний вибір, в якому розробники не обмежені і від їхніх поглядів на ПЗ, на ризики, тестові підходи та стратегії залежить на скільки якісний продукт буде випущений у результаті. Існуючі технології безперечно впливають на підхід до тестування, і поки їхній розвиток буде на належному рівні, цей вплив продовжуватиметься.

Види тестування QA включають безліч методів, які допомагають переконатися, що зміни в

коді працюють належним чином або, навпаки, є якісь помилки. Сам процес може здійснюватися на будь-якому етапі розробки. Зараз можна виділити 6 основних видів тестування, які допоможуть виявити помилки, недоробки та невідповідності вимогам, а також оцінити рівень якості програмного забезпечення перед його випуском [1, 2]:

1. Модульні тести, блочне тестування або юніт-тестування (англ. unit testing) - тести дуже низького рівня, які близькі до вихідного коду програми. Полягають у перевірці окремих методів та функцій, компонентів чи модулів. Їх можна легко і дешево автоматизувати, при цьому можуть швидко виконуватися за допомогою сервера безперервної інтеграції.

2. Інтеграційні тести – перевіряють, як різні модулі спільно працюють. Наприклад, взаємодіють із базою даних.

3. Функціональне тестування програмного забезпечення – фокусується на бізнес-вимогах додатків. Необхідно, щоб перевірити результат дії та не перевіряти проміжні стани системи під час його отримання.

4. Наскрізне тестування - відтворює поведінку користувача з програмним забезпеченням. Перевіряє, наскільки різні запити користувача реалізуються правильно і просто.

5. Приймальне тестування – формальна частина. Перевіряє, чи задовольняє система бізнес-вимогам. Для їх проведення потрібно, щоб програмне забезпечення повністю працювало.

6. Тестування продуктивності - проводиться для оцінки, як система працює при певному робочому навантаженні. Дозволяє виміряти надійність, швидкість та можливість для масштабування програми.

Всі методи та етапи тестування потрібні для загальної працездатності програми, перевірки програми на можливу появу багів при отриманні невірних даних чи при проведенні несподіваних дій.

У сучасному цифровому світі критично важливою є можливість обробляти дані в режимі реального часу, коли миттєва реакція програми на дії користувача призводить до автоматичного оновлення системи. Для створення подібних додатків добре підходить такий фреймворк, як Angular, в основі якого лежить бібліотека RxJS з її можливістю швидко та просто створювати реактивний код.

Unit-тести для будь якого програмного забезпечення потрібні в першу чергу по двом причинам [2, 3, 4]:

1. Знизити вірогідність поломки робочого, вже перевіреного коду;

2. Краще розуміти власний код та відловити помилки заздалегідь.

Термін “юніт” стосовно тестування позначає мінімально можливу частину коду, яку можна протестувати ізольовано. Це може бути функція, метод або навіть окремий рядок коду. Кожен “юніт” має бути протестований окремо від решти коду, щоб переконатися в його коректності. Такий підхід дає змогу виявити помилки та проблеми в коді на ранніх стадіях розробки.

Хороші unit-тести повинні відповідати наступним критеріям [2]:

1. Прості і зрозумілі. Якщо розробник через деякий час дивиться на свій тест або тест свого колеги і в нього з'являється бажання видалити або переписати цей тест – то це вже неправильно. Інший випадок, якщо розробник дивиться на код додатку, а потім на тест і розуміє, що тест складніший за код – то це теж неправильно;

2. Тести повинні забезпечувати Quality gata, тобто, якщо код проходить перевірку тестами, то його пропускають далі в розробку, якщо ні – відправляють на доробку;

3. Найменування тестів. Тести повинні мати таке ім'я, щоб у випадку, коли тест не буде пройдено, розробник точно міг визначити, який тест впав;

4. Unit-тести повинні бути однорідними, тобто, щоб не було можливості в команді визначити хто конкретно написав той чи інший тест. Для цього потрібно залучати Code review та статичний аналіз коду. Тести потрібно перевіряти на якість коду так само, як і основний код;

5. Unit-тести повинні бути без side ефектів. Вони повинні бути незалежними і запускатися окремо;

6. Чисті тести. Код тесту повинен читатися легко, навіть якщо тестує складний код;

7. Тести повинні бути швидкими. Вони не повинні конектитись до бази даних, щось отримувати з мережі чи читати з файлової системи. Навіть на дуже великому проекті всі тести повинні проходитись не довше декількох хвилин;

8. Тести повинні перевіряти ЩО робить код, а не те ЯК він це робить. Це робиться для того, щоб була можливість легко змінити основний код або перефакторити.

9. Unit-тести повинні бути іменно Unit-тестами, а не інтеграційними. Наприклад, різні допоміжні утиліти дозволяють писати інтеграційні тести, які можуть бути, в результаті, дуже не стабільними;

10. При написанні тестів треба дотримуватись піраміди тестування. Unit-тестів повинно бути багато, а тестів вищого рівня менше. Коли на проєкті багато інтеграційних тестів і мало Unit-тестів – це антипаттерн, тобто перевернута піраміда.

Для вимірювання ефективності Unit-тестів, як правило, використовуються чотири критерії [2]: захист від помилок (protection against bugs); стійкість до рефакторингу (resilience to refactoring); швидкість зворотнього зв'язку (fast feedback); простота підтримки (maintain ability). Порівнюючи різні підходи до тестування можна визначити як той чи інший підхід впливає на конкретний критерій ефективності Unit-тестів, підвищуючі його, або навпаки зменшуючі. Як відомо, на сьогодні не існує автоматичного способу вимірювання ефективності з отриманням значень для кожного критерію і тому кожен тест потрібно оцінювати окремо. Для отримання значення по критерію «захист від помилок» краще за все використовувати команду coverage, для визначення того, яка кількість коду покрита тестами. Чим більший відсоток коду покритий тестами, тим більша вірогідність того, що основний код додатку захищений від помилок. Зазвичай хорошим показником є 80% покриття. Для отримання значення по критерію «швидкість зворотнього зв'язку» будемо використовувати час виконання тестів, в тому числі, і з визначенням відсотку покриття.

Виклад основного матеріалу

Почати писати Unit-тести в Angular додатках можна, використовуючи Jasmine в якості середовища тестування та Karma для запуску тестів. Також Angular надає такі утиліти, як TestBed і Async, щоб спростити тестування асинхронного коду, компонентів, директив або сервісів.

Jasmine є середовищем модульного тестування для JavaScript. Він може запускати тести як у Node.js, так і у браузері. Він використовується в середовищі Angular та особливо популярний у проєктах на його основі. Це гарний вибір для проєктів Vanilla JS, а також проєктів, що базуються на інших платформах.

Karma – це інструмент автоматизації тестування, створений командою Angular JS в Google і який дозволяє розробникам тестів налаштувати те на яких пристроях чи браузерах будуть запускатися тести (за замовчуванням це Chrome) і які тестові фреймворки та плагіни братимуть у цьому участь.

Так як нас цікавить швидкість виконання тестів, то краще для тестування використовувати headless браузер. У headless браузері немає графічного інтерфейсу, і таким чином можна

зберігати результати тесту всередині свого терміналу. Він в основному використовується інженерами з тестування програмного забезпечення, оскільки браузери без GUI працюють швидше, так як їм не потрібно малювати візуальний контент. Для використання ChromeHeadless необхідні додаткові налаштування Karma [2, 4].

Так от, якщо мова йде про тестування Angular-додатків, то за замовчуванням маєтись на увазі використання зв'язки Jasmine + Karma, які встановлюються автоматично при створенні додатку. Jasmine за замовчуванням інтегрована з Karma, а Angular CLI вмiє працювати з Karma з коробки. Але писати тести для JavaScript можна також використовуючи тестовий фреймворк Jest. В роботі, як раз, ставиться задача порівняти швидкість тестування як синхронного так і асинхронного коду, використовуючі інструменти для тестування Jest та Karma.

Jest – це фреймворк для тестування, розроблений Facebook, має відкритий вихідний код і заснований на Jasmine. На сьогоднішній день компанія Facebook переробила більшу частину його функціоналу і створила на його основі безліч нових можливостей. Відмінно підходить для тестування проєктів, що використовують Node, React, Angular, Vue, Babel, TypeScript і не тільки. Також у Jest є потужні та швидкі вбудовані засоби для аналізу покриття коду тестами.

Створений за допомогою Angular CLI новий Angular-додаток за замовчуванням встановлює всі інструменти, необхідні для unit-тестування [5, 6], і вже містить тест для компонента AppComponent. Файли тестів мають назву у форматі *.spec.ts. При створенні елементів через Angular CLI ці файли тестів створюються за замовчуванням автоматично.

Angular CLI дозволяє згенерувати звіт про покриття додатку тестами в окремій директорії, що має назву coverage. Щоб згенерувати звіт потрібно запустити тести з прапором --code-coverage для Karma, а для Jest – просто --coverage.

Для порівняння швидкості тестування при допомозі зв'язки Jasmine + Karma та Jest було створено Angular-додаток з одним компонентом та одним сервісом. Компонент містить два блоки асинхронного коду та роботу з сервісом. Загалом додаток містить сім тестів (рис. 1.). Тести під номерами 2, 3, 4, 6 містять роботу з асинхронними даними з використанням об'єкту Observable [5, 7, 8], тести з номерами 1, 5, 7 – не містять роботу з асинхронними даними [7, 9]. Звіт про тестування в терміналі та браузері можна побачити на рис. 1-2.

```

> ng test

! Generating browser application bundles (phase: building)...3
0 11 2024 19:18:00.833:WARN [karma]: No captured browser, open
http://localhost:9876/
30 11 2024 19:18:01.244:INFO [karma-server]: Karma v6.3.20 ser
ver started at http://localhost:9876/
30 11 2024 19:18:01.245:INFO [launcher]: Launching browsers Ch
rome with concurrency unlimited
! Generating browser application bundles (phase: building)...3
0 11 2024 19:18:01.254:INFO [launcher]: Starting browser Chrom
e
✓ Browser application bundle generation complete.
30 11 2024 19:18:33.722:WARN [karma]: No captured browser, ope
n http://localhost:9876/
30 11 2024 19:18:39.233:INFO [Chrome 131.0.0.0 (windows 10)]:
Connected on socket nzYZ5T1Fz4ufdybBAAAB with id 99980763
Chrome 131.0.0.0 (windows 10): Executed 7 of 7 SUCCESS (1.564
secs / 1.277 secs)
TOTAL: 7 SUCCESS

```

Рис. 1. Звіт про тестування при використанні зв'язки Karma+Jasmine

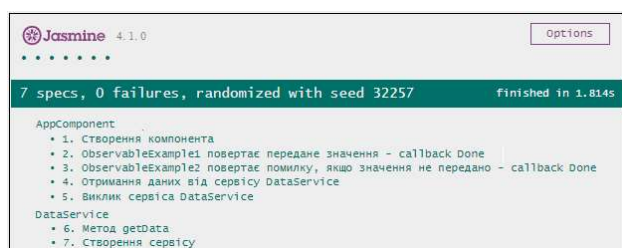


Рис. 2. Тест раннер Karma з успішно виконаними тестами.

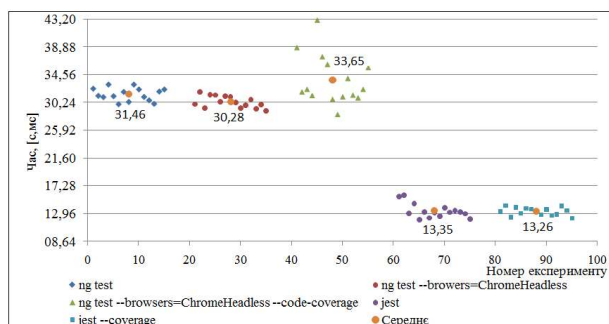


Рис. 3. Тестування Angular-додатку. Тестування синхронного та асинхронного коду разом

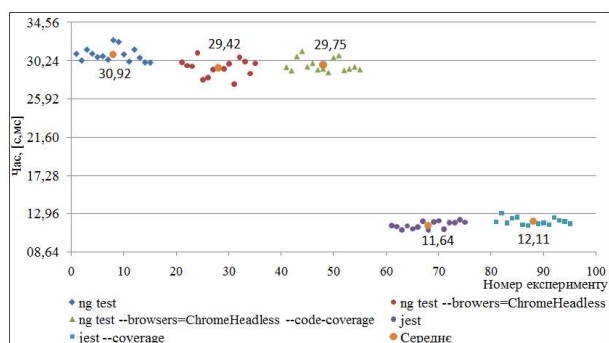


Рис. 4. Тестування Angular-додатку. Тестування асинхронного коду

Для порівняння швидкості тестування виконувалось по 15 експериментів для кожної команди для кожного фреймворка тестування. Умови для тестування в усіх експериментах були однакові (ОС, поточне навантаження на систему та інш.). Результати наведені на рис. 3-4.

Висновки

В результаті порівняння роботи двох фреймворків для тестування, можна зробити висновок, що при використанні Jest тести виконуються в середньому на 60% швидше за рахунок того, що система відстежує зміни файлів та не виконує непотрібних дій, хоча творці Angular все ще радять використовувати саме Jasmine, а не Jest для Unit-тестування. При роботі з Jest результат тестування можна побачити одразу в терміналі, не витрачаючи час на завантаження браузера, на відміну від Jasmine з налаштуваннями за замовчанням. При тестуванні асинхронного коду така ж тенденція (збільшення швидкості тестування на 60%) зберігається, тому Jest відмінно підходить для виконання тестування Angular-проектів, які містять багато асинхронного коду.

Так як ефективність Unit-тестів залежить від швидкості зворотнього зв'язку (fast feedback), як було сказано вище, тобто чим швидше виконується тест на етапі розробки, тим менше часу витрачається на усунення помилок, то, тим самим, ми значно підвищуємо ефективність Unit-тестів та всього проекту цілком.

Література

1. Офіційна документація. <https://v17.angular.io/guide/testing>
2. Vladimir Khorikov "Unit Testing Principles, Practices, and Patterns" / Manning, 2020, 304 p. ISBN: 978-1617296277.
3. Mauricio Aniche "Effective Software Testing: A developer's guide" / Manning, 2022, 328 p. ISBN: 978-1633439931.
4. Vladimir Khorikov "The Art of Unit Testing, Third Edition: with examples in JavaScript 3rd ed. Edition" / Manning, 2024. 288p. ISBN: 978-1617297489
5. Lamis Chebbi "Reactive Patterns with RxJS for Angular", Published by Packt Publishing Ltd, 2022.
6. Sergi Mansilla "Reactive Programming with RxJS". The Pragmatic Programmers, 2015.
7. Adam Freeman, «Pro Angular. Build Powerful and Dynamic Web Apps». Fifth Edition. Publisher: Apress Berkeley, CA. 2022, 880 pages. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8176-5>.
8. Majid Hajian «Progressive Web Apps with Angular» // Publisher: Apress Berkeley, CA. 2019, 380 pages. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4448-7>.

9. Victor Hugo Garcia «Getting Started with Angular. Create and Deploy Angular Applications» // Publisher: Apress Berkeley, CA. 2023, 373 pages. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9206-8>.

References

1. Oficiyna documentaciya. <https://v17.angular.io/guide/testing>
2. Vladimir Khorikov "Unit Testing Principles, Practices, and Patterns" / Manning, 2020, 304 p. ISBN: 978-1617296277.
3. Mauricio Aniche "Effective Software Testing: A developer's guide" / Manning. 2022, 328 p. ISBN: 978-1633439931.
4. Vladimir Khorikov "The Art of Unit Testing, Third Edition: with examples in JavaScript 3rd ed. Edition" / Manning. 2024. 288p. ISBN: 978-1617297489
5. Lamis Chebbi "Reactive Patterns with RxJS for Angular", Published by Packt Publishing Ltd, 2022.
6. Sergi Mansilla "Reactive Programming with RxJS". The Pragmatic Programmers, 2015.
7. Adam Freeman, «Pro Angular. Build Powerful and Dynamic Web Apps». Fifth Edition. Publisher: Apress Berkeley, CA. 2022, 880 pages. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8176-5>.
8. Majid Hajian «Progressive Web Apps with Angular» // Publisher: Apress Berkeley, CA. 2019, 380 pages. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4448-7>.
9. Victor Hugo Garcia «Getting Started with Angular. Create and Deploy Angular Applications» // Publisher: Apress Berkeley, CA. 2023, 373 pages. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9206-8>.

Polupan Yu.V., Rodionov P.Yu., Domin M.K. Comparison of two approaches to Unit testing Angular apps

In the modern world, reactive systems are gaining more and more popularity, and reactivity is based on working with asynchronous data streams. Testing reactive systems is a separate task, in which there are a number of open questions, for example, the extinction of the effectiveness of tests using one or another approach to testing.

For testing Angular applications, two approaches were chosen in the work: 1) using the Jasmine + Karma connection, which is installed by default when creating the application; 2) using Jest.

The article tests an Angular application that has 7 tests, 3 of which are tests of synchronous code blocks and 4 for asynchronous blocks. The tools offered by Angular

out of the box and the Jest framework were used during testing.

To extinction the effectiveness of Unit tests, as a rule, four criteria are used: protection against bugs; resilience to refactoring; fast feedback; maintainability. By comparing different approaches to testing, you can determine how a particular approach affects a specific criterion of Unit-test efficiency, increasing it or, conversely, decreasing it. As is known, today there is no automatic method of measuring efficiency with obtaining values for each criterion, and therefore each test must be evaluated separately. To obtain a value for the criterion "feedback speed" we will use the test execution time, including determining the percentage of code coverage by tests using the coverage command. This criterion shows that the faster the test is executed at the development stage, the less time is spent on eliminating the errors found, thereby significantly increasing the efficiency of Unit-tests.

As a result of comparing the work of two testing frameworks, we can conclude that when using Jest, tests are executed on average 60% faster due to the fact that the system tracks file changes and does not perform unnecessary actions. When testing asynchronous code, the same trend (60% increase in testing speed) persists, so Jest is great for testing Angular projects that contain a lot of asynchronous code.

Since the effectiveness of unit tests depends on fast feedback, by using Jest, we significantly increase the effectiveness of unit testing and the entire project as a whole.

Keywords: Unit testing, Angular application, Jasmine, Karma, Jest, unit tests, --test coverage, Angular CLI, ChromeHeadless, reactivity, synchronous and asynchronous code.

Полупан Юлія Вікторівна – к.т.н., доц., доц., КПП ім. Ігоря Сікорського, факультет інформатики та обчислювальної техніки, кафедра інформатики та програмної інженерії, juliy_polupan@i.ua

Родіонов Павло Юрійович – к.е.н., доц., КПП ім. Ігоря Сікорського, факультет інформатики та обчислювальної техніки, кафедра інформатики та програмної інженерії.

Дьомін Максим Костянтинович – к. т. н., доц., доц. СНУ ім. В. Даля, факультет інформаційних технологій та електроніки, кафедра інформаційних технологій та програмування.

Стаття подана 15.10.2024.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-10-15>

УДК 004.9

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

Ткаченко В. Ю., Хорошун Г.М., Шумова Л.О., Рязанцев О.І.

RESEARCH OF THE OPTIMIZATION METHODS OF THE PARAMETERS OF ELECTRONIC DEVICES FOR BUILDING AN EXPERT SYSTEM

Tkachenko V.Yu., Khoroshun H.M., Shumova L.O., Ryazantsev O.I.

Дана стаття присвячена дослідженню методів оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв для побудови системи експертного проектування. Акцент робиться на використанні інноваційних підходів, таких як математичне моделювання, симуляція та методи штучного інтелекту, включаючи машинне навчання, генетичні алгоритми та нейронні мережі. Використання таких методів дозволяє підвищити точність проектування, автоматизувати складні процеси, скоротити час розробки та підвищити продуктивність. Також розглядається можливість використання гібридних підходів для отримання оптимальних конфігурацій пристроїв, які забезпечують кращу енергоефективність і відповідність вимогам виробництва. Результати дослідження свідчать про перспективність і практичну значущість цих методів, які відкривають нові можливості для проектування електронних систем.

Обговорювані методи математичного моделювання включають SPICE (програма моделювання з акцентом на інтегральні схеми) для аналізу схеми та метод скінчених елементів (FEM) для оцінки теплових і механічних властивостей, особливо актуальних для пристроїв з високою щільністю компонентів. Ці моделі дозволяють розробникам імітувати та перевіряти продуктивність пристрою в різних умовах експлуатації, значно знижуючи потребу у фізичних прототипах.

Дослідження методів оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв з використанням штучного інтелекту та експертних систем показують значний потенціал для підвищення ефективності та якості процесу проектування. Використання математичного моделювання та моделювання дозволяє скоротити час розробки, а впровадження методів машинного навчання та генетичних алгоритмів підвищує точність та швидкість оптимізації. Використання методів проектування з урахуванням

обмежень забезпечує кращу виробничу сумісність, а оптимізація енергоспоживання сприяє ефективності електронних систем в умовах обмежених ресурсів. Подальші дослідження спрямовані на розширення гібридних методів, інтеграцію нових алгоритмів машинного навчання та їх адаптацію до конкретних виробничих вимог, що підвищить гнучкість і універсальність експертних систем проектування.

***Ключові слова.** Експертна система, оптимізація параметрів, штучний інтелект, електронні пристрої, математичне моделювання, генетичні алгоритми, нейронні мережі.*

Вступ. Сучасний етап розвитку електронних технологій супроводжується значним зростанням вимог до функціональних характеристик електронних пристроїв, що застосовуються у широкому спектрі галузей – від телекомунікацій до медичної техніки та автомобільної промисловості[1,2]. У зв'язку зі зростанням складності систем та потребою в підвищенні їхньої надійності, енергоефективності та продуктивності, виникає необхідність у використанні новітніх підходів до проектування, які могли б задовольнити ці вимоги. Традиційні методи розробки, що ґрунтуються на емпіричних підходах і тривалому експериментальному тестуванні, стають недостатньо ефективними через потребу у швидкій адаптації до нових викликів і технологічних змін.

Одним із прогресивних рішень цієї проблеми є інтеграція експертних систем та штучного інтелекту (ШІ) у процес проектування.

Експертні системи дозволяють автоматизувати прийняття рішень, знижуючи потребу у значних людських ресурсах і дозволяючи інженерам зосередитися на оптимізації кінцевих результатів. Застосування методів штучного інтелекту, таких як машинне навчання, генетичні алгоритми та нейронні мережі, дозволяє значно прискорити процеси аналізу, тестування та оптимізації, підвищуючи загальну продуктивність і точність проектування.

Метою даного дослідження є вивчення та розробка методів оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв для побудови ефективної експертної системи проектування, яка забезпечить високий рівень автоматизації і адаптивності до конкретних вимог виробництва. Підвищення точності, енергоефективності та надійності є основними критеріями, що розглядаються у процесі розробки нових електронних пристроїв. Це дослідження спрямоване на демонстрацію того, як впровадження сучасних інженерних методів може вирішити актуальні завдання електронної інженерії, знижуючи витрати, скорочуючи час розробки та підвищуючи якість кінцевого продукту.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації. Оптимізація параметрів і структури електронних пристроїв для побудови експертної системи проектування включає низку актуальних наукових і технічних публікацій, які розглядають використання методів штучного інтелекту, математичного моделювання, а також підходів до автоматизації проектування. Основні джерела поділяються на наукові журнали, монографії, підручники, конференційні матеріали та патенти.

Наукові журнали з інженерних наук, штучного інтелекту та оптимізації [3-5], публікують дослідження про алгоритми оптимізації, зокрема генетичні алгоритми, машинне навчання, методи надійності та тестування. Статті в цих виданнях надають новітні теоретичні та практичні результати, зокрема моделі оптимізації на базі ШІ для проектування електронних систем.

Комплексний огляд методів штучного інтелекту та експертних систем наданий в монографіях та підручниках [6,7]. Ці роботи висвітлюють загальні принципи розробки експертних систем, підходи до автоматизації процесів проектування, а також надають методичну основу для

використання інструментів оптимізації, таких як нейронні мережі, для удосконалення структури електронних пристроїв.

Провідні міжнародні конференції з електроніки та ШІ [8,9], включають тематичні дослідження з автоматизації проектування, нових алгоритмів оптимізації та методів моделювання. Зазвичай ці матеріали містять найсучасніші експериментальні результати і застосування гібридних методів для вдосконалення електронних пристроїв.

Патентні бази даних, такі як Google Patents, IEEE Xplore і національні патентні відомства, містять опис нових технічних рішень та алгоритмів, застосовуваних у системах проектування та оптимізації. Багато патентів присвячено використанню ШІ для автоматизації проектування електронних пристроїв, що підтверджує комерційну актуальність тематики та її застосування на практиці.

Окрім академічних джерел, на платформі arXiv.org публікуються препринти статей, які можуть стати основою для подальших досліджень. Це дозволяє дослідникам швидко дізнатися про новітні розробки. Також відкриті бази даних, наприклад Kaggle, надають доступ до великих масивів даних, які можуть бути використані для навчання моделей ШІ, що підходить для вивчення та впровадження нових оптимізаційних алгоритмів.

Загалом, сучасні джерела інформації забезпечують комплексний підхід до дослідження методів оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв, що дозволяє інтегрувати новітні наукові досягнення в практичне проектування ефективних експертних систем.

Постановка проблеми. Оптимізація параметрів і структури електронних пристроїв є критичною для підвищення продуктивності, надійності та енергоефективності систем. Традиційні методи проектування часто не можуть забезпечити ефективні рішення в умовах складних параметричних обмежень та високої щільності компонентів. До основних викликів належить потреба враховувати великий обсяг параметрів, включаючи електричні, теплові та механічні характеристики, що потребує багатоетапного аналізу й оцінки. Також існує необхідність розробки універсальних експертних систем, здатних адаптуватися до специфічних вимог різних

галузей, таких як телекомунікації, охорона здоров'я та автомобільна промисловість.

Виклад основного матеріалу

1. Математичне моделювання та симуляція

Математичне моделювання є ключовим етапом в оптимізації електронних пристроїв, оскільки дозволяє провести детальний аналіз їхніх параметрів на основі обчислювальних методів без створення фізичного прототипу. Одним із найпоширеніших інструментів для цього є SPICE-моделювання (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)[10], яке дозволяє імітувати роботу як аналогових, так і цифрових схем. Це забезпечує можливість оцінки електричних характеристик пристроїв, таких як напруга, струм, та поведінка компонентів у різних умовах роботи.

Метод кінцевих елементів (FEM)[11] є ефективним для аналізу фізичних процесів в електронних пристроях. Він дозволяє розглядати теплові та механічні процеси, що є критичним для систем з високою щільністю компонентів, де нагрівання може призвести до зниження продуктивності або навіть відмови. Використання FEM у поєднанні з електромагнітним моделюванням дозволяє досягти більш точного аналізу пристрою, що є основою для ефективного проектування та забезпечення його стабільності на всіх етапах життєвого циклу.

2. Методи штучного інтелекту

Сучасні методи штучного інтелекту забезпечують автоматизацію та прискорення процесів проектування, а також підвищують точність отриманих результатів.

- *Машинне навчання* є основним інструментом для аналізу великих масивів даних, що стосуються характеристик і результатів тестування електронних пристроїв. Використання алгоритмів машинного навчання, таких як класифікація та регресія, дозволяє виявляти приховані закономірності у взаємозв'язках параметрів, що допомагає підвищити точність прогнозування.

- *Генетичні алгоритми* використовуються для оптимізації параметрів електронних пристроїв на основі принципів еволюційного відбору. Цей підхід дозволяє "еволюціонувати" параметри, базуючись на заданих критеріях ефективності, і знаходити оптимальні рішення

навіть у складних і нелінійних просторах параметрів.

- *Нейронні мережі* є корисними для моделювання складних нелінійних залежностей між параметрами і характеристиками електронних пристроїв. Завдяки здатності до адаптації та самонавчання, нейронні мережі можуть забезпечувати високоточне прогнозування оптимальних параметрів, знижуючи потребу у ручному налаштуванні та скорочуючи час розробки.

- *Методи машинного бачення* для підвищення якості та надійності електронних пристроїв використовуються методи машинного бачення, які дозволяють автоматично виявляти дефекти на виробничих етапах, аналізуючи фото- і відеозображення компонентів. Машинне бачення дозволяє виявити найменші дефекти, такі як тріщини або неправильне з'єднання, забезпечуючи високий рівень якості продуктів і знижуючи потребу у ручному контролі.

3. Гібридні підходи до оптимізації

Інтеграція різних методів штучного інтелекту створює нові можливості для досягнення високої точності і швидкості в процесі оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв. Наприклад, поєднання генетичних алгоритмів з нейронними мережами дозволяє використовувати силу еволюційного пошуку для визначення оптимальних параметрів, у той час як нейронні мережі допомагають моделювати складні залежності між параметрами. Такі гібридні системи підвищують точність прогнозування і зменшують обчислювальну складність, забезпечуючи швидке та ефективне проектування.

Ще один перспективний гібридний підхід полягає у застосуванні машинного навчання для покращення результатів генетичних алгоритмів. Це дозволяє автоматично коригувати параметри моделі на основі великого обсягу даних, знижуючи ризик людських помилок і забезпечуючи оптимальні конфігурації для різних застосувань. Такі гібридні методи особливо корисні для розробки систем, що працюють у жорстких умовах або мають високі вимоги до надійності і енергоефективності.

4. Проектування з урахуванням обмежень та енергетична оптимізація

Методи проектування з урахуванням обмежень, такі як DFM (Design for Manufacturability) та DFT (Design for Testability)[12], є важливими для

забезпечення надійності та виробничої сумісності електронних пристроїв. DFM включає в себе врахування обмежень виробництва, що знижує вартість виготовлення і підвищує ефективність виробничих процесів. DFT, у свою чергу, полегшує тестування на рівні схем, забезпечуючи легку діагностику і зменшення кількості дефектів.

Енергетична оптимізація набуває особливого значення в умовах, коли підвищені вимоги до ефективності та мінімізації енергоспоживання стають критичними, наприклад, для портативних пристроїв і систем Інтернету речей (IoT)[13]. Методи енергетичної оптимізації спрямовані на зменшення споживання електроенергії без втрати продуктивності, що дозволяє подовжити час автономної роботи пристроїв і знизити витрати на живлення.

5. Методи теплового моделювання

У системах з високою щільністю компонентів теплове моделювання є важливим для уникнення перегріву і забезпечення довготривалої працездатності. Методи теплового моделювання, такі як використання теплових карт і аналізу конвекції, дозволяють визначити розподіл температури в пристрої. Це критично важливо для уникнення деградації компонентів і забезпечення їх стабільної роботи протягом усього терміну експлуатації.

6. Оптимізація розміщення та трасування на друкованих платах

Для проектування друкованих плат (PCB) широко використовуються інструменти автоматизованого проектування (CAD), що дозволяють оптимізувати розміщення компонентів і трасування провідників. Ефективне розміщення і трасування мінімізують паразитні індуктивності та ємності, що покращує електричні характеристики системи і дозволяє підвищити її стабільність і продуктивність. Автоматизоване проектування трас дозволяє вирішувати завдання з розміщення великої кількості компонентів на обмеженій площі, що особливо актуально для мініатюрних пристроїв та систем з високою функціональною щільністю.

7. **Моделі Монте-Карло.** Метод Монте-Карло активно використовується для оцінки надійності та аналізу ризиків електронних пристроїв у ситуаціях з високим ступенем невизначеності. Моделі Монте-Карло дозволяють досліджувати варіанти розвитку ситуацій за

допомогою випадкових симуляцій і визначати найбільш стійкі конфігурації пристроїв до можливих збоїв. Це є корисним підходом у критичних сферах, таких як аерокосмічна і медична промисловість, де надійність є вирішальною характеристикою.

Таким чином, сучасні методи оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв охоплюють широкий спектр підходів, які забезпечують покращення продуктивності, надійності та енергоефективності. Використання цих методів у рамках експертних систем проектування значно спрощує процес розробки та скорочує час виходу пристроїв на ринок.

Висновки. Дослідження методів оптимізації параметрів і структури електронних пристроїв із використанням штучного інтелекту та експертних систем показує значний потенціал для підвищення ефективності та якості процесу проектування. Застосування математичного моделювання та симуляцій дозволяє скоротити час на розробку, а впровадження методів машинного навчання і генетичних алгоритмів підвищує точність та швидкість оптимізації. Використання методів проектування з урахуванням обмежень забезпечує кращу виробничу сумісність, а енергетична оптимізація сприяє ефективності роботи електронних систем в умовах обмежених ресурсів. Подальші дослідження мають на меті розширення гібридних методів, інтеграцію нових алгоритмів машинного навчання і їх адаптацію до специфічних вимог виробництва, що підвищить гнучкість і універсальність експертних систем проектування.

Л і т е р а т у р а

1. Ляшук О.Л., Плекан У.М., Цюнь О.П., Гевко Б.Р., Розвиток технологій гібридних силових установок автомобілів//Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2023р. м. Тернопіль. 139-146.
2. Barrett MA, Humblet O, Marcus JE, et al. Effect of a mobile health, sensor-driven asthma management platform on asthma control. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2017.
3. [IEEE Transactions on Industrial Electronics \(https://ieeexplore.ieee.org\)](https://ieeexplore.ieee.org)
4. [IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems \(https://ieeexplore.ieee.org\)](https://ieeexplore.ieee.org)
5. [Journal of Electronic Testing \(https://link.springer.com\)](https://link.springer.com)

6. Damar, M., Özen, A., Çakmak, Ü. E., Özoğuz, E., et al. (2024). Super AI, Generative AI, Narrow AI and Chatbots: An Assessment of Artificial Intelligence Technologies for The Public Sector and Public Administration. *Journal of AI*, 8(1), 83-106. (<https://doi.org/10.61969/jai.1512906>)
7. Стецюк, В.З., Бабінцева Л.Ю., Чиж Ю.М., Фіногенов О.Д., Самоненко Н.В. "Експертна система для діагностування генетичних відхилень". *Medical Informatics and Engineering*, № 3 (2021): 78–83.
8. Tkachenko V.Yu., Ryazantsev O.I., Modestova T.V.. Artificial intelligence in the study of methods for optimizing the parameters and structure of electronic devices for building an expert design system//Матеріали XXVII міжн. наук.-практ. конф. Технологія-2024. 24 травня. 2024 р., м. Київ. 82-83.
9. [IEEE Industrial Electronics and applications Conference \(IFACon 2024\) 4-5 November 2024. Kuala Lumpur Malaysia \(https://ieeieacon.org\)](https://ieeieacon.org)
10. Arash Qodratnama, Farshad Khunjush, Mohsen Raji. A methodology for the SPICE-Compatible modelling of metal-semiconductor-metal photodetectors for nanophotonic interconnects application. *Microelectronics journal*. Volume 115, September 2021 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026269221001774>)
11. М.М. Масюк. Застосування методу кінцевих елементів для проведення розрахунків// Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 25-26 листопада 2020.
12. [Importance of DFM, DFT, and DFA in Product Design.\(https://volansys.medium.com\)](https://volansys.medium.com)
13. Kovar D. Internet of Things Applications: Introduction to Internet of Things: Industrial Internet of Things. Independently Published, 2021.
- Administration. *Journal of AI*, 8(1), 83-106. (<https://doi.org/10.61969/jai.1512906>)
7. Stetsyuk, V.Z., Babintseva, L.Yu., Chizh, Yu.M., Finogenov, O.D., and Samonenko, N.V. "Expert system for diagnosing genetic abnormalities". *Medical Informatics and Engineering*, No. 3 (2021): 78–83.
8. Tkachenko V.Yu., Ryazantsev O.I., Modestova T.V.. Artificial intelligence in the study of methods for optimizing the parameters and structure of electronic devices for building an expert design system//Materials of the XXVII international. science and practice conf. Technology-2024. May 24. 2024, Kyiv. 82-83.
9. [IEEE Industrial Electronics and applications Conference \(IFACon 2024\) 4-5 November 2024. Kuala Lumpur Malaysia \(https://ieeieacon.org\)](https://ieeieacon.org)
10. Arash Qodratnama, Farshad Khunjush, Mohsen Raji. A methodology for the SPICE-Compatible modeling of metal-semiconductor-metal photodetectors for nanophotonic interconnects application. *Microelectronics journal*. Volume 115, September 2021 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026269221001774>)
11. M.M. Masyuk Application of the finite element method for calculations// Materials of the IX International scientific and technical conference of young scientists and students. Actual tasks of modern technologies - Ternopil, November 25-26, 2020.
12. [Importance of DFM, DFT, and DFA in Product Design.\(https://volansys.medium.com\)](https://volansys.medium.com)
13. Kovar D. Internet of Things Applications: Introduction to Internet of Things: Industrial Internet of Things. Independently Published, 2021.

References

1. Lyashuk O.L., Plekan U.M., Tsyon O.P., Gevko B.R., Development of technologies of hybrid power plants of cars//Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. 2023 Ternopil city. 139-146.
 2. Barrett MA, Humblet O, Marcus JE, et al. Effect of a mobile health, sensor-driven asthma management platform on asthma control. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2017.
 3. [IEEE Transactions on Industrial Electronics \(https://ieeexplore.ieee.org\)](https://ieeexplore.ieee.org)
 4. [IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems \(https://ieeexplore.ieee.org\)](https://ieeexplore.ieee.org)
 5. [Journal of Electronic Testing \(https://link.springer.com\)](https://link.springer.com)
 6. Damar, M., Özen, A., Çakmak, Ü. E., Özoğuz, E., et al. (2024). Super AI, Generative AI, Narrow AI and Chatbots: An Assessment of Artificial Intelligence Technologies for The Public Sector and Public Administration. *Journal of AI*, 8(1), 83-106. (<https://doi.org/10.61969/jai.1512906>)
 7. Stetsyuk, V.Z., Babintseva, L.Yu., Chizh, Yu.M., Finogenov, O.D., and Samonenko, N.V. "Expert system for diagnosing genetic abnormalities". *Medical Informatics and Engineering*, No. 3 (2021): 78–83.
 8. Tkachenko V.Yu., Ryazantsev O.I., Modestova T.V.. Artificial intelligence in the study of methods for optimizing the parameters and structure of electronic devices for building an expert design system//Materials of the XXVII international. science and practice conf. Technology-2024. May 24. 2024, Kyiv. 82-83.
 9. [IEEE Industrial Electronics and applications Conference \(IFACon 2024\) 4-5 November 2024. Kuala Lumpur Malaysia \(https://ieeieacon.org\)](https://ieeieacon.org)
 10. Arash Qodratnama, Farshad Khunjush, Mohsen Raji. A methodology for the SPICE-Compatible modeling of metal-semiconductor-metal photodetectors for nanophotonic interconnects application. *Microelectronics journal*. Volume 115, September 2021 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026269221001774>)
 11. M.M. Masyuk Application of the finite element method for calculations// Materials of the IX International scientific and technical conference of young scientists and students. Actual tasks of modern technologies - Ternopil, November 25-26, 2020.
 12. [Importance of DFM, DFT, and DFA in Product Design.\(https://volansys.medium.com\)](https://volansys.medium.com)
 13. Kovar D. Internet of Things Applications: Introduction to Internet of Things: Industrial Internet of Things. Independently Published, 2021.
- Tkachenko V.Yu., Khoroshun H.M., Shumova L.O., Ryazantsev O.I. Research of the optimization methods of the parameters of electronic devices for building an expert system**
- This article is devoted to the study of methods for optimizing the parameters and structure of electronic devices for building an expert design system. Emphasis is placed on the use of innovative approaches such as mathematical modeling, simulation, and artificial intelligence techniques, including machine learning, genetic algorithms, and neural networks. The use of such methods helps to increase design accuracy, automate complex processes, reduce development time, and improve productivity. The possibility of using hybrid approaches to obtain optimal configurations of devices that provide better energy efficiency and compliance with production requirements is also considered. The results of the study testify to the perspective and practical significance of these methods, which open up new opportunities for the engineering of electronic systems.*
- The mathematical modeling techniques discussed include SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) for circuit analysis and Finite Element Method (FEM) for assessing thermal and mechanical properties, especially relevant in devices with high component density. These models allow designers to simulate*

and validate device performance under varied operational conditions, significantly lowering the need for physical prototypes.

Research on methods of optimizing the parameters and structure of electronic devices using artificial intelligence and expert systems shows significant potential for increasing the efficiency and quality of the design process. The use of mathematical modeling and simulations allows to reduce development time, and the introduction of machine learning methods and genetic algorithms increases the accuracy and speed of optimization. The use of design methods taking into account the constraints ensures better production compatibility, and energy optimization contributes to the efficiency of electronic systems in conditions of limited resources. Further research is aimed at expanding hybrid methods, integrating new machine learning algorithms and adapting them to specific production requirements, which will increase the flexibility and versatility of expert design systems.

Keywords. Expert system, parameter optimization, artificial intelligence, electronic devices, mathematical modeling, genetic algorithms, neural networks.

Ткаченко Владислав Юрійович – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, asp-122-23-3@snu.edu.ua

Хорошун Ганна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії, доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, horoshun@snu.edu.ua

Шумова Лариса Олександрівна – доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, shumova@ukr.net

Рязанцев Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, a_ryazantsev@snu.edu.ua

Стаття подана 09.10.2024.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-16-23>

UDC 621.9.07

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF METHODS FOR EXPANDING THICK-WALLED TUBES INTO TUBE SHEETS OF HEAT EXCHANGERS

Stovpnyk O.V., Kyrylyuk V.O.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ РОЗВАЛЬЦЮВАННЯ ТОВСТОСТІННИХ ТРУБ В ТРУБНІЙ РЕШІТЦІ ТЕПЛОБІМННИКІВ

Стовпник О.В., Кирилюк В.О.

The present work is devoted to the experimental study of methods of reaming thick-walled tubes in thick tube grids used in modern heat exchangers. The efficiency of industrial systems largely depends on the reliability of the equipment, the main element of which are heat exchangers. Recently, the use of thick-walled tubes is gaining popularity, which provides higher indicators of strength and tightness of connections. However, the use of such pipes requires the use of methods of pre-deformation of the pipe ends at an angle that corresponds to the conical surface of the holes in the pipe grid. This provides a tighter joint prior to subsequent welding and reaming over the full thickness of the lattice.

The main objective of the work was to comparatively analyze stepwise and continuous reaming methods, which are widely used in industry. These methods differ significantly in their productivity, quality and time consumption. The evaluation of these parameters allowed to identify advantages and disadvantages of each of them, which became the basis for the subsequent selection of the optimal method depending on the operating conditions. During the study, special attention was paid to key indicators such as joint strength and tightness, as well as the condition of the surfaces of the flared pipe sections. The research was conducted on the basis of the production unit of Yuzhenergo LLC, Dnipro city.

Experimental data were obtained on the basis of studies of pipe joints made of A335 Grade P12 steel with different parameters of diameters and wall thicknesses. In the process of work also quantitative estimation of time spent on execution of reaming operations by each method was carried out. The results of the research have shown that band-screw rolling is a promising direction for fixing small diameter pipes in conditions where high strength of joints is required at minimum time expenditures.

The results considered in the work can be useful for improvement of technological processes of production and operation of heat-exchange apparatuses. Application of the obtained data allows to increase not only reliability

and durability of the equipment, but also its economic efficiency, which is especially important in the conditions of modern industrial requirements.

Keywords: heat-exchange, thick-walled tubes, step-by-step reaming, continuous reaming, evaluation, tightness of joints, tube grids.

Introduction. In the conditions of modern industrial enterprises, heat exchange apparatuses represent one of the key components of technological processes [1]. Their reliability determines the efficiency of heat exchange, safety of the production process and durability of the equipment [2]. One of the most important elements of such apparatuses are pipe grids, which combine a large number of pipes, providing the maximum heat exchange area [3]. The most common material for tubes is alloy steels such as A335 Grade P12 steel, which provide high corrosion resistance and mechanical strength [4].

Due to the increased demands on equipment performance and durability, designers are increasingly faced with the need to use thick-walled tubes in tube array designs [5]. This is due to the fact that such tubes have a higher resistance to internal pressure, which allows them to retain their operational properties under more severe operating conditions. At the same time, the use of thick-walled tubes requires the use of specialized fastening methods, which has become the main problem in the production of modern heat exchangers.

One of the most common methods of securing tubes in tube arrays is flaring. Flaring is a process of plastic deformation of pipe ends in order to tightly connect them to the holes in the grid. This method provides a high degree of tightness of the joint,

which is critical for equipment operating under high pressure [6].

In practice, various methods of reaming are used, among which step-by-step and continuous reaming occupy a special place. Step-by-step reaming is performed using a set of rollers, each of which has a larger diameter than the previous one. The pipe is reamed sequentially with each roll, starting with the smaller diameter [7]. This method has proven to be one of the most reliable, but its main disadvantage is its high labor intensity and considerable time consumption.

The aim of this study is to comparatively evaluate two methods of reaming: stepwise and continuous. The objective is not only to evaluate the strength and tightness of the joints, but also to consider the time required to perform each method and to identify their advantages and disadvantages depending on the operating conditions.

Materials and experimental methods. The research was carried out on the basis of the production unit of the engineering company Yuzhenergo LLC, Dnipro city, Ukraine.

In the course of the study were used pipes from alloy steel A335 Grade P12, which are widely used in the manufacture of heat exchangers and other high-temperature apparatus. This material was chosen because of its high resistance to corrosion when exposed to hot media, as well as its ability to withstand significant mechanical loads during operation. The pipes had a nominal outside diameter of 25 mm and a wall thickness of 4 mm. Pipes with different characteristics in terms of the ratio of inner and outer diameters were selected for the study, which allowed us to evaluate the influence of these parameters on the reaming processes and the subsequent quality of joints.

A516 Grade 55 steel plates with high strength and impact toughness were used to fabricate the pipe grids. These plates are used in high-pressure applications and in contact with aggressive media, making them the optimal choice for heat exchangers. The plates had a thickness of 185 mm and a hole diameter of 25.4 mm to ensure a tight connection to the pipes.

The flattening process was performed using PowerMaster's P-1000 (Fig. 1), 800 (Fig. 2) and V Series (Fig. 3) specialized flattening tools, which are widely used for mechanically securing pipes in heat exchangers. The 800 and 1000 Series extended adjustable rollers were used for stepwise reaming, providing control over roller penetration depth and contact pressure. Continuous reaming was performed using V Series screw rollers, which allow

the entire length of the pipe to be deformed in a single pass.



Fig.1. Rollers Series P-1000 powermaster [8]



Fig.2. Rollers Series 800 powermaster [9]



Fig.3. Rollers Series V powermaster [10]

An MPG-3 roll drive equipped with torque control system was used to drive the rolls. This equipment allows precise control of the reaming process, preventing the redistribution of stresses in the pipe metal and ensuring uniform distribution of contact pressures over the entire joint surface.

Mineral oil was used for cooling and lubrication during the reaming process, which was fed into the contact zone between the rollers and the pipe, preventing tool overheating and reducing friction.

Two types of specimens were prepared for the study: multi-pipe and single-pipe specimens.

Multi-pipe specimens - each specimen contained 18 pipes fixed in a 185 mm thick pipe grid (Fig. 4). These specimens were used to evaluate the strength of the joints by means of press-out tests.

Single-pipe specimens - the specimens consisted of a single pipe fixed in a pipe grid (Fig. 5). This type of specimens was used to evaluate the tightness of the joints.

Technological process of reaming. Step-by-step reaming was carried out in several stages. Five separate passes of the rolling tool were used for each pipe. In the process of the research the rollers of 800 and 1000 series were used (Fig. 1, 2) The first pass of the rollers of 1000 deformed the pipe near its end, and each subsequent pass of the rollers of 800 series moved along the pipe, deforming it at the next section. In this way, a consistent uniform deformation

of the pipe along the entire length of its contact with the pipe grid was ensured. This method allows for precise control of metal deformation, preventing its destruction and ensuring uniform distribution of contact pressures.

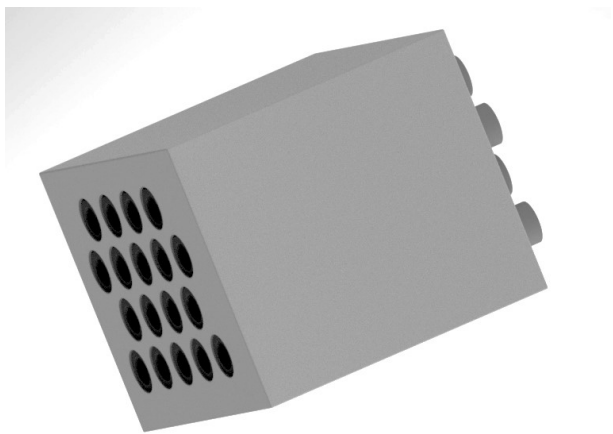


Fig. 4. Multi-pipe specimen

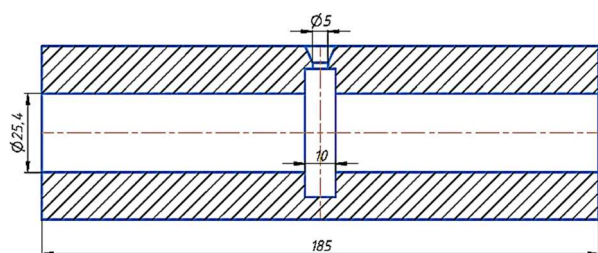


Fig. 5. Sketch of the pipe grid for a single-pipe specimen

Continuous reaming can be accomplished either in a single pass or by using tapered rollers that deform the pipe gradually as the tool advances. The V Series helical rollers (Fig. 3) deformed the entire length of the pipe simultaneously, which significantly reduced the time required to complete the operation. However, this method required more precise adjustment of the equipment, as the slightest errors in adjustment could result in uneven deformation and reduced joint tightness.

For each pipe, the time required to perform reaming was recorded, including equipment set-up, pipe installation, and execution of the operation. Time for tool preparation and lubrication was recorded separately, allowing for an accurate assessment of the performance of each method.

Strength Testing. Strength tests were performed on a Holzmann WP 100H hydraulic press (Fig. 6), which develops a force of up to 100 kN. M20 thread

was cut into each specimen inside the protruding pipe ends to install plugs. Strength tests consisted of gradually increasing the axial force on the pipe until it was pressed out of the pipe grid. This made it possible to determine the maximum force at which the joint failed.



Fig. 6. Holzmann hydraulic press WP 100H

Tightness tests. Tightness tests were carried out using a hydraulic press with pressures up to 160 MPa. In each sample, the inner surface of the pipe had an annular groove into which water was applied. The pressure was increased step by step, with a 5-minute dwell time at each stage. The moment of depressurization was recorded by the appearance of moisture on the surface of the sample, as well as by the change in pressure on the manometer. These data allowed us to evaluate the tightness of the joints for each method of reaming.

Results and discussion. The following data were obtained from the results of the strength tests for both groups of specimens (stepwise and continuous reaming) (Table 1).

The average press-out force values for the stepwise method were 67 kN with a variation of ± 4 kN and for the continuous method were 69 kN with a variation of ± 6 kN, indicating that the stepwise reaming method is more stable. It can also be said that, on average, continuous reaming achieves slightly higher joint strengths, but the variation was greater for this method.

Table 1

Pressing forces from pipe grids

Stepwise reaming				Continuous reaming			
No.	Force pressing force, kN	No.	Force pressing force, kN	No.	Force pressing force, kN	No.	Force pressing force, kN
1	80,5	16	57,0	1	74,5	16	98,0
2	72,0	17	63,0	2	73,5	17	78,5
3	92,0	18	63,5	3	65,5	18	76,0
4	95,5	19	54,0	4	60,5	19	72,5
5	71,5	20	70,0	5	48,5	20	59,0
6	52,0	21	51,0	6	79,0	21	85,2
7	41,5	22	60,0	7	79,5	22	39,0
8	70,0	23	60,5	8	64,5	23	51,5
9	66,5	24	63,0	9	74,2	24	76,0
10	51,5	25	54,0	10	48,0	25	58,5
11	61,0	26	87,5	11	73,5	26	53,5
12	64,5	27	69,5	12	66,4	27	67,0
13	44,0	28	70,0	13	40,0	28	66,5
14	51,0	29	39,0	14	53,5	29	59,0
15	55,0	30	53,5	15	22,5	30	70,0

Table 2

Depressurization pressures of joint samples

Stepwise reaming				Continuous reaming			
No.	Depressurization pressure, MPa	No.	Depressurization pressure, MPa	No.	Depressurization pressure, MPa	No.	Depressurization pressure, MPa
1	55	11	51	1	43	11	54
2	62.7	12	48	2	52	12	55
3	48	13	53	3	53	13	41
4	48	14	57	4	49	14	49
5	60	15	54	5	47	15	37
6	52	16	47	6	49	16	50.9
7	54	17	45	7	51	17	52
8	49	18	30	8	55	18	49
9	55	19	47	9	44	19	48
10	59	20	55	10	49	20	47

For incremental reaming, the press-out forces ranged from 39 kN to 95.5 kN, which shows the stability of this method. The minimum values remain quite high, indicating a more predictable behavior of the joints when using the stepwise technique. This is also confirmed by the small deviations from the median (62.0 kN), which emphasizes the uniformity of the force distribution.

The range of values was wider for continuous reaming, from 22.5 kN to 100 kN. This variation can be explained by the fact that the continuous method requires more precise equipment setup and

is subject to more factors that can affect the results. The lower values of press-out forces in some cases may be due to non-uniform deformation of the pipe, which results in lower joint strength.

The coefficient of variation for step-by-step reaming was 10%, indicating a high degree of predictability and stability of the method. For the continuous method, this coefficient was higher at 15%, indicating a large variation in the extrusion forces. This can be explained by the fact that with continuous reaming it is more difficult to control the

uniformity of deformation of the pipe along its entire length.

Tightness tests (Table 2) showed that stepwise reaming provides higher average depressurization pressures than continuous reaming. The average pressure value for the stepwise method was 51.5 MPa, with a deviation of ± 3 MPa, whereas for the continuous method it was 49.0 MPa, with a higher deviation of ± 5 MPa. This indicates that stepwise reaming is better suited for applications where leak tightness is critical and is more predictable in its results.

The minimum depressurization pressure values for the step-by-step method were 30.0 MPa, which is also higher than the minimum values for the continuous method (37.0 MPa). The maximum pressure values for both methods were quite close: 62.7 MPa for the stepwise method and 55.0 MPa for the continuous method. These data indicate that both methods can provide high leak tightness values, however, stepwise reaming is more predictable and reliable in this respect.

In order to identify the existence of a significant difference between the presented methods, we will perform a mathematical treatment of the data. The analysis model will present the dependence of depressurization pressure of joint samples at two different methods of pipe reaming: step-by-step and continuous methods. Let's calculate the average values of depressurization pressures for each group and determine.

For each reaming method it is necessary to calculate the average values of depressurization pressures:

Average value for the step-by-step reaming process $P_{av.st}$:

$$P_{av.st} = \frac{\sum P_{st}}{n_{st}}, \quad (1)$$

where P_{st} - is the pressure for each sample, $n_{st} = 20$ - number of samples.

Average value for continuous reaming method $P_{av.con}$:

$$P_{av.con} = \frac{\sum P_{con}}{n_{con}}, \quad (2)$$

where P_{con} - is the pressure for each sample, $n_{con} = 20$.

To analyses the quality of the two methods, we also calculate the variance and standard deviation.

Dispersion for the stepwise method D_{st} :

$$D_{st} = \frac{1}{n_{st} - 1} \sum (P_{st} - P_{av.st})^2. \quad (3)$$

Dispersion for the continuous method D_{con} :

$$D_{con} = \frac{1}{n_{con} - 1} \sum (P_{con} - P_{av.con})^2. \quad (4)$$

To test whether there is a significant difference between the two methods of unmolding, we apply Student's criterion (t-test) for two independent samples:

$$t = \frac{P_{av.st} - P_{av.con}}{\sqrt{\frac{D_{st}}{n_{st}} + \frac{D_{con}}{n_{con}}}}, \quad (5)$$

where t - statistic, $P_{av.st}$ and $P_{av.con}$ - are mean values, D_{st} and D_{con} - dispersions, n_{st} and n_{con} - number of samples.

The results of the calculations are presented in table 3.

Table 3

Average depressurization pressures of each group

Average value of depressurization pressure, MPa - for the step-by-step method	51.49
- continuous method	48.75
Dispersion: - for the step-by-step method	48.64
- continuous method	21.88
Importance of statistics, t	1.46

Critical t value for significance level $\alpha=0.05$ amounts to 2.02.

Since the calculated t-statistic of 1.46 is less than the critical value, the difference between the mean depressurization pressures for the two reaming methods is not statistically significant at a significance level of 0.05.

In Fig. 7 and Fig. 8, we present the obtained data, for a better understanding of the difference between the methods.

Fig. 7 shows a histogram of the depressurization pressure distribution: The blue histogram shows the pressure distribution for stepwise reaming. The orange one is for continuous depressurization. It can be seen that the pressure distributions for both methods have similar trends, although the stepwise flattening has more emissions, which correlates with the previously described processes.

Fig. 8 shows the Scatter Diagram: It shows the medians, quartiles and outliers for each method. It can be seen that the medians of both methods are close, but the stepwise unmolding shows a larger variation in pressures. These visualizations confirm

the results of the statistical analysis: there are no significant differences between the methods.

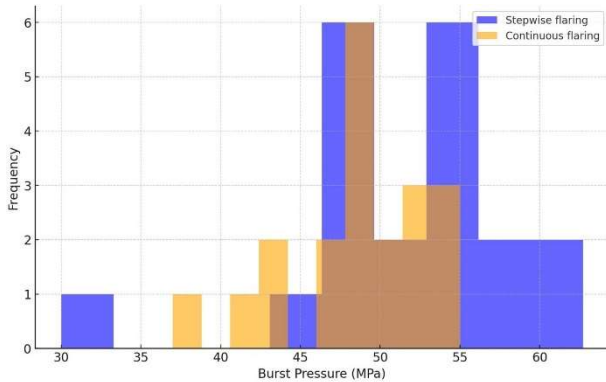


Fig. 7. Distribution of burst pressures by flaring methods

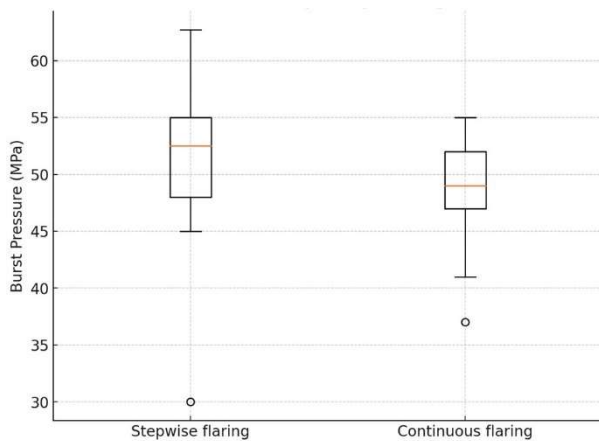


Fig. 8. burst pressure boxplot by flaring methods

The calculated data and plots showed that there is not enough evidence to claim that one method is better than the other based on these data.

Time cost analysis. In terms of time costs (Table 4), continuous reaming has a clear advantage over step reaming. On average, it took 131 minutes to perform a single reaming operation using the continuous method for 18 pipes, while step reaming took 251 minutes (Fig. 9). This can be explained by the fact that step-by-step reaming requires several passes of the tool on each pipe, while continuous reaming performs the entire operation in one pass.

Thus, continuous reaming is more productive in mass production applications where time constraints are critical. However, for joints when leak tightness is critical (e.g. in systems with high pressures or aggressive media), the step-by-step method remains preferable.

Table 4

Time costs for each method

Method, time (minutes)							
Continuous				Stepwise			
1	142.64	11	126.44	1	211.70	11	252.32
2	129.00	12	139.54	2	259.80	12	255.67
3	134.78	13	132.61	3	262.96	13	236.68
4	147.40	14	126.21	4	238.86	14	220.28
5	143.67	15	129.43	5	284.04	15	244.78
6	115.22	16	128.33	6	228.18	16	252.34
7	134.50	17	139.94	7	250.68	17	268.45
8	123.48	18	122.94	8	247.19	18	268.03
9	123.96	19	128.13	9	272.99	19	244.19
10	129.10	20	116.45	10	272.04	20	245.46
Average value							
130.69				250.83			

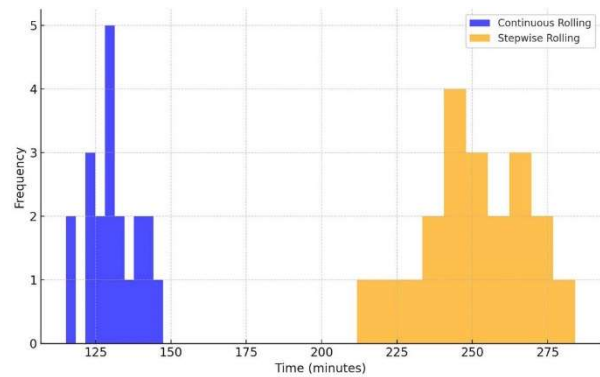


Fig 9. Comparison of time costs between rolling methods

Effect of reaming methods on the surface condition of the pipes. Visual inspection of the samples revealed that the stepwise reaming resulted in a slight delamination of the metal layers on the inner surface of the pipes (“flaking”), which may be due to metal riveting during repeated deformation. No such defects were found in the samples rolled by the continuous method, indicating that taper rolling causes a more uniform and gentle deformation, preventing excessive metal riveting.

Nevertheless, this tinning phenomenon is unlikely to have a significant effect on joint strength, but may be critical for equipment operating in high temperature or corrosive environments where defects on the internal surface can accelerate corrosion.

Conclusions. The results of the conducted research allow us to draw the following conclusions:

1 Both methods of reaming - step-by-step and continuous - provide high strength of pipe joints with the pipe grid. The average values of press-out forces for both methods were similar (62.8 kN for stepwise and 64.5 kN for continuous reaming). However, the step-by-step method showed greater

stability and predictability in terms of extrusion forces, making it preferable for use in applications where precise performance is critical.

Continuous reaming, although showing slightly higher maximum force values, showed a wider variation in the data. This may be a result of the difficulty in controlling the deformation of the pipe while simultaneously reaming the entire length of the pipe, as well as the heterogeneity of the pipe material. Consequently, the continuous method requires more fine-tuning and skilled equipment maintenance to minimize the risk of weak joints.

2 Step-by-step reaming showed the best results in terms of tightness, providing an average depressurization pressure of 51.5 MPa. This is especially important for equipment operating at high pressures or with aggressive media where leaks can cause significant losses or accidents. The average value for the continuous method was 49.0 MPa, which is also a good result, but inferior to that of step-by-step reaming.

For applications where absolute tightness is required, such as heat exchangers used in the chemical or petrochemical industries, step reaming is the preferred method. However, if the requirements for tightness are not as high, such as in systems with less aggressive media or at low operating pressures, continuous reaming may be a more cost-effective alternative due to the lower time required.

3 Continuous reaming is far superior to step reaming in terms of speed. The turnaround time for a single reaming operation using the continuous method averaged 130.69 minutes for 15 pipes, while stepwise reaming required 250.83 minutes. This makes the continuous method preferable for mass production where time resources are critical.

However, it must be taken into account that the high productivity of the continuous method is accompanied by higher demands on the accuracy of equipment setup and process control. In environments where even small defects in connections can lead to accidents or damage, the reduction in lead time may not justify the risks.

4 Visual inspection of the samples showed that step reaming causes tinning of the inner surface of the pipe, which is due to the riveting of the metal during repeated deformation. This phenomenon, although it does not significantly affect the strength of the joints, can be critical in conditions of operation at high temperatures or under the influence of aggressive media. Under such conditions, defects on the inner surface of the pipe can accelerate corrosion damage of the metal.

Continuous reaming does not cause such defects, making it preferable for use in applications

where minimizing damage to the inside of the pipe is required.

5 For high-volume production facilities, continuous reaming can significantly reduce the time required to complete operations. However, in applications where there may be high losses due to poor quality connections (e.g. chemical industry), the additional time for step reaming may be justified.

References

1. Patel A. Heat exchangers in industrial applications: efficiency and optimization strategies. *International journal of engineering research & technology (ijert)*. 2023. T. 12, № 09. <https://doi.org/10.17577/IJERTV12IS090003>.
2. Lingeswara S., Omar R., Ghazi T. I. M. Reliability analysis on a shell and tube heat exchanger. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2016. T. 36. S. 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012012>.
3. Hewitt G. F., Pugh S. J. Approximate design and costing methods for heat exchangers. *Heat transfer engineering*. 2007. T. 28, № 2. S. 76–86. <https://doi.org/10.1080/01457630601023229>.
4. Martin P.W. Factors that affect tube-tubesheet joint integrity. *IASMiRT*, 1991.
5. Innovative adsorbent heat exchangers: design and evaluation / L. Schnabel ta in. *Innovative heat exchangers*. Cham, 2017. S. 363–394. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71641-1_12.
6. Effect of tube arrangement on the welding of the tube-to-tubesheet joint of shell-and-tube heat exchangers using the finite element method / R. Sheibani ta in. *Journal of materials engineering and performance*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09428-0>.
7. Tselishchev M. F., Plotnikov P. N., Brodov Y. M. Effect of the sequence of tube rolling in a tube bundle of a shell and tube heat exchanger on the stress-deformed state of the tube sheet. *Thermal engineering*. 2015. T. 62, № 11. S. 802–806. <https://doi.org/10.1134/s0040601515110099>.
8. P-1000 series boiler tube expander - powermaster tube expanders. *Tube Expanders | Tube Cleaners | Tube Facing Machines - POWERMASTER LTD*. <https://www.powermaster.in/en/tube-expanders/boiler-tube-expanders-p1000.asp>.
9. 800 series condenser tube expander - powermaster tube expanders. *Tube Expanders | Tube Cleaners | Tube Facing Machines - POWERMASTER LTD*. <https://www.powermaster.in/en/tube-expanders/condenser-tube-expanders-800.asp>.
10. V series non parallel tube expander | POWERMASTER LTD. *Tube Expanders | Tube Cleaners | Tube Facing Machines - POWERMASTER LTD*. <https://www.powermaster.in/en/tube-expanders/v-series-non-parallel-tube-expanders.asp>.

Література

1. Patel A. Heat exchangers in industrial applications: efficiency and optimization strategies. *International journal of engineering research & technology (ijert)*. 2023. Т. 12, № 09. <https://doi.org/10.17577/IJERTV12IS090003>.
2. Lingeswara S., Omar R., Ghazi T. I. M. Reliability analysis on a shell and tube heat exchanger. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2016. Т. 36. С. 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012012>.
3. Hewitt G. F., Pugh S. J. Approximate design and costing methods for heat exchangers. *Heat transfer engineering*. 2007. Т. 28, № 2. С. 76–86. <https://doi.org/10.1080/01457630601023229>.
4. Martin P.W. Factors that affect tube-tubesheet joint integrity. *IASMiRT*, 1991.
5. Innovative adsorbent heat exchangers: design and evaluation / L. Schnabel та ін. *Innovative heat exchangers*. Cham, 2017. С. 363–394. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71641-1_12.
6. Effect of tube arrangement on the welding of the tube-to-tubesheet joint of shell-and-tube heat exchangers using the finite element method / R. Sheibani та ін. *Journal of materials engineering and performance*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09428-0>.
7. Tselishchev M. F., Plotnikov P. N., Brodov Y. M. Effect of the sequence of tube rolling in a tube bundle of a shell and tube heat exchanger on the stress-deformed state of the tube sheet. *Thermal engineering*. 2015. Т. 62, № 11. С. 802–806. <https://doi.org/10.1134/s0040601515110099>.
8. P-1000 series boiler tube expander - powermaster tube expanders. *Tube Expanders | Tube Cleaners | Tube Facing Machines - POWERMASTER LTD*. URL: <https://www.powermaster.in/en/tube-expanders/boiler-tube-expanders-p1000.asp>.
9. 800 series condenser tube expander - powermaster tube expanders. *Tube Expanders | Tube Cleaners | Tube Facing Machines - POWERMASTER LTD*. URL: <https://www.powermaster.in/en/tube-expanders/condenser-tube-expanders-800.asp>.
10. V series non parallel tube expander | POWERMASTER LTD. *Tube Expanders | Tube Cleaners | Tube Facing Machines - POWERMASTER LTD*. URL: <https://www.powermaster.in/en/tube-expanders/v-series-non-parallel-tube-expanders.asp>.

Стовпник О.В., Кирилюк В.О. Оцінка ефективності методів розвальцювання товстостінних труб в трубній решітці теплообмінників

Робота присвячена експериментальному дослідженню методів розвальцювання товстостінних труб у товстих трубних решітках, що застосовуються в сучасних теплообмінних апаратах.

Ефективність роботи промислових систем багато в чому залежить від надійності обладнання, основним елементом якого є кожухотрубчасті теплообмінники. Останнім часом набирає популярності використання товстостінних труб, що забезпечує більш високі показники міцності і герметичності з'єднань. Однак, використання таких труб вимагає застосування методів попередньої деформації кінців труб під кутом, який відповідає кінчній поверхні отворів у трубній решітці. Це забезпечує більш щільне з'єднання перед подальшим зварюванням і розвальцюванням по всій товщині решітки.

Основна мета роботи полягає в порівняльному аналізі покрового і безперервного методів розвальцювання, які широко застосовуються в промисловості. Ці методи істотно різняться за своєю продуктивністю, якістю та часовими витратами. Оцінка цих параметрів дає змогу виявити переваги та недоліки кожного з них, що стає основою для подальшого вибору оптимального методу залежно від умов виготовлення. Під час дослідження особливу увагу приділяли ключовим показникам, таким як міцність і герметичність з'єднань, а також стан поверхонь розвальцьованих ділянок труб. Дослідження проводилися на базі виробничого підрозділу ТОВ Юженерго, м. Дніпро.

Експериментальні дані отримані на основі досліджень з'єднань труб, виготовлених зі сталі A335 Grade P12 з різними параметрами діаметрів і товщини стінок. У процесі роботи також проведено кількісну оцінку часу, що витрачається на виконання операцій розвальцювання кожним методом. Результати досліджень показали, що безперервне вальцювання є пріоритетним напрямком для закріплення труб малого діаметру в умовах, коли потрібна висока міцність з'єднань за мінімальних витрат часу.

Розглянуті в роботі результати можуть бути корисними для поліпшення технологічних процесів виробництва та експлуатації теплообмінних апаратів. Застосування отриманих даних дає змогу підвищити не тільки надійність і довговічність обладнання, а й його економічну ефективність, що особливо важливо в умовах сучасних промислових вимог.

Ключові слова: теплообмін, товстостінні труби, покрове вальцювання, безперервне вальцювання, оцінка, герметичність з'єднань, трубні решітки.

Стовпник Олександр Володимирович – к.т.н., доцент кафедри інноваційної інженерії, Український державний університет науки і технологій (м. Дніпро), o.v.stovpnyk@ust.edu.ua

Кирилюк Вячеслав Олександрович – технічний директор, ТОВ Юженерго (м. Дніпро)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-24-32>

УДК 622.2

ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ СТРАТЕГІЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНИМИ ПРАКТИКАМИ КЕРУВАННЯ ПРОЄКТАМИ

Данилюк Н.Я., Артım В.І.

STUDYING THE INTERACTION BETWEEN STRATEGIES FOR ENHANCING THE DURABILITY OF OIL AND GAS EQUIPMENT AND BEST PROJECT MANAGEMENT PRACTICES

Danyliuk N.Y., Artım V.I.

Наукова стаття присвячена комплексному дослідженню взаємодії між стратегіями підвищення довговічності елементів нафтогазового обладнання та оптимальними практиками керування проєктами в нафтогазовій галузі. У сучасних умовах експлуатації нафтогазових систем постає необхідність у розробці й впровадженні інноваційних підходів, що забезпечують високу технічну надійність і довговічність елементів, водночас враховуючи зростаючі вимоги до ефективності керування проєктами. Основним фокусом статті є детальний аналіз впливу ефективного керування проєктами на технічну надійність, тривалість служби та загальну ефективність експлуатації елементів нафтогазового обладнання. В ході дослідження особлива увага приділяється розгляду стратегій, які сприяють тісній та продуктивній співпраці між інженерними командами та менеджерами проєктів. Така співпраця є ключовим фактором у досягненні оптимального балансу між технічними та управлінськими аспектами, що забезпечує успішне виконання нафтогазових проєктів у встановлені строки з дотриманням високих стандартів якості. Стаття охоплює ключові аспекти інтегрованого керування проєктами, зокрема стратегії комунікації, технічну інтеграцію та стратегічне керування, що дозволяють забезпечити максимально ефективне використання ресурсів. Аналіз проводиться на основі сучасних тенденцій у сфері керування проєктами та інженерної практики, з використанням прикладів успішно реалізованих проєктів у нафтогазовій індустрії. Це включає вивчення новітніх технологічних рішень та підходів, які довели свою ефективність у реальних умовах експлуатації. Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових підходів та рекомендацій у сфері керування проєктами, що

сприятимуть підвищенню технічної довговічності нафтогазового обладнання, а також загальної ефективності та сталості проєктів. Отримані висновки та пропозиції можуть служити основою для впровадження нових стратегій у практичну діяльність нафтогазових компаній, що дозволить підвищити рівень надійності та економічної ефективності їхніх інженерних рішень, а також забезпечити тривале й безперебійне функціонування обладнання в суворих умовах експлуатації.

Ключові слова: керування проєктами, довговічність елементів, підвищення довговічності, автоматизація процесів, моніторинг та оцінка, ефективність проєкту, проєктний менеджмент.

Вступ. У сучасному нафтогазовому секторі існує великий попит на вивчення ефективних стратегій підвищення довговічності елементів установок. Взаємодія між цими стратегіями та оптимальними практиками керування проєктами залишається значущим аспектом, вона вимагає детального дослідження та ідентифікації оптимальних шляхів забезпечення стійкості та продуктивності нафтогазових установок. Вкрай необхідно для науковців у нафтогазовій галузі дослідити цей аспект, спрямований на забезпечення ефективності та довговічності енергетичних систем.

Мета та завдання статті. Метою даної наукової статті є вивчення та аналіз взаємодії між стратегіями підвищення довговічності елементів нафтогазових установок та оптимальними практиками керування проєктами. Дана робота

спрямована на розкриття ключових аспектів, які визначають успішну інтеграцію цих стратегій, зокрема, аналіз впливу конструктивних рішень, технологічних інновацій та ефективного керування проектами на довговічність та стійкість нафтогазових установок. Ця стаття також спрямована на визначення оптимальних шляхів підвищення продуктивності та забезпечення надійності нафтогазових об'єктів через комплексний підхід до керування проектами та стратегіями технічного обслуговування.

Аналіз досліджень і публікацій. Одним з чи не найважливіших етапів для будь-якої нафтогазової компанії є економічні показники. Проглянувши значну кількість досліджень у сфері цієї індустрії, стає зрозуміло, що інформації стосовно поєднання підвищення довговічності елементів нафтогазових установок та практик керування проектами є доволі мало. Проте, дана проблема є доволі важливою, адже довговічність елементів напряду впливає на економічні показники компанії. І, звичайно ж, правильний підхід і баланс між керуванням та інженерією принесе значні плоди багатьом компаніям галузі.

Взаємодія довговічності елементів нафтогазового обладнання та оптимального керування проектами визначає успішність таких проєктів. Оптимізація ресурсів та ефективне технічне обслуговування, планування використання новітніх технологій та відповідність стандартам безпеки – це лише деякі переваги цього підходу. Врахування експлуатаційних чинників, гнучке керування та систематичний аналіз ризиків дозволяють досягти оптимальних результатів при мінімізації витрат та забезпеченні довговічності обладнання.

Проглянувши інформацію на ресурсах лідерів нафтогазової індустрії, стає зрозумілим, що дане дослідження є доволі важливим, адже саме такий підхід є найбільш оптимальним для кращих показників нафтогазових компаній.

Виклад основного матеріалу. В умовах постійної динаміки та технологічного розвитку нафтогазової промисловості, забезпечення довговічності елементів та ефективного керування проектами стає запитанням стратегічного значення. Ростучі вимоги до безпеки, стабільності та ефективності вимагають ретельного вивчення взаємодії між стратегіями, спрямованими на

підвищення довговічності обладнання, та оптимальними практиками керування проектами [1].

Ця наукова стаття присвячена ретельному аналізу ключових аспектів, що визначають ефективність та стійкість елементів нафтогазової інфраструктури в умовах навколишнього середовища та технічних викликів. Вивчення динаміки взаємодії між різними стратегіями підвищення довговічності та практиками керування проектами має на меті визначення оптимальних шляхів досягнення успішних результатів у сучасній нафтогазовій галузі.

Детальний розгляд концепцій, технологій та кращих практик стане основою для висновків, спрямованих на розробку стратегій, які не лише підвищують довговічність обладнання, але й оптимізують керування проектами, забезпечуючи стійкість та конкурентоспроможність у сучасному енергетичному секторі.

Ключові аспекти стратегії підвищення довговічності [2]

Сучасні стратегії підвищення довговічності в нафтогазовій галузі орієнтовані на підтримку та оптимізацію роботи обладнання, збільшення терміну служби та зниження ймовірності виникнення аварій. Ось деякі ключові аспекти таких стратегій [2]:

1. Регулярне технічне обслуговування. Розробка та виконання регулярних планових технічних обслуговувань для підтримки нормальної роботи устаткування;
2. Моніторинг стану обладнання. Впровадження систем моніторингу, які в реальному часі слідкують за параметрами та станом робочих елементів;
3. Вдосконалення матеріалів та технологій. Використання високоякісних матеріалів та новітніх технологій для збільшення міцності та стійкості елементів;
4. Оптимізація експлуатаційних умов. Аналіз та оптимізація умов експлуатації для зменшення зносу та забруднення елементів;
5. Профілактичні заходи. Впровадження систем профілактичних заходів, які спрямовані на уникнення виникнення потенційних проблем;

6. Надійність та безпека. Зосередження на розробці та впровадженні систем, які сприяють підвищенню надійності та безпеки об'єктів;

7. Системи діагностики. Використання сучасних систем діагностики для швидкого виявлення та виправлення несправностей;

8. Енергоефективність. Вдосконалення систем для оптимізації витрат енергії та зниження впливу на навколишнє середовище.

Ці стратегії можуть бути інтегровані в комплексні програми обслуговування та розвитку, спрямовані на підвищення довговічності та робочої ефективності обладнання в нафтогазовій галузі.

Регулярне технічне обслуговування включає планові заходи, такі як заміна зношених деталей та перевірка роботи систем.

Моніторинг стану обладнання використовує сучасні системи з сенсорами, які в реальному часі вимірюють тиск, температуру, вібрації та інші параметри для аналізу стану елементів.

Вдосконалення матеріалів та технологій полягає в застосуванні високоякісних сталей та інноваційних матеріалів для підвищення міцності та стійкості до зносу. Оптимізація експлуатаційних умов враховує фактори, такі як температура, тиск та хімічна агресивність середовища, для створення оптимальних умов. Профілактичні заходи передбачають вчасне заміщення або ремонт зношених деталей та систематичне очищення та обслуговування. Надійність та безпека досягається розробкою систем моніторингу ризиків для запобігання аваріям та максимізації безпеки персоналу. Системи діагностики використовують сучасні технології, такі як віддалені датчики та аналітика даних, для реального виявлення проблем та швидкого реагування. Енергоефективність забезпечується використанням енергоефективних технологій та систем керування для оптимізації витрат енергії та зменшення викидів [3].

Такі стратегії спільно спрямовані на підвищення надійності та довговічності обладнання, що є критично важливим для стабільної та безпечної роботи в нафтогазовій галузі [3].

Оптимальні практики у керуванні проектами для підвищення довговічності [4]

Оптимальні практики у керуванні проектами для підвищення довговічності елементів у нафтогазовій сфері включають в себе наступне [4]:

1. Використання цифрових технологій. Застосування цифрових технологій, таких як BIM (Building Information Modeling), для створення цифрових моделей проекту, що забезпечує ефективне планування, координацію та моніторинг усіх етапів життєвого циклу проекту [5];

2. Аналіз та моніторинг ризиків. Ретельний аналіз потенційних ризиків та розробка стратегій їхнього керування дозволяє зменшити ймовірність виникнення проблем та негативного впливу на довговічність обладнання [6];

3. Планування профілактичних робіт. Розробка чіткого графіка та плану профілактичних робіт дозволяє забезпечити своєчасне обслуговування та запобігання можливим поломкам [7];

4. Стратегії збільшення тривалості служби. Визначення стратегій для збільшення тривалості служби обладнання, таких як вдосконалення матеріалів, технічне вдосконалення та впровадження нових технологій [8];

5. Керування ресурсами. Оптимальне використання ресурсів, включаючи робочу силу, матеріали та обладнання, забезпечує ефективність проекту та підтримує його довговічність [9];

6. Системи моніторингу та діагностики. Впровадження систем моніторингу та діагностики дозволяє в реальному часі виявляти ознаки зносу чи несправностей, що дозволяє своєчасно вживати заходів [10];

7. Підвищення якості обслуговування. Забезпечення високої якості обслуговування та регулярний аудит процесів, спрямованих на збільшення довговічності, гарантує ефективне керування проектами [8].

Таким чином стає зрозумілим те, що такі оптимальні практики спрямовані на створення стійкого та ефективного середовища керування проектами для підвищення довговічності елементів у нафтогазовій сфері [4].

Порівняння стратегії довговічності з оптимальними практиками керування проектами

Проведемо порівняння стратегії підвищення довговічності [11] з оптимальними

практиками керування проектами в нафтогазовій сфері [12]:

1. Стратегії підвищення довговічності [11].

Оптимізація Матеріалів. Застосування високоякісних та стійких до агресивних середовищ матеріалів для підвищення тривалості служби обладнання.

Регулярні профілактичні роботи. Проведення систематичних профілактичних робіт для попередження поломок та виявлення потенційних проблем заздалегідь.

2. Оптимальні практики керування проектами [12].

Чітке планування. Ретельне планування всіх етапів проекту, враховуючи терміни, бюджет, та ресурси.

Ефективне керування ризиками. Систематичний аналіз та керування ризиками для запобігання можливим проблемам та забезпечення успішного завершення проекту.

Контроль якості. Встановлення систем контролю якості та впровадження стандартів для забезпечення високої якості виконання робіт.

3. Збільшення тривалості служби [13].

Інновації та технічне вдосконалення. Впровадження новітніх технологій та постійне технічне вдосконалення для забезпечення конкурентоспроможності та тривалості обладнання.

Розробка стратегій обслуговування. Створення стратегій обслуговування, що враховують особливості конкретного обладнання та умов експлуатації.

4. Керування ресурсами [9].

Раціональне використання ресурсів. Оптимізація використання робочої сили, матеріалів та обладнання для забезпечення ефективності та економії витрат.

5. Моніторинг та діагностика [10].

Використання сучасних систем. Застосування сучасних систем моніторингу та діагностики для постійного контролю за станом обладнання.

Обидва аспекти, стратегії підвищення довговічності [11] та оптимальні практики керування проектами [12], взаємодіють для досягнення спільної мети - успішного завершення проектів у нафтогазовій сфері з підвищеною довговічністю обладнання.

Приклади впровадження таких стратегій у роботі світових компаній

Оглянемо приклади того, як стратегії підвищення довговічності та оптимальні практики керування проектами впроваджуються в діяльність різних нафтогазових компаній.

Як приклад, звернемося до діяльності одного з лідерів нафтогазового сектора ExxonMobil [14].

Стратегії підвищення довговічності. ExxonMobil [14] активно вивчає і впроваджує передові технології матеріалознавства для підвищення довговічності обладнання, зокрема роблячи акцент на високоякісних сталях та інноваційних полімерах.

Оптимальні практики керування проектами [14]. Компанія використовує стратегічне планування та ефективне керування ризиками на кожному етапі проекту для забезпечення вчасної та успішної реалізації.

Наведемо ще один приклад - всім відому компанію Shell [15].

Збільшення тривалості служби через технічне вдосконалення. Shell [15] активно вкладає в інноваційні рішення, такі як вдосконалення технологій виштовхування та використання антикорозійних покриттів для збільшення тривалості служби обладнання.

Інтеграція BIM-технологій [15]. Shell використовує BIM-технології для детального проектування та керування проектами, що сприяє підвищенню ефективності та точності виконання робіт.

І для більш обширного аналізу оберемо компанію Chevron [16].

Керування ризиками та якістю [16]. Chevron акцентує на контролі ризиків та високих стандартах якості, що сприяє підтримці довговічності обладнання. Оптимальне керування ризиками дозволяє уникати негативних наслідків для проектів.

Стратегії обслуговування [16]. Розробка стратегій обслуговування, орієнтованих на конкретні потреби обладнання, допомагає підтримувати його працездатність на високому рівні.



Рис 1. Зображення взято з офіційного веб-ресурсу компанії Chevron [16]

“Advancing technology helps us safely deliver the lower carbon energy the world needs. While new innovations help us build the lower carbon energy system for the future” - Chevron

“Сучасні технології допомагають нам безпечно постачати енергію з меншим вмістом вуглецю, яка потрібна світові. Тоді як нові інновації допомагають нам будувати енергетичну систему з меншим вмістом вуглецю для майбутнього.” – дослівний переклад.

Ці компанії активно впроваджують інтегровані стратегії та практики для досягнення максимальної довговічності обладнання та успішного виконання проєктів у нафтогазовій галузі. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільність виробництва та забезпечує конкурентоспроможність компаній у галузі.

Взаємодія та вплив стратегій підвищення довговічності з оптимальними практиками керування проєктами [17]

Розглянемо основні взаємодії та впливи порівняння стратегій підвищення довговічності з оптимальними практиками керування проєктами у нафтогазовій галузі [17].

Одним з таких прикладів є інтеграція технологій [18]. Стратегії підвищення довговічності, такі як використання передових матеріалів, часто вимагають інноваційних технологій. Інтеграція ВІМ-технологій в керування проєктами покращує комунікацію та взаємодію на етапі проєктування та будівництва.

Ще одним з прикладів є контроль ризиків [19]. Забезпечення високої якості матеріалів та ретельний контроль над виробничим процесом допомагають уникнути дефектів та підвищують довговічність обладнання. Оптимальні практики керування проєктами спрямовані на попереднє визначення ризиків та їх ефективний контроль, що покращує виконання проєктів.

Дуже важливим також є й інтегрований підхід [20]. Підтримка довговічності обладнання вимагає комплексного підходу, який поєднує технічні стратегії з ефективним керуванням проєктами та обслуговуванням. Інтеграція стратегій керування проєктами і стратегій підтримки довговічності створює єдиний механізм для досягнення та підтримання високих стандартів.

Додатково можна оглянути забезпечення якості [21]. Зосередження на якості виготовлення та випробування матеріалів є ключовим для забезпечення довговічності. В той час як включення строгих контрольних точок та аудитів у процес керування проєктом сприяє підтримці високих стандартів якості.

Ну і одним з чи не найважливіших факторів є фінансова ефективність [22]. Збільшення довговічності може вести до зменшення витрат на ремонт та заміну. Ефективне керування проєктами дозволяє раціоналізувати витрати та уникнути зайвих затрат.

Це порівняння дозволяє визначити, які аспекти стратегій підвищення довговічності та оптимальних практик керування проєктами можуть взаємодіяти між собою та демонструє яким чином вони можуть впливати на ефективність в нафтогазовій галузі.

Де використовують такий підхід?

Розглянемо приклади конкретних проєктів в нафтогазовій сфері, де застосовуються результати стратегій підвищення довговічності та оптимальних практик у керуванні проєктами.

1. Проєкт розвідування та розробки нафти та газу [23].

Стратегіями довговічності є використання високоякісних матеріалів у буринних трубах та обладнанні для підвищення стійкості до агресивного середовища. В той час як оптимальними практиками керування проєктом є впровадження ВІМ-технологій для покращення координації між різними етапами проєкту та впровадження ефективних стратегій зменшення ризиків.

2. Реконструкція газопроводів та закладення нових ліній [24].

Стратегіями обслуговування в даному випадку є застосування стратегій моніторингу та планового технічного обслуговування для підтримки довговічності трубопроводів та зменшення ймовірності аварій. В той час як керування проєктами - використання принципів Agile керування для адаптивного реагування на

непередбачені зміни та забезпечення високої ефективності проекту.

3. Розробка нових енергетичних проєктів [25].

Стратегія підвищення довговічності - використання технологій, що підвищують стійкість до агресивних умов довкілля, наприклад, антикорозійні покриття та термічна обробка. Оптиміальні практики – впровадження систем керування проєктами, які дозволяють ефективно взаємодіяти зі всіма учасниками та дотримуватися строгих графіків.

4. Розробка системи видобутку газу [26].

Стратегії довговічності - застосування передових методів моніторингу стану обладнання та регулярне технічне обслуговування для підтримки роботи обладнання на тривалий термін. В той час як керування проєктами - використання методів Lean Project Management [27] для оптимізації процесів та уникнення зайвих витрат.



Рис 2. Принцип роботи з Lean Project Management [27]

У проєкті розвідування та розробки нафти та газу, велика нафтогазова компанія, така як ExxonMobil [14], використовує передові технології буріння та видобутку в умовах великої глибини та агресивного довкілля. Це включає інтегровані стратегії підвищення довговічності обладнання та оптимальне керування проєктами.

У проєкті реконструкції газопроводів та закладення нових ліній, глобальна енергетична компанія, наприклад BP [28], застосовує оптимальні стратегії керування проєктами для оптимізації транспортування газу та розширення мережі.

Розробка нових енергетичних проєктів включає в себе використання відновлювальних джерел енергії та ефективне керування виробництвом. Siemens Energy [29] є прикладом компанії, яка активно впроваджує стратегії для

збільшення довговічності обладнання та використовує передові практики керування проєктами.

У розробці систем видобутку газу, велика корпорація, така як Shell [15], розвиває високоефективні системи для максимізації видобутку та зниження витрат. Ця компанія використовує передові технології у виробництві газу та застосовує підходи Lean Project Management [27] для оптимізації процесів.

Ці приклади ілюструють різноманітність та широке використання стратегій підвищення довговічності та оптимальних практик керування проєктами світовими компаніями нафтогазової галузі для досягнення успішних результатів, а також показують як конкретні проєкти в нафтогазовій сфері успішно використовують комбінацію стратегій підвищення довговічності та оптимальних практик керування проєктами для досягнення високих результатів.

Висновок. Інтеграція ВІМ-технологій та оптимальних стратегій керування проєктами сприяє значному підвищенню довговічності обладнання в нафтогазовій галузі. Це дозволяє компаніям досягати високої ефективності, зменшуючи ризики та витрати, а також підтримувати сталість в умовах заданого технологічного ландшафту, який має властивість змінюватися.

Вплив на нафтогазову індустрію виявляється в покращенні процесів видобутку, транспортування та обробки нафти та газу. Використання ВІМ-технологій дозволяє уникнути неочікуваних ситуацій під час експлуатації, забезпечуючи стабільність виробничих процесів.

Хотілося б зазначити, що поточні результати не є завершеними, існує великий потенціал для подальших досліджень у вибраній темі. Майбутні наукові роботи можуть фокусуватися на вдосконаленні методології використання ВІМ-технологій та розширенні оптимальних стратегій керування проєктами для підвищення довговічності обладнання в різних сегментах нафтогазової галузі. Розвиток інтегрованих підходів та нових технологічних рішень може відкрити нові перспективи для сталого розвитку галузі.

Таким чином, дане дослідження визначає нові шляхи для покращення ефективності та сталості в нафтогазовій індустрії, враховуючи при цьому сучасні технологічні та керівничі виклики.

Література

1. Palkar, Sushil & Markeset, Tore. Extending the Service Life Span of Ageing Oil and Gas Offshore Production Facilities. 2012. 384. s. 213-221. 10.1007/978-3-642-33980-6_25.
2. Wintle, J., Sharp, J.: TWI REPORT 17554/1/08 – Requirements for Life Extension of Ageing Offshore Production Installations. For Petroleum Safety Authority. 2008.
3. Vynnykov, Yuriy & Kharchenko, Maksym & Manhura, Svitlana & Aniskin, Aleksej & Manhura, Andrii. Neural network analysis of safe life of the oil and gas industrial structures. Mining of Mineral Deposits. 18. 2024. 37-44. 10.33271/mining18.01.037.
4. Elreedy, Mohamed. Project Management in the Oil and Gas Industry. 2019.
5. Waqar, Ahsan & Othman, Idris & Gonzalez-Lezcano, Roberto Alonso. Challenges to the Implementation of BIM for the Risk Management of Oil and Gas Construction Projects: Structural Equation Modeling Approach. Sustainability. 2023. 15. 8019. 10.3390/su15108019.
6. Ezeh, Michael & Ogbu, Adindu & Ikevuje, Augusta & George, Emmanuel. Optimizing risk management in oil and gas trading: A comprehensive analysis. International Journal of Applied Research in Social Sciences. 6. 2024. 1461-1480. 10.51594/ijarss.v6i7.1335.
7. Zand, Mazyar. The Critical Role of Strategic Planning in the Oil & Gas Industry. 2024.
8. Mouchbahani, Christian & Chutichetpong, Poonyisa & Lu, Cathy & Chen, Daniel. Oil and Gas Services – It is about Technology & Alternatives - M Capital Group. 2024. 10.13140/RG.2.2.22393.07523.
9. Oyewole, Adedoyin & Okoye, Chinwe & Ofodile, Onyeka & Odeyemi, Olubusola & Adeoye, Omotoya & Addy, Wilhelmina & Ololade, Yinka & Puslecki, Zdzislaw. HUMAN RESOURCE MANAGEMENT STRATEGIES FOR SAFETY AND RISK MITIGATION IN THE OIL AND GAS INDUSTRY: A REVIEW. International Journal of Management & Entrepreneurship Research. 6. 2024. 623-633. 10.51594/ijmer.v6i3.875.
10. Sridhar, Narasi. Oil and Gas Production Systems. 2024. 10.1007/978-3-031-56128-3_6.
11. Panesar, S.S., Kumar, R., Markeset, T.: Development of Maintenance Strategies for Offshore Production Facilities. In: The Proceedings of the 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems (WCEAM-IMS 2008), October 28-30, pp. 1227–1232. Beijing International Convention Center, Beijing. 2008. ISBN 978-1-84882-216-0
12. Basoni, Ahmed & Almarri, Khalid. The Challenges Facing Adopting Innovation Process in the Context of Project Management Performance in the Oil and Gas Sector. 2024. 10.1007/978-3-031-56121-4_35.
13. Engineering, National & Council, National & Board, Marine & Operations, Committee. Best Available and Safest Technologies for Offshore Oil and Gas Operations. 2014. 10.17226/18545.
14. Exxonmobil. URL: <https://www.exxonmobil.eu/innovation-and-technology/research-and-development> (дата звернення: 11.01.2024)
15. Shell. URL: <https://www.shell.com/energy-and-innovation.html> (дата звернення: 11.01.2024)
16. Chevron. URL: <https://www.chevron.com/what-we-do/technology-and-innovation> (дата звернення: 14.01.2024)
17. Denney, Dennis. Stage-Gate Project-Management Process in the Oil and Gas Industry. Journal of Petroleum Technology. 2015. 58. 68-71. 10.2118/1206-0068-JPT.
18. Ekechukwu, Darlington & Simpa, Peter. Trends, insights, and future prospects of renewable energy integration within the oil and gas sector operations. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2024. 12. 152-167. 10.30574/wjaets.2024.12.1.0207.
19. Aitao Zhou, Kai Wang, Hong Zhang, Human factor risk control for oil and gas drilling industry, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 159, 2017, Pages 581-587, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.034>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517307337>)
20. Deore, Prakash. Decision Making in Upstream Oil and Gas Industry - An Integrated Approach. 2012. 10.2118/154999-MS.
21. Atif, Muhammad & Mishra, Rakesh & Charlton, Matthew & Limebear, Andrew. Quality Assurance in Flow Through Oil and Gas Pipelines. 2024. 10.1007/978-3-031-39619-9_58.
22. Babkin, Aleksei & Goncharuk, Olga. FEATURES AND PROBLEMS OF FORMATION OF CORPORATE FINANCIAL STRATEGIES IN THE OIL AND GAS SECTOR. EKONOMIKA I UPRAVLENIE: PROBLEMY, RESHENIYA. 2023. 11/2. 11-20. 10.36871/ek.up.p.r.2023.11.02.002.
23. McMahon, Richard & Crandall, Robert & Dense, Chas & Weems, Sean. ALASKA OIL AND GAS EXPLORATION, DEVELOPMENT, AND PERMITTING PROJECT. 2003. 10.2172/822891.
24. Aliyev, Ilqar & Yusifov, Maarif & Alizada, Niyaz. TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF MULTI-LINE GAS PIPELINE RECONSTRUCTION. Scientific works. 2024. 49-56. 10.58225/sw.2024.1-49-56.
25. Рахман М.С. Євтушенко В.А. Чупринюк Ю.В. Економічний аналіз та вдосконалення ринку нафти і нафтопродуктів в Україні. Економіка і суспільство. 2018. № 18.
26. Hasanov, Ilman & Guliyev, Agali. Development of effective sealing units for oil and gas equipment in the oil and gas production system. Nafta-Gaz. 2023. 79. 464-472. 10.18668/NG.2023.07.03.

27. Веб-ресурс «Kanbatool». Посилання: <https://kanbantool.com/kanban-guide/lean-project-management> (дата звернення: 14.07.2024).
28. Веб-ресурс «BP». Посилання: <https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/oil-and-gas.html> (дата звернення: 14.07.2024).
29. Веб-ресурс «Siemens Energy». Посилання: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/service-offerings.html> (дата звернення: 14.07.2024).

References

1. Palkar, Sushil & Markeset, Tore. Extending the Service Life Span of Ageing Oil and Gas Offshore Production Facilities. 2012. 384. s. 213-221. 10.1007/978-3-642-33980-6_25.
2. Wintle, J., Sharp, J.: TWI REPORT 17554/1/08 – Requirements for Life Extension of Ageing Offshore Production Installations. For Petroleum Safety Authority. 2008.
3. Vynnykov, Yuriy & Kharchenko, Maksym & Manhura, Svitlana & Aniskin, Aleksej & Manhura, Andrii. Neural network analysis of safe life of the oil and gas industrial structures. Mining of Mineral Deposits. 2024. 18. 37-44. 10.33271/mining18.01.037.
4. Elreedy, Mohamed. Project Management in the Oil and Gas Industry. 2019.
5. Waqar, Ahsan & Othman, Idris & Gonzalez-Lezcano, Roberto Alonso. Challenges to the Implementation of BIM for the Risk Management of Oil and Gas Construction Projects: Structural Equation Modeling Approach. Sustainability. 2023. 15. 8019. 10.3390/su15108019.
6. Ezeh, Michael & Ogbu, Adindu & Ikevuje, Augusta & George, Emmanuel. Optimizing risk management in oil and gas trading: A comprehensive analysis. International Journal of Applied Research in Social Sciences. 2024. 6. 1461-1480. 10.51594/ijarss.v6i7.1335.
7. Zand, Mazyar. The Critical Role of Strategic Planning in the Oil & Gas Industry. 2024.
8. Mouchbahani, Christian & Chutichetpong, Poonyisa & Lu, Cathy & Chen, Daniel. Oil and Gas Services – It is about Technology & Alternatives - M Capital Group. 2024. 10.13140/RG.2.2.22393.07523.
9. Oyewole, Adedoyin & Okoye, Chinwe & Ofodile, Onyeka & Odeyemi, Olubusola & Adeoye, Omotoya & Addy, Wilhelmina & Ololade, Yinka & Puslecki, Zdzislaw. HUMAN RESOURCE MANAGEMENT STRATEGIES FOR SAFETY AND RISK MITIGATION IN THE OIL AND GAS INDUSTRY: A REVIEW. International Journal of Management & Entrepreneurship Research. 2024. 6. 623-633. 10.51594/ijmer.v6i3.875.
10. Sridhar, Narasi. Oil and Gas Production Systems. 2024. 10.1007/978-3-031-56128-3_6.
11. Panesar, S.S., Kumar, R., Markeset, T.: Development of Maintenance Strategies for Offshore Production Facilities. In: The Proceedings of the 3rd World Congress on Engineering Asset Management and Intelligent Maintenance Systems (WCEAM-IMS 2008), October 28-30, pp. 1227–1232. Beijing International Convention Center, Beijing. 2008. ISBN 978-1-84882-216-0
12. Basoni, Ahmed & Almarri, Khalid. The Challenges Facing Adopting Innovation Process in the Context of Project Management Performance in the Oil and Gas Sector. 2024. 10.1007/978-3-031-56121-4_35.
13. Engineering, National & Council, National & Board, Marine & Operations, Committee. Best Available and Safest Technologies for Offshore Oil and Gas Operations. 2014. 10.17226/18545.
14. Exxonmobil. Available at : <https://www.exxonmobil.eu/innovation-and-technology/research-and-development> (accessed January 11, 2024)
15. Shell. Available at : <https://www.shell.com/energy-and-innovation.html> (дата звернення: 11.01.2024)
16. Chevron. Available at : <https://www.chevron.com/what-we-do/technology-and-innovation> (accessed January 14, 2024)
17. Denney, Dennis. Stage-Gate Project-Management Process in the Oil and Gas Industry. Journal of Petroleum Technology. 2015. 58. 68-71. 10.2118/1206-0068-JPT.
18. Ekechukwu, Darlington & Simpa, Peter. Trends, insights, and future prospects of renewable energy integration within the oil and gas sector operations. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2024. 12. 152-167. 10.30574/wjaets.2024.12.1.0207.
19. Aitao Zhou, Kai Wang, Hong Zhang, Human factor risk control for oil and gas drilling industry, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 159, 2017, Pages 581-587, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.034>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410517307337>)
20. Deore, Prakash. Decision Making in Upstream Oil and Gas Industry - An Integrated Approach. 2012. 10.2118/154999-MS.
21. Atif, Muhammad & Mishra, Rakesh & Charlton, Matthew & Limebear, Andrew. Quality Assurance in Flow Through Oil and Gas Pipelines. 2024. 10.1007/978-3-031-39619-9_58.
22. Babkin, Aleksei & Goncharuk, Olga. FEATURES AND PROBLEMS OF FORMATION OF CORPORATE FINANCIAL STRATEGIES IN THE OIL AND GAS SECTOR. EKONOMIKA I UPRAVLENIE: PROBLEMY, RESHENIYA. 11/2. 2023. 11-20. 10.36871/ek.up.p.r.2023.11.02.002.
23. McMahon, Richard & Crandall, Robert & Dense, Chas & Weems, Sean. ALASKA OIL AND GAS EXPLORATION, DEVELOPMENT, AND PERMITTING PROJECT. 2003. 10.2172/822891.
24. Aliyev, Ilqar & Yusifov, Maarif & Alizada, Niyaz. TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF MULTI-LINE GAS PIPELINE RECONSTRUCTION.

- Scientific works. 2024. 49-56. 10.58225/sw.2024.1-49-56.
25. Rakhman M.S. Yevtushenko V.A. Chupryniuk Yu.V. Ekonomichnyi analiz ta vdoskonalennia rynku na-fty i naftoproduktiv v Ukraini. Ekonomika i sus-pilstvo. 2018. № 18.
26. Hasanov, Ilman & Guliyev, Agali. Development of effective sealing units for oil and gas equipment in the oil and gas production system. Nafta-Gaz. 2023. 79. 464-472. 10.18668/NG.2023.07.03.
27. Веб-ресурс «Kanbantool». Available at : <https://kanbantool.com/kanban-guide/lean-project-management> (accessed July 14, 2024).
28. Веб-ресурс «BP». Available at : <https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/oil-and-gas.html> (accessed July 14, 2024).
29. Веб-ресурс «Siemens Energy». Available at : <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/service-offerings.html> (accessed July 14, 2024).

Danyliuk N.Y., Artym V.I. Studying the interaction between strategies for enhancing the durability of oil and gas equipment and best project management practices

The scientific article is devoted to a comprehensive study of the interaction between strategies for increasing the durability of oil and gas equipment elements and optimal project management practices in the oil and gas industry. In the modern operating conditions of oil and gas systems, there is a need to develop and implement innovative approaches that ensure high technical reliability and durability of elements, while taking into account the growing requirements for the efficiency of project management. The main focus of the article is a detailed analysis of the impact of effective project management on technical reliability, service life, and overall operational efficiency of oil and gas equipment elements. In the course of the study, special attention is paid to the consideration of strategies that promote close and productive cooperation between engineering teams and project managers. Such cooperation is a key factor in achieving an optimal balance between technical and managerial aspects, which ensures the successful

implementation of oil and gas projects within the established time limits and in compliance with high quality standards. The article covers the key aspects of integrated project management, including communication strategies, technical integration, and strategic management that allow for the most efficient use of resources. The analysis is based on current trends in project management and engineering practice, using examples of successfully implemented projects in the oil and gas industry. This includes studying the latest technological solutions and approaches that have proven their effectiveness in real operating conditions. The results of the research can be used to develop new approaches and recommendations in the field of project management, which will contribute to increasing the technical durability of oil and gas equipment, as well as the overall efficiency and sustainability of projects. The obtained conclusions and proposals can serve as a basis for the implementation of new strategies in the practical activities of oil and gas companies, which will allow to increase the level of reliability and economic efficiency of their engineering solutions, as well as to ensure the long-term and uninterrupted functioning of equipment in harsh operating conditions.

Keywords: *project management, element durability, durability improvement, process automation, monitoring and evaluation, project effectiveness, project management.*

Данилюк Назарій Ярославович – аспірант кафедри нафтогазового обладнання, спеціальності галузеве машинобудування, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, d.nazariy97@gmail.com.

Артим Володимир Іванович – д.т.н., професор кафедри будівництва та енергоефективних споруд Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, viartym@gmail.com.

Стаття подана 23.09.2024.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-33-43>

УДК 622.2

ВПРОВАДЖЕННЯ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ СШНУ. ОСНОВНІ ВИГОДИ ТА ВИКЛИКИ

Чеверда А.М., Артим В.І.

IMPLEMENTATION OF BIM TECHNOLOGIES FOR MONITORING AND MAINTENANCE OF SRPU. KEY BENEFITS

Cheverda A.M., Artym V.I.

У статті детально розглядаються основні аспекти впровадження BIM-технологій у процеси моніторингу та обслуговування свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). Підкреслюється значення BIM як універсального інструменту для інтеграції різних етапів управління інфраструктурними об'єктами. Використання BIM дозволяє ефективно оптимізувати життєвий цикл таких складних систем, як СШНУ, що забезпечує не лише надійність їхньої роботи, але й підвищення продуктивності та зменшення експлуатаційних витрат.

У статті акцентується увага на перевагах, які надає використання BIM у сфері моніторингу та обслуговування СШНУ. Зокрема, підкреслюється важливість підвищення точності інформації, що забезпечує своєчасне виявлення можливих відхилень у роботі системи, дозволяючи оперативно реагувати на проблеми. Це, в свою чергу, сприяє підтримці безперервності виробничих процесів та знижує ризик виникнення аварійних ситуацій.

Крім того, у статті аналізуються технічні та організаційні виклики, які можуть виникнути під час впровадження BIM. Особлива увага приділяється питанням інтеграції BIM з існуючими інформаційними системами, що є важливим аспектом для забезпечення повноти та точності даних. Важливо також зазначити необхідність проведення навчання персоналу для опанування новими технологіями та підходами, що дозволить максимально ефективно використовувати потенціал BIM.

Розроблено низку рекомендацій для успішного впровадження BIM-технологій, серед яких особливу увагу приділено детальному аналізу потреб конкретного проекту, забезпеченню ефективної інтеграції BIM з іншими системами управління, а також постійному оновленню моделей відповідно до змін на об'єкті. Виконання цих рекомендацій забезпечить не лише

підвищення ефективності роботи СШНУ, але й тривалості стабільності та надійності їх функціонування. Таким чином, впровадження BIM-технологій стає ключовим фактором підвищення ефективності та надійності управління свердловинними штанговими насосними установками, що дозволяє оптимізувати процеси, знизити витрати та забезпечити більш високий рівень безпеки під час експлуатації. Успішне впровадження BIM вимагає комплексного підходу, що враховує всі можливі технічні та організаційні виклики, а також постійної адаптації до змінних умов та нових технологій.

Ключові слова: BIM-технології, Свердловинні штангові насосні установки (СШНУ), Обслуговування, Життєвий цикл обладнання, Нафтогазова промисловість

Постановка проблеми Сучасна нафтогазова галузь стикається з рядом серйозних викликів, пов'язаних з експлуатацією свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). Часті аварії та неполадки в роботі обладнання спричиняють значні фінансові та часові втрати. Проблема полягає в недостатній ефективності традиційних методів діагностики та моніторингу СШНУ, що ускладнює своєчасне виявлення можливих несправностей і управління ризиками [1].

Актуальність теми зумовлена потребою у впровадженні нових підходів і технологій, які дозволять покращити якість та оптимізувати витрати на різних етапах життєвого циклу (ЖЦ) обладнання. Додатково, високі стандарти екологічної безпеки та сталого розвитку вимагають постійного вдосконалення процесів технічного

обслуговування та управління експлуатацією СШНУ. Тому розробка інноваційних методів і технологій для оптимізації процесів життєвого циклу обладнання і зменшення екологічного впливу є надзвичайно важливою.

Свердлильні штангові насосні установки (СШНУ) є критично важливими компонентами у видобутку нафти та газу, що забезпечують ефективне і стабільне відкачування рідини з підземних резервуарів. Оскільки ці системи функціонують у складних і агресивних середовищах, їхній належний моніторинг і обслуговування є необхідними для забезпечення безперервної роботи та оптимізації продуктивності [3].

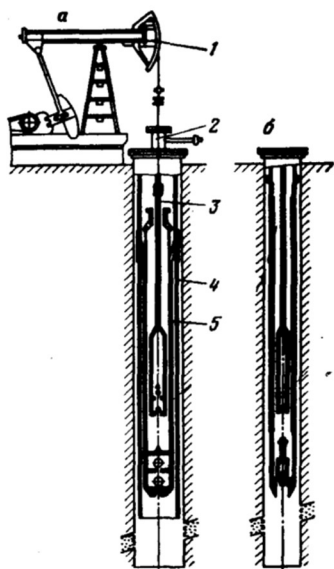


Рис. 1. Принципова схема свердлильно штангових насосних установок (СШНУ):

- 1 – станок-качалка; 2 – обладнання гирла свердловини; 3 – штанги; 4 – труби; 5 – свердлильний насос [2]

Моніторинг СШНУ дозволяє виявляти потенційні проблеми до того, як вони стануть серйозними, що знижує ризик аварійних ситуацій і зупинок у видобутку. Регулярний контроль параметрів роботи, таких як тиск, температура та рівень рідини, допомагає вчасно виявляти відхилення від норми та проводити необхідні корекції.

Обслуговування СШНУ включає ряд процедур, спрямованих на підтримку та відновлення оптимальної продуктивності системи. Це може включати заміну зношених компонентів, очищення і перевірку насосів, а також перевірку цілісності трубопроводів та інших елементів. Адекватне обслуговування не тільки подовжує

термін служби обладнання, але і підвищує його ефективність, що в свою чергу впливає на економічні показники підприємства.

Впровадження сучасних технологій моніторингу, зокрема, систем на основі BIM-технологій, може значно полегшити цей процес, забезпечуючи більш точний і ефективний контроль за роботою СШНУ. Технології BIM (Building Information Modeling) дозволяють інтегрувати дані про обладнання і його стан у віртуальну модель, що дає змогу в режимі реального часу відстежувати всі критичні параметри та планувати технічне обслуговування з урахуванням отриманих даних [3].

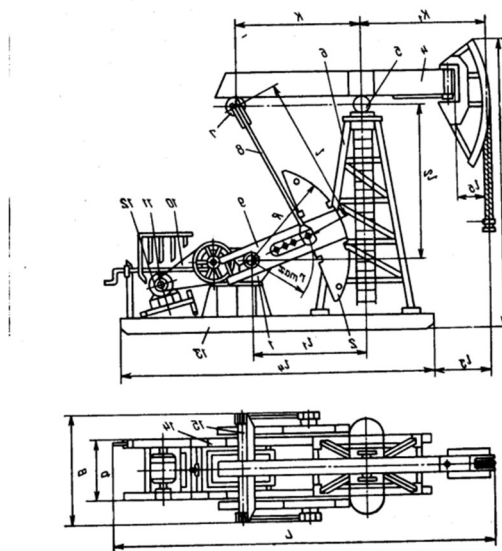


Рис. 2. Загальний вигляд Станка-Качалки:

- I-VH – точки змаски; 1 – редуктор; 2 – противага; 3 – підвіска; 4 – балансир; 5 – опора балансира; 6 – стійка; 7 – опора траверсу; 8 – шатун; 9 – кривошип; 10 – криворемінна переда; 11 – електродвигун; 12 – огородження; 13 – рама; 14 – тормоз; 15 – траверси [2]

В Україні широко застосовуються насосні установки для видобутку нафти, які використовуються більш ніж у 70% діючих свердловин. Насосна установка включає станок-качалку, обладнання гирла свердловини, насосні штанги, насосно-компресорні труби та свердловинний штанговий насос. Плунжер насоса рухається зворотно-поступально за рахунок приводу від електродвигуна через редуктор та кривошипно-шатунний механізм станка-качалки [2]. Глибина встановлення насосів може досягати 3500 метрів, а продуктивність коливається від кількох сотень кілограмів до 400 тонн на добу. Тип і розмір насоса, станка-качалки, діаметр НКТ та

штанг визначаються в залежності від характеристик рідини, дебіту та глибини свердловини. Свердловинні насоси занурюються під рівень рідини. Невставні насоси монтуються у свердловинні частини, тоді як вставні спускаються в готовому вигляді. Для відділення нафти від газу і піску на вході насоса встановлюється фільтр. Наземне обладнання включає станок-качалку та обладнання гирла свердловини [2].

Роль BIM-технологій у сучасному управлінні інфраструктурними об'єктами

BIM-технології (Building Information Modeling) представляють собою передовий підхід до управління інфраструктурними об'єктами, що забезпечує інтеграцію та автоматизацію процесів на всіх етапах життєвого циклу об'єкта – від проектування до експлуатації і обслуговування. Ці технології використовують цифрові моделі для створення, аналізу та управління інформацією про фізичні та функціональні характеристики об'єктів, що дозволяє підвищити ефективність управлінських процесів і забезпечити їхню надійність [4].

Основна перевага BIM-технологій полягає у створенні єдиної інтегрованої платформи, яка об'єднує всі дані та документи, що стосуються інфраструктурного об'єкта. Це дозволяє усім учасникам проекту – архітекторам, інженерам, підрядникам і операторам – мати доступ до актуальної і точної інформації, що сприяє зменшенню помилок та конфліктів під час виконання робіт.

BIM-моделі забезпечують візуалізацію проекту у тривимірному форматі, що полегшує розуміння складних конструкцій і дозволяє раніше виявити потенційні проблеми. Це також дозволяє здійснювати ефективне планування і координацію між різними спеціалістами, що підвищує якість проектних рішень і скорочує час на їх реалізацію [4].

Важливим аспектом використання BIM-технологій є можливість інтеграції даних про об'єкт з різними системами моніторингу та управління, що дозволяє реалізувати проактивний підхід до обслуговування і експлуатації. Зокрема, це дозволяє здійснювати реальний моніторинг стану об'єкта, що сприяє своєчасному виявленню і усуненню несправностей до їхнього критичного розвитку.

У контексті свердловинних штангових насосних установок (СШНУ), технології надають можливість створення точних цифрових моделей, які включають інформацію про всі компоненти системи, їхній стан і взаємодію. Це сприяє підвищенню ефективності моніторингу

та обслуговування, зменшенню часу на реагування на проблеми і оптимізації процесів експлуатації [11].

Таким чином, впровадження BIM-технологій у управлінні інфраструктурними об'єктами представляє собою важливий крок до підвищення ефективності і надійності, забезпечуючи інтеграцію даних і автоматизацію процесів на всіх етапах життєвого циклу об'єкта.

Визначення та основи BIM (Building Information Modeling)

BIM (Building Information Modeling) є технологічним підходом, який використовує цифрові моделі для управління інформацією про будівельні об'єкти протягом всього їхнього життєвого циклу. Це інтегрований процес, що охоплює проектування, будівництво та експлуатацію об'єкта, забезпечуючи централізовану базу даних, яка містить всю необхідну інформацію про його фізичні та функціональні характеристики [9].

Основи BIM включають:

1. Цифрова модель об'єкта: BIM створює тривимірні цифрові моделі будівель і інфраструктур, що дозволяють детально представити всі аспекти проекту, включаючи конструкційні елементи, системи інженерії, матеріали та специфікації. Ці моделі є основою для всіх подальших процесів, включаючи аналіз, планування і координацію.

2. Інтеграція інформації: BIM-технології забезпечують інтеграцію різноманітної інформації в єдиній платформі. Це дозволяє об'єднати дані з різних джерел, таких як архітектурні, структурні та інженерні системи, що забезпечує всебічний огляд об'єкта і покращує точність проектування та управління.

3. Співпраця: Завдяки BIM усі учасники проекту – архітектори, інженери, будівельники, замовники – можуть працювати з однією єдиною моделлю. Це сприяє покращенню комунікації, координації та зменшенню помилок, що виникають через несумісність даних і розбіжності у проектних рішеннях [4].

4. Життєвий цикл об'єкта: BIM охоплює всі етапи життєвого циклу об'єкта, від початкового проектування до експлуатації і обслуговування. Це включає створення точних моделей, які можуть бути використані для оцінки витрат, управління будівельними процесами, проведення технічного обслуговування і реалізації оновлень.

5. Аналіз і симуляція: Використання BIM дозволяє проводити різноманітні види аналізу, такі як енергетичні оцінки, розрахунок

навантажень, перевірка конструкційної стійкості. Це допомагає виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях і оптимізувати проектні рішення.

6. Візуалізація: Однією з ключових особливостей BIM є можливість створення високоякісних візуалізацій проектів, що полегшує розуміння складних конструкцій і дозволяє краще оцінити зовнішній вигляд і функціональність об'єкта до початку його будівництва.

Таким чином, BIM є потужним інструментом, який трансформує процеси проектування, будівництва і управління об'єктами, забезпечуючи інтеграцію, точність і ефективність на всіх етапах життєвого циклу будівельного проекту [8].

Основні компоненти та принципи роботи BIM-технологій

BIM-технології, або моделювання інформації про будівлі, є потужним інструментом сучасного управління інфраструктурними об'єктами. Основним елементом цієї технології є цифрова модель, яка забезпечує всебічне представлення інформації про об'єкт у тривимірному форматі. Модель включає не лише геометричні дані, але й інформацію про матеріали, конструкції та функціональні характеристики об'єкта.

Принципи роботи BIM-технологій ґрунтуються на інтеграції та управлінні інформацією в рамках одного цифрового простору. Це дозволяє всім учасникам проекту мати доступ до актуальних даних і зменшує ймовірність помилок, пов'язаних з несумісністю інформації. Основними компонентами є тривимірні моделі, які детально описують будівельні елементи та їх характеристики, а також інструменти для управління життєвим циклом об'єкта, які включають планування, проектування, будівництво та експлуатацію [5].

Інтеграція BIM-технологій у процеси управління дозволяє значно підвищити ефективність і точність управлінських рішень, зменшити витрати на проектування та будівництво, а також полегшити процеси моніторингу та обслуговування. Зокрема, у випадку з свердлильними штанговими насосними установками (СШНУ) ці технології можуть бути використані для оптимізації процесів технічного обслуговування та моніторингу, забезпечуючи зниження витрат та підвищення надійності систем [4].

Переваги використання BIM для моніторингу СШНУ.

Переваги використання BIM для моніторингу свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) є суттєвими і багатоаспектними. Технології BIM забезпечують комплексний підхід до управління інформацією про об'єкти, що дозволяє підвищити ефективність процесів моніторингу та обслуговування.

Перш за все, BIM-технології забезпечують точність та актуальність даних. Завдяки тривимірним моделям, які включають детальну інформацію про всі компоненти СШНУ, стає можливим своєчасне виявлення потенційних проблем та проведення діагностики без фізичного втручання. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни та знижувати ризик аварійних ситуацій [12].

По-друге, інтеграція BIM-систем з датчиками та системами моніторингу дозволяє здійснювати реальний контроль за станом обладнання в режимі реального часу. Інформація, що надходить з різних сенсорів, може бути автоматично оновлена у моделі, що сприяє точнішій і швидшій оцінці стану СШНУ.

Окрім того, використання BIM-технологій дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування завдяки прогнозуванню можливих збоїв та оптимізації графіків ремонту. Моделі можуть бути використані для планування технічного обслуговування на основі даних про експлуатацію та історії ремонту, що дозволяє ефективніше управляти ресурсами і запобігати неочікуваним зупинкам.

Ще однією важливою перевагою є можливість інтеграції BIM-моделей з іншими системами управління і аналітичними платформами. Це забезпечує створення комплексних аналітичних звітів і дозволяє проводити глибинний аналіз ефективності роботи СШНУ, виявляючи тенденції та патерни, які можуть бути неочевидні при використанні традиційних методів моніторингу.

Таким чином, впровадження BIM-технологій у моніторинг СШНУ забезпечує зростання ефективності управління, зниження витрат та підвищення надійності експлуатації обладнання [5].

Інструменти та методи інтеграції BIM у системи моніторингу.

Інтеграція BIM у системи моніторингу свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) здійснюється через використання спеціалізованих інструментів та методів, які забезпечують глибоке занурення в процеси

експлуатації та технічного обслуговування цих установок. Основні інструменти включають різноманітні програмні платформи, які дозволяють інтегрувати дані з різних джерел у єдину інформаційну модель. Ці платформи підтримують обробку даних у режимі реального часу, що дозволяє відслідковувати показники роботи насосних установок, виявляти аномалії та передбачати можливі відмови.

Методи інтеграції ВІМ включають використання сенсорних систем і систем моніторингу, які передають дані в центральну модель ВІМ. Ці системи можуть включати в себе датчики для вимірювання тиску, температури, витрат і інших важливих параметрів, що відображають стан СШНУ. Дані, отримані з цих сенсорів, інтегруються в ВІМ-модель, що дозволяє не лише здійснювати моніторинг у режимі реального часу, але й аналізувати історичні дані для виявлення трендів і проблем, які можуть вплинути на ефективність роботи установок.

Завдяки таким методам, можливо значно підвищити точність і оперативність обслуговування СШНУ, зменшити час простоїв і витрати на ремонт, а також покращити загальну надійність і безпеку експлуатації насосних установок.

Переваги використання ВІМ для обслуговування СШНУ.

Використання ВІМ-технологій для обслуговування свердловних штангових насосних установок (СШНУ) має численні переваги, які суттєво покращують ефективність і якість управлінських процесів [4].

По-перше, ВІМ-технології забезпечують централізовану інформаційну модель, яка містить усі дані про СШНУ, включаючи конструкцію, компоненти, технічні характеристики та історію обслуговування. Це дозволяє зберігати та легко доступати інформацію в будь-який час, що значно спрощує планування технічного обслуговування та ремонтних робіт.

По-друге, інтеграція ВІМ у процеси обслуговування забезпечує високий рівень деталізації і точності при моделюванні можливих сценаріїв експлуатації і поломок. Це дозволяє краще прогнозувати потреби в обслуговуванні і своєчасно виявляти потенційні проблеми, що допомагає уникнути непередбачених витрат і зменшити час простоїв обладнання.

По-третє, використання ВІМ-технологій дозволяє автоматизувати багато процесів, включаючи моніторинг стану СШНУ, аналіз даних і генерацію звітів. Це не тільки підвищує ефективність роботи технічного персоналу, але й

зменшує ймовірність людських помилок, пов'язаних з обробкою великого обсягу інформації [7].

По-четверте, ВІМ-моделі можуть бути інтегровані з іншими системами управління і контролю, що забезпечує синхронізовану і комплексну інформацію про всі аспекти обслуговування СШНУ. Це допомагає забезпечити більш ефективну координацію між різними відділами і спеціалістами, що бере участь в обслуговуванні та ремонті.

По-п'яте, можливість візуалізації даних у ВІМ-моделі дозволяє створювати наочні звіти і графічні репрезентації стану обладнання, що спрощує розуміння і аналіз технічної інформації, а також полегшує комунікацію між технічними спеціалістами і керівництвом [4].

Інструменти та методи інтеграції ВІМ у процеси обслуговування

Інтеграція ВІМ-технологій у процеси обслуговування свердловних штангових насосних установок (СШНУ) передбачає використання спеціалізованих інструментів і методів, які забезпечують ефективне управління технічним обслуговуванням і ремонтом. Основними інструментами і методами є:

Використання програмного забезпечення для моделювання і аналізу. Сучасні програми для створення і управління ВІМ-моделями, такі як Autodesk Revit, Bentley Systems або Graphisoft ArchiCAD, дозволяють створювати точні моделі СШНУ, які включають всі компоненти і параметри обладнання. Ці моделі слугують основою для подальшого моніторингу і обслуговування, оскільки вони надають детальну інформацію про стан і функціонування кожної частини системи [6].

Інтеграція з системами моніторингу і управління. Для ефективного обслуговування СШНУ необхідно інтегрувати ВІМ-моделі з системами моніторингу, такими як SCADA або IoT-платформи. Це дозволяє в режимі реального часу відстежувати показники роботи обладнання, виявляти відхилення від норм і оперативно реагувати на проблеми. Дані з систем моніторингу можна вносити в ВІМ-моделі, що дозволяє наочно відображати інформацію про стан обладнання і планувати необхідні дії.

Використання аналітичних інструментів для прогнозування і планування. За допомогою аналітичних інструментів, вбудованих у ВІМ-системи, можна виконувати аналіз даних про експлуатацію і обслуговування СШНУ. Це включає в себе прогнозування зносу компонентів, планування технічного обслуговування,

а також оптимізацію графіків ремонтних робіт. Такі інструменти допомагають зменшити ризику непередбачених поломок і підвищити ефективність управлінських рішень.

Створення інтерактивних візуалізацій. Один із способів покращення процесів обслуговування – це використання інтерактивних візуалізацій ВІМ-моделей. Вони дозволяють технічним спеціалістам наочно бачити різні аспекти роботи і стану СШНУ, що полегшує прийняття рішень і координацію дій при проведенні обслуговування або ремонту.

Інтеграція з базами даних і системами управління документацією. ВІМ-технології дозволяють інтегрувати моделі з базами даних і системами для управління документацією, що забезпечує доступ до важливої інформації про технічні характеристики, інструкції з обслуговування та історію ремонту. Це спрощує пошук необхідних документів і підвищує ефективність роботи технічного персоналу [9].

Завдяки цим інструментам і методам інтеграція ВІМ у процеси обслуговування СШНУ дозволяє забезпечити високий рівень точності, зручності і ефективності в управлінні технічним обслуговуванням, що, в свою чергу, сприяє підвищенню надійності і довговічності обладнання.

Покращення ефективності та точності моніторингу.

Впровадження ВІМ-технологій у процеси моніторингу та обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) приносить численні переваги. По-перше, однією з ключових переваг є можливість інтеграції даних в реальному часі. Це дозволяє операторам оперативно реагувати на зміни та аномалії в роботі системи, що значно підвищує ефективність її функціонування. Оперативний доступ до актуальної інформації дозволяє швидше приймати рішення і здійснювати коригування.

Окрім того, ВІМ-технології забезпечують високий рівень точності в моніторингу завдяки детальному моделюванню компонентів системи. Це дозволяє не тільки відслідковувати технічний стан насосних установок, але й передбачати потенційні проблеми завдяки аналізу історичних даних та моделей поведінки обладнання. Інструменти ВІМ дозволяють створювати точні 3D-моделі, що значно спрощує процес візуалізації та аналізу даних [4].

Крім того, інтеграція ВІМ у процеси обслуговування дозволяє зменшити час на виконання технічних завдань. Завдяки деталізованим моделям і зібраним даним, технічні спеціалісти

можуть ефективніше планувати обслуговування, точно визначати місця для проведення робіт і уникати непотрібних витрат часу на уточнення деталей. Це також сприяє зниженню ризику людських помилок та підвищує загальний рівень безпеки.

Завдяки ВІМ-технологіям поліпшуються і комунікаційні процеси між різними учасниками обслуговування. Всі дані зберігаються в єдиній системі, що забезпечує доступ до них для всіх залучених осіб, включаючи технічних фахівців, керівництво та підтримку. Це дозволяє знизити ймовірність виникнення комунікаційних помилок та забезпечувати більш високий рівень координації дій.

Таким чином, впровадження ВІМ-технологій у процеси обслуговування свердлильних штангових насосних установок забезпечує покращення ефективності, точності та загальної якості обслуговування, що в кінцевому підсумку веде до зниження витрат і підвищення надійності систем.

Оптимізація процесів обслуговування та зменшення витрат.

Впровадження ВІМ-технологій у процеси обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) суттєво сприяє оптимізації цих процесів і зменшенню витрат. Завдяки детальному моделюванню і аналізу даних, яке пропонують ВІМ-системи, значно знижується час на виконання обслуговування та ремонтних робіт.

Один з основних аспектів оптимізації – це підвищення точності у плануванні технічних завдань. З використанням ВІМ технологій, можна створити детальну модель системи, яка відображає всі компоненти і їх стан. Це дозволяє заздалегідь виявити проблеми і визначити необхідні ресурси для їх усунення. В результаті, роботи проводяться швидше і з меншими витратами, оскільки точність планування зменшує ймовірність додаткових витрат на непередбачені обсяги робіт або матеріали [14].

Також, завдяки ВІМ, можливо зменшити витрати на обслуговування за рахунок зменшення людських помилок. Автоматизація процесів, доступ до актуальних даних та зручні інструменти для аналізу дозволяють мінімізувати ймовірність помилок при виконанні обслуговування або ремонту. Це сприяє зменшенню непередбачених витрат і підвищує загальну ефективність роботи.

Додатково, ВІМ-технології дозволяють оптимізувати використання ресурсів. Завдяки зібраним даним про технічний стан обладнання

і його використання, можна краще планувати закупівлю матеріалів і запчастин, уникати надмірних витрат на зберігання та закупівлю невикористаних запасів. Це також зменшує витрати на транспортування і зберігання компонентів.

Оптимізація процесів обслуговування також включає в себе покращення комунікації між різними відділами і спеціалістами. Завдяки єдиній платформі для зберігання і обробки даних, всі учасники процесу мають доступ до актуальної інформації, що дозволяє знижувати час на координацію дій і підвищує загальну ефективність роботи.

Підвищення прозорості та доступності інформації.

Впровадження ВІМ-технологій в обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) також суттєво підвищує прозорість і доступність інформації. Це досягається завдяки централізації даних і впровадженню сучасних методів їх візуалізації [5].

Завдяки ВІМ-системам, вся інформація про технічний стан обладнання, історію обслуговування, технічні характеристики та плани ремонту зберігається в єдиній цифровій платформі. Це забезпечує легкий доступ до даних для всіх учасників процесу, від технічного персоналу до управлінців. Наявність актуальної інформації в реальному часі дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни або проблеми, що виникають у процесі експлуатації та обслуговування.

Прозорість інформації також покращується завдяки інтерактивним візуалізаціям. ВІМ-технології дозволяють створювати детальні тривимірні моделі обладнання і систем, що надають зрозумілу і доступну інформацію про їх стан та конструкцію. Це спрощує розуміння складних технічних аспектів і дозволяє краще планувати обслуговування і ремонт [4]. Спеціалісти можуть швидше і точніше оцінювати ситуацію, отримуючи всю необхідну інформацію без необхідності фізичного огляду або повторних запитів.

Завдяки інтеграції з іншими системами управління і моніторингу, ВІМ-технології також забезпечують єдину платформу для всіх процесів обслуговування. Це зменшує ймовірність втрати або помилкової інтерпретації даних, адже вся інформація зберігається і оновлюється в одному місці. Кожен учасник процесу має доступ до актуальної і точної інформації, що підвищує ефективність роботи і допомагає уникнути непорозумінь.

Таким чином, підвищення прозорості і доступності інформації завдяки ВІМ-технологіям забезпечує не лише поліпшення управлінських процесів, але й підвищення загальної ефективності обслуговування СШНУ.

Технічні та організаційні складнощі інтеграції.

Впровадження ВІМ-технологій у процеси обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) може стикатися з рядом технічних та організаційних складнощів.

З технічної точки зору, інтеграція ВІМ з існуючими системами може бути ускладнена через різноманітність платформ і форматів даних, що використовуються. Для забезпечення безперервного обміну інформацією між ВІМ-системами та іншими технологіями управління потрібна належна сумісність і інтеграційні рішення. Це може вимагати розробки спеціалізованих адаптерів або налаштування існуючих систем, що не завжди є простим і економічно ефективним процесом.

Іншою технічною складністю є забезпечення точності і повноти даних, що імплементуються в ВІМ-систему. Дані про обладнання і його стан повинні бути актуальними та детальними, інакше система може стати джерелом помилкової інформації. Це потребує регулярного оновлення даних і контролю за їх якістю.

Організаційні складнощі пов'язані з необхідністю зміни внутрішніх процесів і процедур. Впровадження ВІМ часто вимагає перепідготовки персоналу і зміни існуючих робочих процесів, що може зустріти опір з боку співробітників або вимагати додаткових ресурсів. Керівництво повинно забезпечити відповідну підтримку та підготовку персоналу для ефективного використання нових технологій.

Ще однією організаційною складністю є необхідність інтеграції ВІМ-системи в існуючу структуру управління об'єктами і обслуговуванням. Це може вимагати коригування внутрішніх процедур і політик, що може бути складним і тривалим процесом.

Зрештою, технічні та організаційні складнощі інтеграції ВІМ-технологій в обслуговування СШНУ потребують ретельного планування і ресурсного забезпечення. Це включає не лише технічні аспекти, але й організаційні зміни, які повинні бути враховані для досягнення успішного впровадження і забезпечення ефективності нових систем.

Вартість впровадження та підтримки систем.

Вартість впровадження та підтримки систем для моніторингу та обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) є важливим аспектом, що потребує детального розгляду [2].

Впровадження ВІМ-системи вимагає значних інвестицій на початковому етапі. Це включає вартість програмного забезпечення, яке може варіюватися в залежності від функціональних можливостей та масштабів системи. Також важливо враховувати витрати на обладнання, яке буде необхідним для запуску та підтримки ВІМ-системи, таке як сервери, робочі станції та мережеве обладнання.

Крім того, початкові витрати включають витрати на навчання персоналу. Для ефективного використання ВІМ-технологій необхідна підготовка спеціалістів, що може потребувати організації тренінгів або сертифікаційних курсів. Це є додатковим фінансовим навантаженням, яке слід враховувати при плануванні впровадження.

Підтримка ВІМ-системи також несе додаткові витрати. Це включає в себе регулярні оновлення програмного забезпечення, обслуговування обладнання та системи, а також витрати на підтримку користувачів. Для забезпечення належного функціонування системи можуть знадобитися постійні технічні консультації або послуги технічної підтримки.

Ще одним аспектом є витрати на інтеграцію ВІМ-системи з іншими існуючими технологіями та процесами управління. Це може вимагати спеціалізованих рішень або адаптацій, що може суттєво вплинути на загальну вартість проекту.

Загалом, вартість впровадження та підтримки ВІМ-системи для обслуговування СШНУ може бути значною, але її можна оцінити як інвестицію в підвищення ефективності та якості управлінських процесів. Для визначення повних витрат необхідно ретельно планувати бюджет, враховуючи всі можливі витрати на початковому етапі та протягом експлуатації системи.

Потреба у спеціалізованих навичках та знаннях.

Впровадження ВІМ-технологій для моніторингу та обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) ставить перед організаціями необхідність забезпечення спеціалізованих навичок і знань.

Однією з основних потреб є наявність фахівців, які мають глибоке розуміння

принципів та можливостей ВІМ-систем. Це включає знання в галузі архітектурного моделювання, управлінських систем та інтеграції даних. Спеціалісти повинні мати навички роботи з відповідними програмними продуктами, такими як Autodesk Revit або Bentley Systems, а також розуміти специфіку застосування цих інструментів у контексті обслуговування СШНУ [15].

Крім того, важливо забезпечити фахівців, які володіють знаннями в області інженерії та обслуговування насосних систем. Це включає розуміння технічних аспектів роботи СШНУ, їх конструктивних особливостей та проблем, які можуть виникнути під час експлуатації. Спеціалісти повинні бути здатні інтегрувати ці знання у ВІМ-моделі для забезпечення точності та ефективності моніторингу та обслуговування.

Забезпечення такої компетентності може вимагати додаткового навчання або перекваліфікації наявних співробітників. Це може включати проходження курсів або сертифікаційних програм, що спеціалізуються на ВІМ-технологіях та їх застосуванні в інфраструктурних проектах. Інвестиції в підготовку персоналу є важливим аспектом успішного впровадження та ефективного використання ВІМ-систем.

Таким чином, потреба у спеціалізованих навичках та знаннях є критично важливою для успішного впровадження ВІМ-технологій у процесі обслуговування СШНУ. Ретельне планування навчання та підготовки кадрів допоможе забезпечити високий рівень кваліфікації персоналу та максимально ефективно використання можливостей ВІМ-систем.

Узагальнення основних переваг і викликів.

Впровадження ВІМ-технологій у моніторинг та обслуговування свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) приносить значні переваги, які суттєво покращують ефективність і точність управлінських процесів. Однією з ключових переваг є можливість інтеграції актуальних даних з тривимірними моделями, що дозволяє здійснювати глибокий аналіз і моніторинг стану обладнання в реальному часі. Це забезпечує оперативну реакцію на можливі проблеми, що в свою чергу знижує ризики поломок і покращує надійність систем.

Використання ВІМ-технологій також полегшує процес обслуговування завдяки доступу до детальної інформації про компоненти системи. Це сприяє точному плануванню і виконанню ремонтних робіт, що зменшує час на обслуговування і знижує витрати на ремонт. Підвищена прозорість інформації і можливість

здійснювати комплексний контроль над всіма аспектами функціонування насосних установок є ще однією важливою перевагою [4].

Однак, існують і певні виклики, які потрібно враховувати при впровадженні BIM-технологій. Технічні та організаційні складнощі, такі як інтеграція з існуючими системами і необхідність оновлення програмного забезпечення, можуть стати серйозними перешкодами. Вартість впровадження та підтримки BIM-систем є ще одним важливим аспектом, який потребує ретельного планування. Крім того, необхідність у спеціалізованих навичках та знаннях для ефективного використання BIM-технологій може вимагати додаткових ресурсів для навчання персоналу.

Таким чином, хоча впровадження BIM-технологій у моніторинг і обслуговування СШНУ надає численні переваги, такі як підвищення ефективності, точності і прозорості інформації, виклики, пов'язані з технічними складнощами, витратами і потребою у спеціалізованих навичках, вимагають уважного підходу і комплексного планування для досягнення максимальних результатів.

Рекомендації для успішного впровадження BIM-технологій у моніторинг та обслуговування СШНУ.

Для ефективного впровадження BIM-технологій у моніторинг та обслуговування свердловинних штангових насосних установок важливо дотримуватись кількох ключових рекомендацій. По-перше, необхідно провести ретельний аналіз потреб і вимог до системи. Це дозволить визначити найбільш важливі функціональні можливості, які BIM-рішення має забезпечувати, і вибрати відповідне програмне забезпечення, що відповідає цим вимогам [1].

По-друге, важливо забезпечити інтеграцію BIM-систем з уже існуючими системами моніторингу та обслуговування. Це може вимагати модифікацій на рівні програмного забезпечення або створення спеціальних інтерфейсів для обміну даними. Зокрема, слід забезпечити безперервну передачу даних між різними системами та уникнути можливих конфліктів у даних.

По-третє, необхідно інвестувати в навчання персоналу. Оскільки ефективне використання BIM-технологій вимагає специфічних знань і навичок, важливо організувати навчальні програми для технічних фахівців, які будуть працювати з новою системою. Це допоможе не тільки покращити ефективність роботи, але й

зменшити кількість помилок, що можуть виникнути через недостатню підготовку.

Не менш важливо забезпечити наявність технічної підтримки на всіх етапах впровадження та експлуатації BIM-системи. Наявність кваліфікованих спеціалістів, готових швидко реагувати на будь-які проблеми або запити, допоможе уникнути затримок і непередбачених витрат, пов'язаних з технічними труднощами.

Також варто враховувати необхідність постійного оновлення і вдосконалення BIM-моделей. Для цього важливо встановити чіткі процедури для регулярного внесення змін і оновлень, щоб забезпечити актуальність і точність інформації в системі.

У підсумку, успішне впровадження BIM-технологій у моніторинг та обслуговування СШНУ потребує комплексного підходу, включаючи ретельний аналіз потреб, інтеграцію з існуючими системами, навчання персоналу, технічну підтримку та регулярне оновлення моделей. Дотримання цих рекомендацій сприятиме досягненню максимальних результатів і ефективному управлінню насосними установками.

Л і т е р а т у р а

1. Федорович Я.Т. «Машини та обладнання для видобутку нафти і газу навчальний посібник» Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 344 с.
2. Махмудов С.А. Монтаж, експлуатація і ремонт свердловинних штангових насосних установок 3-13
3. Копей В.Б. Науково-методологічні основи автоматизованого проектування обладнання штангової свердловинної насосної установки : в 2 ч. Дис. д-ра техн. наук : 05.05.12. Івано-Франківськ, 2020.
4. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/ae/solutions/bim> 20.06.2024
5. Копей В.Б., Копей Б.В., Кузьмін О.О. Принципи побудови моделі свердловинної штангової насосної установки для середовища Maplesoft MapleSim 7
6. [Ray Crotty](#): “The Impact of Building Information Modelling: Transforming Construction”
7. [Erica Epstein](#) : “Implementing Successful Building Information Modeling”
8. [Stefan Mordue, Paul Swaddle, David Philp](#): “Building Information Modeling For Dummies”
9. Exxonmobil site. URL: <https://corporate.exxonmobil.com>
10. Глушко В. І. Технологія буріння свердловин. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 458 с.

11. Volodymyr Kopei, Oleh Onysko, Cristian Barz: "Designing a Multi-Agent PLM System for Threaded Connections Using the Principle of Isomorphism of Regularities of Complex Systems" *Machines* 2023, 11(2), 263
12. Поліщук О. Г. Проектування та експлуатація нафтових і газових свердловин. Харків: ХНАДУ, 2018. 375 с
13. Нафтогазова енергетика. №2(15). 2011. С.12-18.], САПР, FEA-моделі верстата-качалки, штанг, різьбових з'єднань насосних штанг та НКТ [Hoffman E. L. Finite Element Analysis of Sucker Rod Couplings with Guidelines for Improving Fatigue Life: Sandia report. Sandia National Laboratories, 1997. 66 p.
14. Копей В.Б. Розроблення та аналіз параметричних скінченно-елементних моделей різьбових з'єднань в Abaqus® // Нафтогазова енергетика. № 1(12). 2010. С.31-36
15. Sheldon Wang, Lynn Rowlan, Dennis Cook, Carson Conrady, Ross King, Carrie Anne Taylor "Dynamics of pump jacks with theories and experiments" *Upstream Oil and Gas Technology Volume 11*, September 2023, 100097 <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100097>
13. Oil and Gas Energy. No. 2(15), 2011, pages 12-18.], CAD, FEA models of the pump jack, rods, threaded connections of sucker rods, and tubing [Hoffman E. L. "Finite Element Analysis of Sucker Rod Couplings with Guidelines for Improving Fatigue Life: Sandia report." Sandia National Laboratories, 1997. 66 pages.
14. Kopei V.B. "Development and Analysis of Parametric Finite Element Models of Threaded Connections in Abaqus®." *Oil and Gas Energy*. No. 1(12), 2010, pages 31-36.
15. Sheldon Wang, Lynn Rowlan, Dennis Cook, Carson Conrady, Ross King, Carrie Anne Taylor. "Dynamics of Pump Jacks with Theories and Experiments." *Upstream Oil and Gas Technology*, Volume 11, September 2023, 100097 <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100097>

Cheverda A.M., Artym V.I. Implementation of bim technologies for monitoring and maintenance of srpu. key benefits

The article provides a detailed examination of the main aspects of implementing BIM technologies in the processes of monitoring and maintaining sucker rod pumping units (SRPUs). The significance of BIM is emphasized as a universal tool for integrating various stages of infrastructure management. The use of BIM allows for the effective optimization of the life cycle of such complex systems as SRPUs, ensuring not only their reliability but also increased productivity and reduced operational costs.

The article highlights the advantages that BIM brings to the monitoring and maintenance of SRPUs. In particular, the importance of improving the accuracy of information is underscored, as it ensures the timely identification of potential deviations in system performance, allowing for prompt response to issues. This, in turn, helps maintain the continuity of production processes and reduces the risk of emergency situations.

Furthermore, the article analyzes the technical and organizational challenges that may arise during the implementation of BIM. Special attention is given to the integration of BIM with existing information systems, which is a crucial aspect for ensuring data completeness and accuracy. It is also important to note the necessity of training personnel to master new technologies and approaches, which will allow for the maximum effective utilization of BIM's potential.

A series of recommendations for the successful implementation of BIM technologies have been developed, with a particular focus on the detailed analysis of specific project needs, ensuring effective integration of BIM with other management systems, and the continuous updating of models in accordance with changes at the site. Following these recommendations will not only enhance the efficiency of SRPU operations but also ensure long-term stability and reliability of their functioning.

Thus, the implementation of BIM technologies becomes a key factor in improving the efficiency and

References

1. Fedorovych Ya.T. "Machines and Equipment for Oil and Gas Extraction: A Textbook." Ivano-Frankivsk: IFNTUOG, 2015. 344 pages.
2. Makhmudov S.A. "Installation, Operation, and Repair of Well Rod Pumping Units," pages 3-13.
3. Kopei V.B. "Scientific and Methodological Foundations of Automated Design of Rod Well Pumping Unit Equipment: in 2 parts. Doctoral Dissertation in Technical Sciences: 05.05.12." Ivano-Frankivsk, 2020.
4. Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/ae/solutions/bim> (accessed on 20.06.2024).
5. Kopei V.B., Kopei B.V., Kuzmin O.O. "Principles of Building a Model of a Well Rod Pumping Unit for the Maplesoft MapleSim 7 Environment."
6. Ray Crotty: "The Impact of Building Information Modelling: Transforming Construction."
7. Erica Epstein: "Implementing Successful Building Information Modeling."
8. Stefan Mordue, Paul Swaddle, David Philp: "Building Information Modeling For Dummies."
9. Exxonmobil site. URL: <https://corporate.exxonmobil.com>
10. Hlushko V.I. "Well Drilling Technology." Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. 458 pages.
11. Volodymyr Kopei, Oleh Onysko, Cristian Barz: "Designing a Multi-Agent PLM System for Threaded Connections Using the Principle of Isomorphism of Regularities of Complex Systems." *Machines* 2023, 11(2), 263.
12. Polishchuk O.G. "Design and Operation of Oil and Gas Wells." Kharkiv: KhNADU, 2018. 375 pages.

reliability of managing sucker rod pumping units, allowing for process optimization, cost reduction, and a higher level of safety during operation. Successful BIM implementation requires a comprehensive approach that considers all possible technical and organizational challenges, as well as ongoing adaptation to changing conditions and new technologies.

Keywords: *BIM technologies, Sucker Rod Pumping Units (SRPU), Maintenance, Equipment life cycle, Oil and gas industry*

Чеведа Андрій Мирославович – аспірант кафедри нафтогазового обладнання, спеціальності галузеве машинобудування, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, Cheverda.andriy@gmail.com.

Артим Володимир Іванович – д.т.н., професор кафедри будівництва та енергоефективних споруд Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, м.Івано-Франківськ, viartym@gmail.com.

Стаття подана 27.10.2024

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-44-49>

УДК 621.313.332

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ПРИ УРАХУВАННІ АКТИВНОГО ОПОРУ У КОНТУРІ КОМУТАЦІЇ РОТОРНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Стрункін Г.М.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR TAKING INTO ACCOUNT THE ACTIVE RESISTANCE IN THE ROTOR RECTIFIER COMMUTATION CIRCUIT

Strunkin H.M.

У статті наведено відомості про принципи урахування активного опору у контурі комутації роторного випрямляча асинхронного генератора з фазним ротором для машин малої та середньої потужності. Доводиться, що при використанні у якості генератора серійної асинхронної машини – кранового двигуна – при нехтуванні впливу активного опору ротора на процес комутації роторного випрямляча виникає похибка при розрахунку його механічної характеристики. Дано посилання на авторську методику розрахунку механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором з урахуванням змінного активного опору ротора від ковзання. Висвітлено мету та план експериментального дослідження. Описано експериментальний стенд для зняття механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором. Для створення проти-ЕРС роторного випрямляча використано послідовно ввімкнені діоди. Надані відомості про вимірвальні прилади, які використано в експерименті. Розкрито методику вимірювання кутової швидкості обертання вала асинхронного генератора. Описується методика обчислення моменту генератора, виходячи з моменту гонного двигуна та моменту втрат агрегату, яку апроксимовано за експериментальними даними. Наводяться результати експериментального дослідження механічної характеристики асинхронного генератора та порівняння з розрахунковими залежностями, отриманими за авторською методикою. Експеримент проведено для зменшеного значення статорної напруги для зменшення струму намагнічування генератора. Пояснено деяке відхилення експериментальних даних від теоретично розрахованих у зоні малих ковзань. Розповсюджується припущення Булгакова О.О. про вплив на

процес комутації випрямляча лише параметрів вторинної обмотки трансформатора на випадок з роторним випрямлячем асинхронного генератора з фазним ротором – лише параметрів ротора. Висновок містить інформацію про підтвердження механічних характеристик асинхронного генератора з фазним ротором, які отримано за теоретичними розрахунками, експериментальними даними.

Ключові слова: асинхронний генератор з фазним ротором, механічна характеристика, активний опір ротора, роторний випрямляч, комутація.

Вступ. З розвитком малої та середньої автономної вітроенергетики все більше уваги приділяється системам на базі асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР), або doubly-fed induction generator (DFIG) [1, 2], де більшість потужності знімається безпосередньо зі затискачів статора. Встановлена потужність перетворювача в ланцюзі ротора, призначеного для регулювання робочих режимів генератора, визначається, відповідно, потужністю ковзання [3]. Додаткове зниження вартості такої установки може бути досягнуто застосуванням серійного асинхронного двигуна, що використовується в генераторному режимі, що виключає витрати на розробку та впровадження спеціалізованих машин [4]. Аналіз існуючого ринку електричних машин із фазним ротором (малої та середньої потужності) [5] показав, що їх асортимент

вичерпується лише асинхронними двигунами краново-металургійної серії.

У даний час в літературі при аналізі електромагнітних процесів комутації у роторному випрямлячі не враховується вплив активного опору ротора [1, 6], що допустимо лише для великих машин, що працюють при відносно великих ковзаннях. Для кранових електроприводів узгодженого обертання, навпаки, враховують лише активний опір у контурі комутації [7]. А для випрямлячів у теорії комутації відношення активного опору первинного джерела (трансформатора) до реактивного прийнято постійним [8], тоді як у АГФР воно є функцією ковзання. У зв'язку з цим у машинах малої та середньої потужності, де активний опір досить великий, при розрахунку механічної характеристики виникає похибка.

Автором була презентована методика розрахунку механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором з урахуванням впливу активного опору ротора за допомогою регресійних моделей [9].

Метою роботи є експериментальне підтвердження методики розрахунку механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором з урахуванням впливу активного опору ротора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- розробка експериментального стенду;
- виготовлення експериментального стенду для зняття механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором;
- безпосереднє проведення експериментальних робіт.

План експерименту передбачає наступний обсяг робіт:

- зняття показників втрат;
- зняття механічних характеристик асинхронного генератора з фазним ротором.

Для повноцінного зіставлення розрахункових та експериментальних характеристик бажано мати результати вимірювань у діапазоні ковзань не менш критичного. Очевидно, що такі режими важко реалізувати при номінальній напрузі на обмотках статора, оскільки і струм в обмотках машини, і момент на валу будуть у кілька разів більшими за номінальні величини. Тому,

для подолання апаратних ускладнень та забезпечення нормального теплового режиму випробуваної машини, експериментальні характеристики генератора були зняті при напрузі на статичних обмотках рівній 55 В (1/4 від номінальної).

Для зняття характеристик генератора розроблено спеціалізований стенд, схема якого представлена на рис. 1.

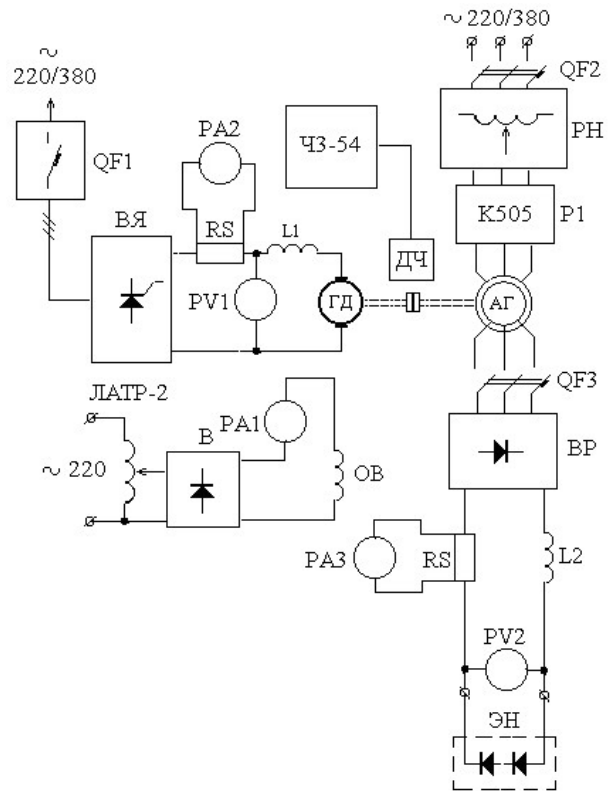


Рис. 1. Структурна схема випробувального стенду

Стенд містить генератор АГ, що випробовується, типу МТФ-111-6, який механічно зістикуваний з двигуном постійного струму (гонний двигун) ГД (типу ПН-52-2, потужністю 7,4 кВт, при 3000 об/хв). Статор АГ підключений до мережі промислової частоти через регулятор напруги РН (три автотрансформатори типу РНО-250-25). Вимірювальний комплект К505 дозволяє вимірювати струм, напругу та активну потужність у будь-якій з фаз генератора. У ланцюг ротора генератора включений діодний трифазний мостовий випрямляч ВР, на виході якого встановлені згладжуючий реактор L2, і еквівалент навантаження ЕН, який складається з 20 послідовно включених діодів типу ВД-10. Вихідний струм випрямляча та напруга на навантаженні вимірювалися відповідними

вимірювальними приладами магнітоелектричної системи (PV2, PA3).

Живлення обмотки збудження двигуна постійного струму ВВ здійснювалося від допоміжного випрямляча, вхідну напругу якого можна змінювати за допомогою регульовального автотрансформатора ЛАТР-2. Струм збудження двигуна вимірювався амперметром PA1 і під час проведення експерименту підтримувався постійним (1А).

Якір двигуна постійного струму живився від тиристорного випрямляча ВЯ, на виході якого встановлені згладжуючий реактор L1 і необхідні вимірювальні прилади (PA2, PV1). Крім того, стенд обладнаний належною захисною та комутаційною апаратурою.

Схему вимірювання швидкості обертання валу генератора наведено на рис. 2.

Вона складається з:

- диска, що обертається (поз. 1), який закріплений на сполучній муфті (поз. 2);
- інфрачервоного датчика ПЛТ1Д-0,25/3 з апертурою 0.25 мм (поз. 3), закріпленого на нерухомій платформі;
- пристрою сполучення (поз. 4);
- частотоміра ЧЗ-54 (поз. 5).

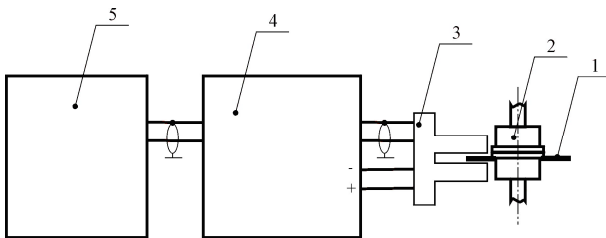


Рис. 2. Схема вимірювання швидкості обертання валу генератора

Зовнішнім краєм диск, що обертається, входить у проріз інфрачервоного датчика на глибину 8 мм і перетинає світловий потік від джерела до приймача випромінювання.

На зовнішній стороні диска розташований проріз у вигляді сектора з кутом 3° і глибиною 10 мм.

При обертанні диска проріз поєднується з прорізом датчика. У цей момент випромінювання від джерела потрапляє на фотоприймач, у результаті з'являється електричний сигнал на виході датчика. Сигнал датчика, після посилення та інвертування у пристрої сполучення, передається на частотомір ЧЗ-54. Частота

проходження імпульсів f відповідає частоті обертання валу генератора. Відносна похибка частотоміра $\delta_\omega = \delta_f = \pm 0.031\%$. Кутова частота обертання визначається формулою:

$$\omega = 2\pi f. \quad (1)$$

Електромагнітний момент генератора визначається через механічну потужність на валу:

$$M_{em} = \frac{P_{mex}}{\omega}, \quad (2)$$

де P_{mex} - механічна потужність генератора, ω - кутова швидкість валу генератора.

Механічна потужність може бути визначена з електричної потужності двигуна за відомих втрат в агрегаті. Позначимо ці втрати через загальні втрати ΔP_γ .

Таким чином, механічна потужність може бути визначена з виразу:

$$P_{mex} = P_{e.d.} - \Delta P_\gamma, \quad (3)$$

де $\Delta P_\gamma = I_\gamma^2 R_\gamma$ - втрати в обмотці якоря; I_γ - струм якоря, R_γ - опір обмотки якоря.

Електрична потужність двигуна визначається:

$$P_{e.d.} = U_\gamma \cdot I_\gamma, \quad (4)$$

де U_γ - напруга на якорі.

Таким чином, електромагнітний момент визначається з виразу:

$$M_{em.g.} = \frac{P_{mex}}{\omega} - M_\Pi, \quad (5)$$

де M_Π - момент втрат.

Момент втрат був знятий експериментально, після чого апроксимований залежністю:

$$M_\Pi = 1,589 + 0,00765\omega. \quad (6)$$

Механічна характеристика АГФР знімається шляхом вимірювання швидкості обертання валу генератора з подальшим розрахунком моменту.

Експеримент проводився у такому порядку:

1. Подається живлення обмотки збудження двигуна постійного струму.

2. Увімкнувши QF2, QF3, здійснити пуск асинхронної машини в руховому режимі.

3. Включити систему управління випрямляча ВЯ, встановивши кути управління 90 градусів, а також його напругу живлення (автоматичний вимикач QF1).

4. Збільшуючи напругу на обмотці якоря, встановити заданий струм якоря ГД, контролюючи його значення за амперметром РА2.

5. Зняти значення напруги якоря за приладом РВ1.

6. Зняти значення частоти обертання за показаннями частотоміра.

7. Зняти значення струму у ланці постійного струму за приладом РА3.

8. Встановити наступне значення струму якоря. Повторити виміри за пунктами 5...7.

9. Повторити пункти 4...8 під час замикання еквівалента навантаження (роторний випрямляч навантажений лише на реактор).

10. Вимкнути напругу живлення випрямляча ВЯ вимикачем QF1.

11. Вимкнути асинхронну машину вимикачами QF2, QF3.

12. Вимкнути живлення обмотки збудження.

На рис. 3 показані механічні характеристики асинхронного генератора, побудовані за методикою, представленою в [9], при припущенні, що було висунуто Булгаковим О.О. [8] про те, що опір ланцюга комутації визначається параметрами лише ланцюга ротора, тобто $X_a = X_2$ і $R_a = R_2$. На цьому рисунку точками нанесені результати експериментальних вимірювань, виконаних на стенді за описаною вище методикою.

Як видно з представленого рисунка, розрахункові та експериментальні результати досить близькі. Деяке відхилення експериментальних даних від розрахункових кривих, яке спостерігається при малих моментах, пояснюється зниженням напруги у ланці постійного струму роторного випрямляча, пов'язане зі зменшенням падіння напруги на діодах еквівалента навантаження при зменшенні струму.

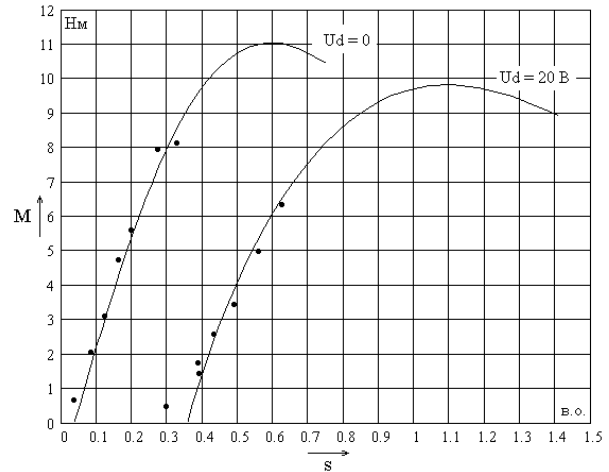


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень та зіставлення їх із розрахунком

Відсутність експериментальних точок з моментами, близькими до величини критичного моменту, пов'язана з апаратними обмеженнями (недостатня потужність узгоджуючого трансформатора на вході тиристорного випрямляча).

На рис. 4 показані механічні характеристики асинхронного генератора, побудовані при припущенні, що опір ланцюга комутації визначається параметрами ланцюга короткого замикання машини, тобто $X_a = X_2 + X_1'$ і $R_a = R_2 + R_1'$.

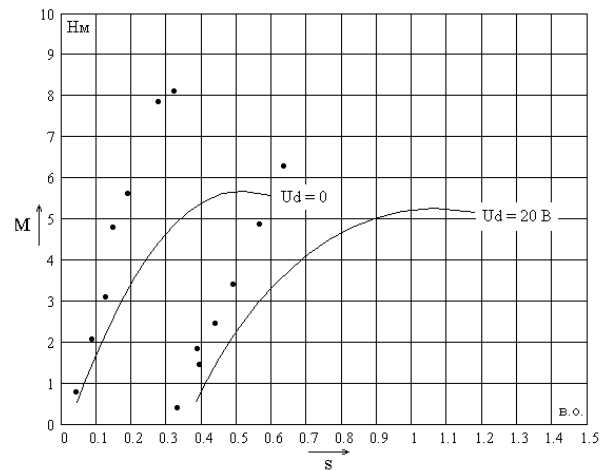


Рис. 4. Результати експериментальних досліджень та зіставлення їх з розрахунком при допущенні

$$X_a = X_2 + X_1' \text{ і } R_a = R_2 + R_1'$$

Порівняння представлених результатів дозволяє зробити висновок про те, що облік параметрів обмотки статора в процесах комутації роторного випрямляча призводить до істотного відхилення розрахункових результатів від результатів, які спостерігалися в експерименті.

Висновки. Експериментальне дослідження механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором підтвердило методику її розрахунку з урахуванням впливу роторного опору на процес комутації роторного випрямляча.

Експеримент розповсюдив припущення Булгакова О.О. про вплив на процес комутації випрямляча лише вторинної обмотки трансформатора, для випадка з АГФР – лише роторного ланцюга генератора.

Література

1. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.
2. Chakraborty, Subhadip & Singh, Bhim & Panigrahi, Bijaya & Roy, Suvom & Das, Souvik & Modi, Gaurav & Kumar, Arjun. Design, Modelling and Seamless Control of an Offgrid DFIG-Battery Energy Storage Based Wind Energy Conversion System for Remote Dwellings. 2024. 547-552. DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474928.
3. Patel M.R. Wind and solar power systems. CRC Press, Boca Raton, 1999. 283p.
4. Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Шуруб Ю.В., Джура А.В. Габаритная мощность асинхронной машины в генераторном режиме работы. / Техническая электродинамика. 2004. №2. С. 32-35.
5. Галузевий портал присвячений ринку електродвигунів. – URL: <http://dvigatel.info>, (дата звернення 12.06.2023).
6. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. - М.: Энергия, 1979. 200 с.
7. Андрієнко Д.С. Асинхронний електропривід узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів – Дис. ... кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Національний університет "Запорізька політехніка", Запоріжжя, 2020. 189 с.
8. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970. 320 с.
9. Переверзев А.В., Алексеевский Д.Г., Семенов В.В., Стрункин Г.Н., Таранец А.В. Влияние активного сопротивления ротора на механические характеристики асинхронной машины в генераторном режиме. / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. Кременчук: КДПУ, 2009. Вип. 3/2009 (56) Частина 1. С107-110.

References

1. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine:

Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.

2. Chakraborty, Subhadip & Singh, Bhim & Panigrahi, Bijaya & Roy, Suvom & Das, Souvik & Modi, Gaurav & Kumar, Arjun. Design, Modelling and Seamless Control of an Offgrid DFIG-Battery Energy Storage Based Wind Energy Conversion System for Remote Dwellings. 2024. 547-552. DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474928.
3. Patel M.R. Wind and solar power systems. CRC Press, Boca Raton, 1999. 283p.
4. Lesnik V.A., Mazurenko L.I., Shurub Yu.V., Dzhura A.V. Overall power of an asynchronous machine in generator mode of operation. / Technical Electrodynamics. 2004. No. 2. P. 32-35.
5. Industry portal of dedication to the market of electric motors. – URL: <http://dvigatel.info>, (date of publication 06/12/2023).
6. Onishchenko G.B., Lokteva I.L. Asynchronous valve cascades and double-supply motors. М.: Energia, 1979. 200 p.
7. Andrienko D.S. Asynchronous electric drive of mismatched rotation with pulse-current limitation in the circuit of electrically coupled rotor rectifiers. PhD sci. diss. Zaporizhzhya, 2020. 189p.
8. Bulgakov A.A. New theory of controlled rectifiers. – М.: Nauka, 1970. 320 p.
9. Pereverzev A.V., Alekseevsky D.G., Semenov V.V., Strunkin G.N., Taranets A.V. The influence of active rotor resistance on the mechanical characteristics of an asynchronous machine in generator mode. / Bulletin of the Kremenchutsk State Polytechnic University named after. M. Ostrogradsky. Kremenchuk: KDPU, 2009. VIP. 3/2009 (56) Part 1. C107-110.

Strunkin H.M. Experimental study of the mechanical characteristics of the asynchronous generator with a phase rotor taking into account the active resistance in the rotor rectifier commutation circuit

The article provides information about the principles of maintaining the active support in the commutation circuit of the rotor rectifier of an asynchronous generator with a phase rotor for machines of low and medium load. It is proven that when using a serial asynchronous machine as a generator - a crane motor - while neglecting the influence of the active resistance of the rotor on the commutation process of the rotary rectifier, an error occurs in the calculation of its mechanical characteristics. The author's method for developing the mechanical characteristics of an asynchronous generator with a phase rotor with a changeable active support for the rotor is given. The purpose and plan of the experimental study are highlighted. An experimental stand for measuring the mechanical characteristics of an asynchronous generator with a wound rotor is described. To create an anti-EMF rotary rectifier, diodes switched on in series were used. Information about the measuring devices used in the experiment is provided. The method of measuring the

angular speed of rotation of the shaft of an asynchronous generator is disclosed. The method of calculating the generator moment is described, based on the moment of the driving engine and the moment of losses of the unit, which is approximated by experimental data. The results of the experimental investigation of the mechanical characteristics of the asynchronous generator and the leveling of the deposits, which are attributed to the author's methodology, are presented. The experiment was carried out for a reduced value of the stator voltage to reduce the magnetizing current of the generator. Some deviation of the experimental data from the theoretically calculated ones in the zone of small slips is explained. The assumption of O.O. Bulgakov is spreading on the effect on the rectifier commutation process of only the parameters of the secondary winding of the transformer in the case of a rotor rectifier of an asynchronous generator with a phase

rotor - only the parameters of the rotor. The conclusion contains information about the confirmation of the mechanical characteristics of an asynchronous generator with a phase rotor, which were obtained according to theoretical calculations and experimental data.

Key words: *asynchronous generator with phase rotor, mechanical characteristics, active rotor support, rotary rectifier, commutation.*

Стрункін Гліб Миколайович – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка», Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні Запорізького національного університету. 69006, Запоріжжя, проспект Соборний, 226, e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Стаття подана 15.10.2024.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-50-58>

УДК 622.7: 534

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЇ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ВІДСТЕЖЕННЯ ПОРЯДКУ ОБЕРТОВИХ МАШИН

Моркун В.С., Моркун Н. В., Поркуян О.В., Грищенко С.М.,
Бобров Є. Ю., Грищенко Я.О.

DETERMINATION OF THE VIBRATION PARAMETERS OF A DRILLING RIG USING THE METHOD OF COMPUTED ORDER TRACKING OF ROTATING MACHINES

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuian O.V., Hryshchenko S.M.,
Bobrov E.Yu., Hryshchenko Ya.O.

Метою дослідження є визначення параметрів вібрації бурової установки в процесі буріння свердловин за допомогою методу відстеження порядку обертових машин. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні застосування методу відстеження обчисленого порядку обертових машин для визначення частоти на якій доцільно вимірювати статистичні параметри супутнього вібраційного сигналу. Практичне значення полягає у визначенні процедури вимірювання параметрів вібраційного сигналу бурової установки для оцінки фізико-механічних властивостей гірської породи безпосередньо в процесі буріння свердловин. Для виділення корисної складової вібраційного сигналу на буровому долоті з різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.) використаний метод відстеження обчисленого порядку (COT) обертових машин з додатковою передискретизацією для підвищення його роздільної здатності. Запропонований підхід полягає в тому, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, яка відповідає визначеному піковому порядку обертів, і на цій частоті вимірюють статистичні параметри змін амплітуди вимірюваного сигналу. Відповідно до застосованого методу сформовано карту частоти обертів для даних вібрації в процесі зміни робочого режиму бурової установки (підвищення впродовж 40 секунд частоти обертів приводу з 500 до 2150 обертів за хвилину). Аналіз виконаних експериментальних досліджень та

моделювання процесу взаємодії долота з залізо-вмісною гірською породою дозволяє зробити висновок про те, що отримані із застосуванням зазначеного методу статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин.

Ключові слова: буріння свердловин, вібрація, відстеження порядку, ознаки.

Вступ. Обертальне буріння є стандартним методом, що використовується в гірничій промисловості при розвідці та видобутку корисних копалин. Бурові установки, що застосовуються в даний час, сильно розрізняються за своєю конструкцією, призначенням і можливостями. Станіонарні бурові установки використовуються в основному для розвідувального буріння та при видобуванні вуглеводневої сировини, мобільні (пересувні) – для буріння експлуатаційних та вибухових свердловин.

Основними складовими частинами будь-якої бурової установки є приводний силовий блок із трансмісією, бурильна колона (штанга) та блок бурового інструменту. Крім того, використовуються ряд систем, що забезпечують процес буріння: система очищення свердловини і транспортування зруйнованої гірської маси; система моніторингу стану бурової установки; система керування процесом буріння. Силовий блок забезпечує підйом і опускання бурового інструменту, а також формує момент, що крутить, який за допомогою бурильної колони (штанги) передається від приводного двигуна на буровий інструмент. Долото, що обертається, руйнує

гірську породу, яка транспортується на поверхню гідравлічним (буровий розчин) або пневматичним (стиснене повітря) методом. Системи моніторингу стану та управління буровою установкою забезпечують її безперебійну експлуатацію та оптимізацію технічних та економічних показників процесу буріння.

Метою даної роботи є визначення параметрів вібрації бурової установки в процесі буріння свердловин за допомогою методу відстеження порядку обертових машин. Постановка завдання: дослідження методу відстеження порядку обертових машин для визначення параметрів вібрації бурового долота в процесі буріння свердловин.

Викладання основного матеріалу. Досягнення високих швидкостей проходки (ROP) є однією із основних цілей оптимізації керування процесом буріння.

ROP в першу чергу залежить від змін навантаження на долото (WOB) та швидкості обертання долота (RPM). Маючи на увазі весь можливий робочий діапазон змін WOB та RPM цей зв'язок є нелінійним. Це зумовлено закономірностями взаємодії долота з гірською породою і її змінними фізико-механічними характеристиками. Проблемним питанням для вирішення завдання оптимального керування бурінням свердловин є оперативне визначення фізико-механічних характеристик гірської породи, що буриться.

Зазвичай, долото і бурильна колона (штанга) обертаються за допомогою двигуна з верхнім приводом на поверхні. Оскільки механічна енергія передається від поверхні до долота, це призводить до нелінійної взаємодії між бурильною колоною та свердловиною, що викликає вібрацію бурильної колони. Поєднання маси, жорсткості та динамічних сил є факторами, які змушують систему вібрувати всіма можливими способами, а саме. аксіально, латерально та торсіонно.

У роботі [1] запропоновано модель бурової штанги із зосередженою масою, яка складається з двох ступенів свободи. Рівняння руху для осьового та крутильного рухів бурильної колони

$$m\ddot{x} + c_a\dot{x} + k_a(x - v_0 \times t) = -WOB, \quad (1)$$

$$J\ddot{\theta} + c_t\dot{\theta} + k_t(\theta - \Omega \times t) = -TOB, \quad (2)$$

де TOB , m , x , J , c_a , c_t , k_a , k_t , v_0 , θ , Ω - відповідно крутний момент на долоті, ефективна маса бурильної штанги, осьове зміщення, ефективний полярний момент інерції, коефіцієнт демпфування при осьовому русі, коефіцієнт

демпфування при крутильному русі, осьова жорсткість, жорсткість на кручення, початкова осьова швидкість, кутове зміщення долота і швидкість обертання поверхні в радіанах за секунду (RPS).

Осьові та крутильні рівняння руху (1), (2) пов'язані за рахунок сил взаємодії долота [1].

Маючи на увазі значну довжину бурової колони та наявність в її конструкції окремих елементів, крутильні рухи, що виникають у процесі буріння доцільно описати у вигляді сукупності зосереджених мас на валу, окремі частини якого можуть мати свої особливі характеристики. Модель подібної розподіленої системи для, наприклад, двох зосереджених мас може бути представлена у вигляді диференціальних рівнянь руху [2]

$$I_1\ddot{\theta}_1 + (k_1 + k_2)\theta_1 - k_2\theta_2 = 0; \quad (3)$$

$$I_2\ddot{\theta}_2 + (k_2 + k_3)\theta_2 - k_2\theta_1 = 0, \quad (4)$$

де k_i - крутильна жорсткість валу i ($i = 1, 2, 3$), що визначається як

$$k_i = \frac{G_i J_i}{l_i}, \quad (5)$$

де G_i – модуль жорсткості; J_i – полярний момент інерції; l_i – довжина валу; θ - кутове зміщення долота.

Наведені диференціальні рівняння руху в матричній формі мають наступний вигляд

$$\begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Контактна взаємодія шарошкового долота з гірською породою включає комбінацію динамічних та статичних зусиль, а вібрації, що виникають під час буріння свердловин, складаються з трьох складових: періодичні, ударні та випадкові, що визначаються особливостями структури та текстури матеріалу взаємодії. Розглядаючи простір, зайнятий контактом бурового долота з породою в момент часу t , як дискретну обмежену область Ω , математичну модель контактної взаємодії «бурове долото–порода» можна представити у наступному вигляді [3]

$$m\ddot{u} = p(t) + c(u, \alpha) - f(u, \beta), \quad (7)$$

де m – матриця маси; \ddot{u} – вектор прискорення; t – змінна часу; p – вектор зовнішньої сили; c – контактна сила та вектор тертя; f –

вектор внутрішньої напруги; u – переміщення об'єкта; a – змінна, пов'язана з властивостями контактної поверхні; β – змінна, пов'язана з конститутивним співвідношенням матеріалу.

У роботі [4] представлено модель реагування на буріння шарошkových доліт. Вона включає набір відношень між вагою на біт W , крутним моментом на долоті T , швидкістю проникнення V і кутовою швидкістю Ω . На відміну від моделей, які залежать від точного опису долота, реакція буріння досліджується шляхом об'єднання впливу геометрії долота на кілька параметрів і усереднення параметрів буріння (W, T, V, Ω) протягом принаймні одного оберту долота. У рамках моделі можна отримати кількісну інформацію з даних буріння, пов'язану з властивостями породи, станом долота та ефективністю буріння.

Феноменологічна модель, запропонована Detournay та Defourny [5], враховує, що ріжуча дія фрикційного долота PDC складається як з процесу різання, так і з процесу тертя. При цьому кожен окремий різець відчуває різну величину та напрямок сили, залежно від його розташування на профілі долота (рис. 1) [6].

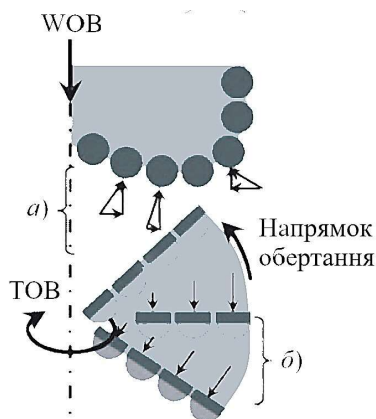


Рис. 1. Величина реактивних сил змінюється залежно від місця розташування різця долота PDC: a – реактивні сили на різці через WOB; b – реактивні сили на різці через TOB

Рівняння для крутного моменту на долоті T_b відображає момент нелінійного тертя, обумовлений взаємодією породи і долота, що зазнає переривчастого прослизання [6]

$$T_b = D_b W_b [\mu_{cb}(w_b) + (\mu_{sb} - \mu_{cb})e^{-\lambda|w_b|}], \quad (8)$$

де μ_{cb} та μ_{sb} – статичні коефіцієнти сухого та кулонівського тертя; λ – коефіцієнт загасання, рівний 0,9; w_b – кутова швидкість долота.

Таким чином, з наведених результатів виконаних досліджень можна зробити висновок, що в процесі контактної взаємодії бурового долота з гірською породою формуються вібраційні коливання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві, які несуть інформативні характеристичні ознаки цієї взаємодії. Для вилучення цієї інформації пропонується використати метод відстеження порядку обертових машин.

Постановка завдання: дослідження методу відстеження порядку обертових машин для визначення параметрів вібрації бурового долота в процесі буріння свердловин.

Вібрації, що виникають на долоті в процесі буріння свердловин, представляють складний коливальний процес

$$X(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A(t) \cos[kw_0(t) + \varphi_k(t)] + \xi_w(t). \quad (9)$$

Він включає накладання на квазіполігармонічний процес - в області низьких та середніх частот, випадкового широкосмугового стаціонарного процесу $\xi_w(t)$ - в області високих частот [7,8].

Відповідна інформація щодо взаємодії долота з гірською породою в процесі буріння свердловин, міститься у височастотній випадковій складовій вібраційного сигналу. Виділення цієї корисної інформації та визначення характеристичних ознак для ідентифікації фізико-механічних характеристик гірської породи здійснюється із використанням спектрального аналізу. Шляхом Фур'є-перетворення визначається спектральна щільність потужності цього сигналу [9]

$$S_T(w) = \frac{1}{T} [H_T(jw)]^2, \quad 0 < t < T, \quad (10)$$

де $H_T(jw) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(w) e^{-jw t}$ - частотне подання сигналу.

З цього сигналу виділялася вузькосмугова компонента $\xi_{\Delta}(t)$ з найбільшою потужністю [7]

$$\xi_{\Delta}(t) = A[1 + mB(t)\cos(w_{\Delta}t + \varphi_0)], \quad (11)$$

де $0 < m < 1$ - глибина модуляції.

У цьому виразі

$$B(t) = \sum_{k=1}^n C_k \cos(k\Omega t + \varphi), \quad (12)$$

тобто представляє амплітудномодульований процес виду

$$\xi(t) = A[1 + \sum_{k=1}^n m_k C_k \cos(k\Omega t + \varphi)] \cdot \cos(\omega_{\Delta} t + \varphi_0), \quad (13)$$

де m_k - парціальний коефіцієнт модуляції; Ω - кутова частота модуляції.

Головним питанням в цій процедурі є визначення ознак за якими виділяється $\xi_{\Delta}(t)$. Від цього залежить наскільки інформація щодо процесу взаємодії долота з гірською породою захищена від впливу різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.).

Ідея запропонованого методу полягає в тому, щоб застосувати формування та аналіз карти порядку обертів обертових частин бурової установки в процесі буріння свердловин для ідентифікації долота у частотній області вимірюваного супутнього інтегрованого вібраційного сигналу як джерела високоамплітудної вібрації.

Існують різноманітні методи відстеження порядку обертів машин. Традиційне відстеження порядку безпосередньо здійснює вибірку аналогового сигналу вібрації з постійним кроком валу Du з використанням аналогових пристроїв. Зазвичай це включає синтезатор відносин і фільтр спостереження згладжування. Частотомір може бути включений для контролю швидкості валу. Синтезатор відносин генерує сигнал, пропорційний швидкості валу машини. Цей вихід використовується для керування частотою вибірки та частотою зрізу аналогового фільтра стеження, фільтра нижніх частот з регульованою частотою зрізу. Після отримання зазначеного блоку даних, відібраних при постійному Du (вибірки кутового домену), обчислюється швидке перетворення Фур'є (ШПФ), у результаті виходить спектр порядку. Пов'язана з цим вартість та складність обладнання обмежують його використання. Аналоговий підхід також схильний до помилок: відомо, що обладнання, що використовується, має проблеми з відстеженням швидко мінливих швидкостей валу [10].

Широке поширення, головним чином для визначення несправностей машин і механізмів, знайшли: метод відстеження обчисленого порядку (СОТ), метод на основі фільтра Вольда-Калмана (VKF-ОТ), метод з використанням перетворення Габора, метод перетворення відстеження порядку та ін.

СОТ по суті полягає в перетворенні сигналу часової області, відібраного за теоремою про вибірку Шеннона-Найквіста, у сигнал кутової області. Обладнання збирає сигнал імпульсу швидкості осі з однаковим інтервалом часу для

обчислення рівного кутового часу, потім алгоритм інтерполяції використовується для інтерполяції та підгонки часу повторної дискретизації для отримання остаточного сигналу кутової області [11].

Формула розрахунку коефіцієнта порядку I виводиться з формули для розрахунку швидкості

$$I = 60f/n_0, \quad (14)$$

де f - частота вібрації; n_0 - швидкість.

Повторна вибірка в кутовій області для СОТ подібна до дискретизації сигналу в часовій області

$$Q_s \geq 2 \times Q_{max}. \quad (15)$$

де Q_s - частота дискретизації порядку; Q_{max} - максимальний порядок.

Максимальний порядок сигналу може бути обмежений фільтрацією низьких частот, а найвищий порядок визначається частотою зрізу f_c фільтра низьких частот. Таким чином, відповідно до максимальної n_{max} і мінімальної швидкості n_{min} опорного валу для розрахунку Q_{max}

$$f_c = n_{max} \times Q_{max}/60, \quad (16)$$

$$Q_{max} = 60 \times f_c/n_{min}. \quad (17)$$

Кутову частоту дискретизації можна розрахувати з максимального порядку сигналу. Якщо вісь відліку рівноприскорена протягом короткого проміжку часу, кут повороту θ можна представити виразом

$$\theta(t) = b_0 + b_1 + b_2 t^2, \quad (18)$$

де b_0 , b_1 , b_2 - невідомі коефіцієнти, які необхідно обчислити.

Щоб вирішити цю задачу потрібні три послідовні імпульси t_1 , t_2 , t_3 . Відповідно кут становить θ_1 , θ_2 , θ_3 , різниця фаз між двома точками якої дорівнює $\Delta\theta$. Використовуючи такий підхід можна отримати рівний кутовий час t_i під будь-яким кутом [11]

$$t_i = \frac{1}{2b_2} \left[\sqrt{4b_2(\theta_i - b_0) + b_1^2} - b_1 \right], \quad (21)$$

де t_i - часовий ряд, отриманий від повторної вибірки кутової області.

Тобто цей процес є обчисленням рівного кутового часу. Метод потребує інтерполяції часових рядів рівних кутів, щоб отримати повторно дискретизований сигнал. Обмеженням застосування цього методу є кінцева роздільна здатність порядку. Це спричиняє проблеми, коли порядки не потрапляють на спектральні лінії.

Метод VKF-OT спирається на рівняння даних та структурне рівняння. Рівняння даних фільтра Вольда-Калмана другого покоління для фільтрації одного порядку визначається як [12]

$$y(n) = x(n)e^{j\theta(n)} + \eta(n), \quad (22)$$

де $y(n)$ - виміряні дані, $x(n)$ - комплексна огинаюча відфільтрованого сигналу, $e^{j\theta(n)}$ - комплексна несуча хвиля.

$$\theta(n) = \sum_{i=1}^n w(i) \Delta t, \quad (23)$$

де $w(i)$ - дискретна кутова частота; $\eta(n)$ - випадковий шум та інші компоненти порядку, або помилка.

Структурне рівняння забезпечує гладкість послідовних цифрових точок відфільтрованих даних, підганяючи поліном низького порядку послідовності $x(n)$. Ця умова забезпечується за допомогою структурного рівняння з невідомим членом неоднорідності $\varepsilon(n)$ у правій частині рівняння. Порядок полінома означає кількість полюсів фільтра. Наприклад, структурне рівняння для двополюсного фільтра визначається як [12]

$$x(n) - 2x(n+1) + x(n+2) = \varepsilon(n) \quad (24)$$

Цей метод дозволяє вилучати близькі порядки, та такі, що перетинаються, в системах з декількома валами і відрізняється більш високою роздільною здатністю по частоті і порядку, ніж звичайні методи. Однак слід мати на увазі, що оскільки метод VKF-OT вимагає більшого часу розрахунку, він мало підходить для обробки у реальному часі.

При виділенні порядку сигналу на основі перетворення Габора центральна частота зазвичай визначається методом лінійної інтерполяції. На цій основі смугу пропускання фільтра визначається рівночастотним або рівнопорядковим методом. Якщо q -та центральна частота $f_q(t)$ і рівночастотна смуга частот Δf є константою, околиці фільтрації можуть бути представлені рівнянням [13]

$$f_q(t) \pm \frac{\Delta f}{2} = \left[f_q(t) - \frac{\Delta t}{2}, f_q(t) + \frac{\Delta t}{2} \right]. \quad (25)$$

Смуга пропускання рівного порядку Δo змінюється залежно від центральної частоти фільтра та її відношення до центральної частоти $f_q(t)$ є константою. Околиці фільтрації методу рівного порядку можна представити за допомогою рівняння [13]

$$\begin{cases} f_q(t) \pm \frac{\Delta f}{2} = \left[\left(q - \frac{\Delta o}{2} \right) \times f_1(t), \left(q + \frac{\Delta o}{2} \right) \times f_1(t) \right] \\ \Delta f = \Delta o \times f_1(t) \end{cases} \quad (26)$$

Потім за допомогою алгоритму маскуванню отримується коефіцієнт Габора відповідного порядку в сигналі. Алгоритм полягає у встановленні двійкового маскуючого масиву з тим самим розміром, що й $C_{m,n}^q$, відповідно до околиці фільтрації, що змінюється в часі, тоді підмножина коефіцієнта Габора виділяється відповідно до операції рівняння

$$C_{m,n}^q = \begin{cases} C_{m,n}, & \Phi_{m,n} = 1, \\ 0, & \Phi_{m,n} = 0. \end{cases} \quad (27)$$

Метод, заснований на перетворенні Габора, вимагає менше часу для реалізації в порівнянні з методом VKF-OT, але при цьому поступається йому в точності.

Перетворення відстеження порядку – це математичні перетворення, які за один крок виконують як відстеження порядку (синхронізацію домену сигналу з опорним валом), так і перетворення Фур'є для оцінки амплітуди та фази кожного порядку отриманого таким чином спектру. За допомогою таких перетворень можна безпосередньо оцінити амплітуду синхронних, субсинхронних або суперсинхронних синхронізованих гармонік без додаткового етапу передискретизації. Прикладом формулювання таких перетворень є швидкісне синхронне дискретне перетворення Фур'є, що визначається таким чином [14]

$$X(\Omega) = \frac{\Delta t}{\Theta} \sum_{n=1}^N x(n\Delta t) e^{-j\Omega\theta(n\Delta t)} w(n\Delta t), \quad (28)$$

де Ω - порядок гармонік, які потрібно оцінити, Θ - повний кутовий поворот валу у вікні збору, θ та w - миттєве кутове обертання і швидкість опорного валу.

Відомі й інші методи відстеження порядку машин, що обертаються, кожен з яких має свої переваги і недоліки. Очевидно, що вибір

конкретного з них залежить від особливостей та умов розв'язуваного завдання.

Для аналізу сигналів вібрації долота в процесі буріння свердловин у залізорудному масиві використаний метод COT із застосуванням функцій Matlab з додатковою передискретизацією для підвищення його роздільної здатності [15].

Відповідно до застосованого методу сформовано карту частоти обертів для даних вібрації в процесі зміни робочого режиму бурової установки (підвищення впродовж 40 секунд частоти обертів приводу з 500 до 2150 обертів за хвилину (рис. 2).

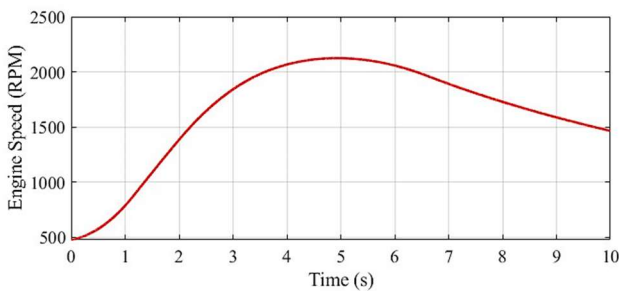


Рис. 2. Зміна робочого режиму бурової установки.

На рис. 3 наведена отримана карта порядку обертових частин бурової установки

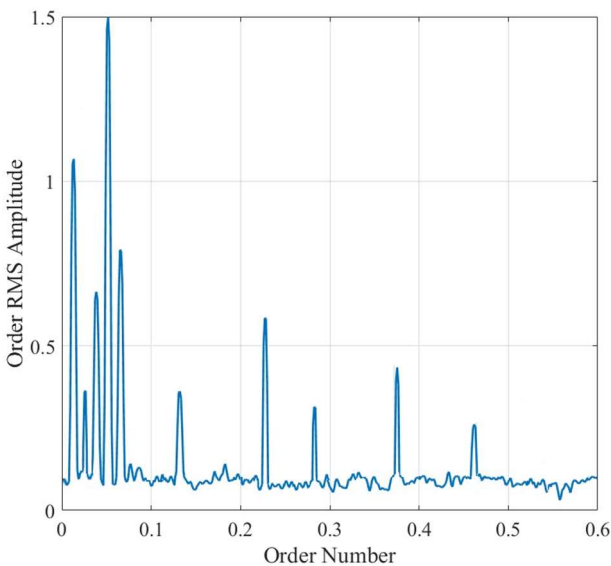


Рис.3. Карта порядку обертових частин бурової установки

На рис. 4 наведено результати виділення у часовій області із загального вібраційного сигналу порядкової складової на долоті впродовж зміни робочого режиму бурової установки, що стосується трьох типів залізної руди.

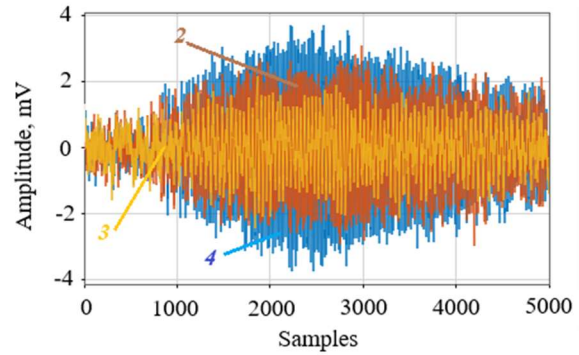


Рис. 4. Порядкові сигнали на долоті, що відповідають трьом типам залізної руди

В таблиці наведено статистичні характеристики порядкових сигналів на долоті, що відповідають трьом типам залізної руди: Mean – середнє значення; Median – медіанне значення; RMS – середньоквадратичне значення; STD – стандартне відхилення; VAR – дисперсія).

Таблиця

Параметри аналізованого сигналу вібрації бурової установки у часовій області

Параметр	Mean	Median	RMS	STD	VAR
Сигнал 1	1.334	1.3701	1.4556	0.6072	0.3687
Сигнал 2	0.9736	0.9996	1.0716	0.4477	0.2004
Сигнал 3	0.6180	0.6155	0.6819	0.2881	0.0830

Аналіз виконаних експериментальних досліджень та моделювання процесу взаємодії долота з гірською породою дозволяє зробити висновок про те, що отримані статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин.

Слід відмітити виражену залежність характеристик отриманих вібраційних сигналів від вмісту оксидів заліза Fe_2O_3+FeO . Так, наведені у таблиці дані відповідають залізній руді із вмістом Fe_2O_3+FeO 42,2, 23,5, 16,5 (%), а загальна кореляція RMS отриманих сигналів з цим показником становить 81-85 для руд з різним мінералогічним складом. Це можна пояснити переважною твердістю і міцністю зазначених складових над іншими. Разом з тим, слід зазначити, що, за умов різноманіття мінерального складу та текстурно-структурних особливостей залізної руди, використання тільки наведених параметрів вібраційного сигналу недостатньо для надійного визначення її мінералого-технологічних різновидів.

Висновки. В процесі енергоємної контактної взаємодії бурового долота з гірською породою формуються вібраційні коливання різної амплітуди і частоти як у самому долоті, так і у гірському масиві, які несуть інформативні характеристичні ознаки цієї взаємодії. Проблемним питанням є виділення корисної складової вібраційного сигналу з різноманітних завад (вібрації інших частин бурової установки, зовнішні процеси у гірському масиві і т. і.). Для вилучення цієї інформації використаний метод відстеження обчисленого порядку (COT) обертових машин із застосуванням функцій Matlab з додатковою передискретизацією для підвищення його роздільної здатності. Запропонований підхід полягає в тому, що в процесі зміни робочого режиму приводу обертових частин бурової установки формують карту порядку в усьому діапазоні його обертів, визначають частоту високоамплітудної вібрації долота, яка відповідає визначеному піковому порядку обертів, і на цій частоті вимірюють статистичні параметри змін амплітуди вимірюваного сигналу.

Аналіз виконаних експериментальних досліджень та моделювання процесу взаємодії долота з гірською породою дозволяє зробити висновки про те, що отримані із застосуванням зазначеного методу статистичні показники супутнього вібраційного сигналу дійсно адекватно характеризують процес буріння свердловин. Однак використання тільки визначених параметрів вібраційного сигналу недостатньо для надійного визначення фізико-механічних характеристик та мінералого-технологічних різновидів залізо-вмісної гірської породи.

Напрямом подальших досліджень є визначення найкращої комбінації характеристичних ознак процесу взаємодії бурового долота з гірською породою при бурінні свердловин та інтелектуальних методів оброблення отриманої інформації [16,17].

Л і т е р а т у р а

- Sharma, A. Al Dushaishi, M. Nygaard, R. Fixed bit rotary drilling failure criteria effect on drilling Vibration. *ARMA 21–2083*. 2021. https://www.researchgate.net/publication/349537048_Fixed_bit_rotary_drilling_failure_criteria_effect_on_drilling_vibration.
- Dukkipati, R. Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB. *New Age International*. 2007. ISBN 10: 8122420648 - ISBN 13: 9788122420647.
- Liu, X., Kou, H., Ma, X., He, M. Investigation of the Rock-Breaking Mechanism of Drilling under Different Conditions Using Numerical Simulation. *Applied Sciences*. 2023. 13(20):11389. <https://doi.org/10.3390/app132011389>.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- Detournay, D., Defourny, P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics*, 29(1), 1992. 13–23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
- Patil, P. A., Teodoriu, C. Analysis of Bit–Rock Interaction During Stick–Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. *OIL GAS European Magazine*, 3, 2013. 124-129. <https://www.researchgate.net/publication/271192233>.
- Егамбердієв, І.П. *Методи оцінки технічного стану бурових верстатів*. Навої: вид-во ім. Алішер Навої. 2019. ISBN 978-9943-5884-4-8.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- Flegner, P.; Kačur, J.; Durdán, M.; Laciak, M. Evaluation of the Acceleration Vibration Signal for Aggregates of the Horizontal Drilling Stand. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3984. <https://doi.org/10.3390/app12083984>.
- Wang, K. S., Heyns, S. Vold-Kalman Filter Order Tracking in Vibration Monitoring of Electrical Machines. *Journal of Vibration and Control*, 2009. 15(9),1325-1347. DOI:10.1177/1077546308094431.
- Jia, G., Guo, F., Wu, Z., Cui, S., Yang, J. A noise reduction method for multiple signals combining computed order tracking based on chirplet path pursuit and distributed compressed sensing. *Structural Durability & Health Monitoring*, 17(5), 2023. 383-405. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2023.026885>.
- Wang, K. S., Heyns, P. S. Application of computed order tracking, Vold-Kalman filtering and EMD in rotating machine vibration, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 2011. 416-430.
- Wang, T., Zhang, L., Qiao, H. and Wang, P. Fault diagnosis of rotating machinery under time-varying speed based on order tracking and deep learning. *Journal of Vibroengineering*, 22 (2), 2020. 366-382, <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20784>.
- Borghesani P., Pennacchi P., Chatterton S., Ricci R. The velocity synchronous discrete Fourier transform for order tracking in the field of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.03.026>.
- Brandt, A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. 2011. URL: <http://surl.li/tyves>.
- Morkun, V.S., Morkun, N.V., Tron, V.V., Serdiuk, O.Y., Haponenko, A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties

recognition. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 2023. с. 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019>.

17. Morkun, V., Fischerauer, G., Morkun, N., Tron, V., Haponenko, A. Determining Rock Varieties on The Basis of Fuzzy Clustering of Ultrasonic Measurement Results. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, 2022. 274-283.

References

- Sharma, A. Al Dushaishi, M. Nygaard, R. Fixed bit rotary drilling failure criteria effect on drilling Vibration. - *ARMA 21-2083*. 2021. https://www.researchgate.net/publication/349537048_Fixed_bit_rotary_drilling_failure_criteria_effect_on_drilling_vibration.
- Dukkipati, R. Solving Vibration Analysis Problems Using MATLAB. *New Age International*. 2007. ISBN 10: 8122420648 - ISBN 13: 9788122420647.
- Liu, X., Kou, H., Ma, X., He, M. Investigation of the Rock-Breaking Mechanism of Drilling under Different Conditions Using Numerical Simulation. *Applied Sciences*. 2023. 13(20):11389. <https://doi.org/10.3390/app132011389>.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- Detournay, D., Defourny, P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. *International Journal of Rock Mechanics and Geomechanics*, 29(1), 1992. 13-23. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91041-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)91041-3).
- Patil, P. A., Teodoriu, C. Analysis of Bit-Rock Interaction During Stick-Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. *OIL GAS European Magazine*, 3, 2013. 124-129. <https://www.researchgate.net/publication/271192233>.
- Ehambardiiev, I.P. Metody otsinky tekhnichnoho stanu burovnykh verstativ. Navoi: vyd-vo im. Alisher Navoi. 2019. ISBN 978-9943-5884-4-8.
- Franca, L. F. P. Drilling Action of Roller-Cone Bits: Modeling and Experimental Validation. *ASME. J. Energy Resour. Technol.* 2011. 132(4): 043101. <https://doi.org/10.1115/1.4003168>.
- Flegner, P.; Kačur, J.; Durdán, M.; Laciak, M. Evaluation of the Acceleration Vibration Signal for Aggregates of the Horizontal Drilling Stand. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3984. <https://doi.org/10.3390/app12083984>.
- Wang, K. S., Heyns, S. Vold-Kalman Filter Order Tracking in Vibration Monitoring of Electrical Machines. *Journal of Vibration and Control*, 15(9), 2009. 1325-1347. DOI:10.1177/1077546308094431.
- Jia, G., Guo, F., Wu, Z., Cui, S., Yang, J. A noise reduction method for multiple signals combining computed order tracking based on chirplet path pursuit and distributed compressed sensing. *Structural Durability & Health Monitoring*, 17(5), 2023. 383-405. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2023.026885>.
- Wang, K. S., Heyns, P. S. Application of computed order tracking, Vold-Kalman filtering and EMD in rotating machine vibration, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 2011. 416-430.
- Wang, T., Zhang, L., Qiao, H. and Wang, P. Fault diagnosis of rotating machinery under time-varying speed based on order tracking and deep learning. *Journal of Vibroengineering*, 22 (2), 2020. 366-382, <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20784>.
- Borghesani P., Pennacchi P., Chatterton S., Ricci R. The velocity synchronous discrete Fourier transform for order tracking in the field of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.03.026>.
- Brandt, A. *Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. 2011. URL: <http://surl.li/tyves>.
- Morkun, V.S., Morkun, N.V., Tron, V.V., Serdiuk, O.Y., Haponenko, A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties recognition. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 2023. с. 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019>.
- Morkun, V., Fischerauer, G., Morkun, N., Tron, V., Haponenko, A. Determining Rock Varieties on The Basis of Fuzzy Clustering of Ultrasonic Measurement Results. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, 2022. 274-283.

Morkun V.S., Morkun N.V., Porkuian O.V., Hryshchenko S.M., Bobrov E.Yu., Hryshchenko Ya.O. Determination of the vibration parameters of a drilling rig using the method of computed order tracking of rotating machines

The aim of the study is to determine the vibration parameters of a drilling rig during well drilling using the method of tracking the order of rotating machines. The paper uses methods of analyzing domestic and foreign experience, methods of mathematical modeling, as well as methods of mathematical statistics and probability theory to form an assessment of the research results. The scientific novelty is to substantiate the use of the method of tracking the calculated order of rotating machines to determine the frequency at which it is advisable to measure the statistical parameters of the accompanying vibration signal. The practical significance lies in determining the procedure for measuring the parameters of the vibration signal of a drilling rig to assess the physical and mechanical properties of rock directly during well drilling. To extract the useful component of the vibration signal on the drill bit from various interferences (vibrations of other parts of the drilling rig, external processes in the rock mass, etc.), the method of tracking the computed order (COT) of rotating machines with additional oversampling to increase its resolution is used. The proposed approach consists in the fact that in the process of

changing the operating mode of the drive of the rotating parts of the drilling rig, an order map is formed over the entire range of its rotation, the frequency of high-amplitude vibration of the bit corresponding to the determined peak order of rotation is determined, and at this frequency, the statistical parameters of changes in the amplitude of the measured signal are measured. In accordance with the applied method, a speed map was generated for the vibration data in the process of changing the operating mode of the drilling rig (increasing the drive speed from 500 to 2150 rpm within 40 seconds) Analysis of the experimental studies and modeling of the interaction of the bit with iron-containing rock allows us to conclude that the statistical parameters of the accompanying vibration signal obtained using this method really adequately characterize the process of well drilling.

Keywords: well drilling, vibration, order tracking, signs.

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівський національний університет імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Поркуян Ольга Вікторівна – д-р техн. наук, проф., ректор Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), porkuyan@snu.edu.ua.

Грищенко Світлана Миколаївна – к.пед.н., старший дослідник, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com.

Бобров Євген Юрійович – аспірант Криворізького національного університету (Кривий Ріг), smgrischenko@gmail.com.

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischenckokgtl@gmail.com.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-59-64>

УДК 004.92[621:744]

ВАЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗНАТЬ З НАРИСНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ПРИ РОЗРОБЦІ ЕСКІЗУ

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Дуришев О. А.

THE IMPORTANCE OF USING DESCRIPTIVE GEOMETRY KNOWLEDGE WHEN DEVELOPING A SKETCH

Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Duryshch O. A.

Нарисна геометрія є забезпечувальною дисципліною не тільки курсу креслення, до чого фактично зведена її роль на сьогодні в системі вищої технічної освіти, а будучи розділом математики, вона слугує базою прикладної геометрії, що розв'язує оптимізаційні багатопараметричні, багатофакторні задачі конструювання, технології, економіки, соціології тощо. Основним завданням цієї публікації є викладення точки зору автора на роль і місце нарисної геометрії, а також необхідності використання її під час розроблення ескізів. Конструкторські документи, призначені для одноразового використання, можуть виходити в ескізному вигляді. Ескіз - це зображення, виконане без застосування креслярських інструментів, від руки, за правилами аксонометрії в окомірному масштабі з дотриманням пропорцій деталі. При цьому дотримуються тих самих правил, що й під час побудови аксонометричних проєкцій: під тими самими кутами розташовують осі, розміри відкладають уздовж осей або паралельно їм. У низці випадків за ескізами складають робочі креслення. В деяких випадках ескізи використовуються для виготовлення за ними деталей. Сучасний студент має прагнути не тільки вищого ступеня оволодіння спеціальними знаннями, вміннями та навичками, а й поетапно просуватися від діяльності під керівництвом педагога до самонавчання. Вища школа має готувати фахівця інтегрального типу мислення, здатного до синтезу знань, умінь на всіх етапах і рівнях безперервної освіти. Дисципліна «Нарисна геометрія» сприяє розвитку просторового абстрактного мислення, яке необхідне для інженерної та проєкційної діяльності [6]. Здобувачі вищої освіти інженерних спеціальностей у своїй професійній діяльності стикаються з розробкою проєктів конструкцій, механізмів та машин, що потребує знань теорії проєкційних зображень. Сучасні методики навчання приділяють значну увагу використанню інформаційно-освітнього середовища – системи доступних

користувачеві джерел інформації, способів і засобів її обробки, а також умов інформаційної взаємодії суб'єкта з цими джерелами. У комплексі дисциплін графічного циклу, які вивчаються у ВНЗ, весь час відбуваються великі зміни. Нині активно використовують і вивчають комп'ютерні технології розроблення конструкторської документації. Це необхідно, і це визнають усі. Каменем спотикання залишається нарисна геометрія. Чи потрібна вона як навчальна дисципліна? Навіщо потрібна нарисна геометрія студентам технічних вишів? Такі запитання ставлять як прихильники, так і противники дисципліни. На ці та інші питання спробували дати відповіді автори даної статті.

Ключові слова: ескіз, графічні дисципліни, кресленик, нарисна геометрія, модель, формоутворення.

Вступ. Нарисна геометрія - одна з основних загальнотехнічних дисциплін, що становлять основу інженерної освіти.

Французький учений Гаспар Монж (1746-1818), якого за правом вважають творцем нарисної геометрії, так визначив мету і завдання цієї науки:

«Ця наука має дві головні цілі.

Перша – точне представлення на кресленні, що має тільки два виміри, об'єктів тривимірних, які можуть бути точно задані. З цього погляду - це мова, необхідна інженеру, який створює якийсь проєкт, а також усім тим, хто має керувати його здійсненням, і, нарешті, майстрам, які мають самі виготовляти різні частини.

Друга мета нарисної геометрії – виводити з точного опису тіл усе те, що неминуче впливає з їхньої форми та взаємного розташування. У цьому сенсі – це засіб шукати істину; вона дає

нескінченні приклади переходу від невідомого до відомого; і оскільки вона завжди має справу з предметами, яким притаманна найбільша ясність, необхідно ввести її в систему освіти. Вона придатна не тільки для того, щоб розвивати інтелектуальні здібності великого народу і тим самим сприяти вдосконаленню роду людського, але вона необхідна для робітників, мета яких – надавати тілам певних форм; і саме, головним чином, через те, що методи цього мистецтва до цього часу були мало поширеними або навіть зовсім не привертати уваги, розвиток промисловості йшов так повільно...» [7].

Крім цього, нарисна геометрія розвиває здатність абстрактно мислити, розвиває просторові уявлення – якості, які абсолютно необхідні для інженерної практики, для розв'язання прикладних задач.

Будучи теоретичною основою інженерної графіки, нарисна геометрія ставить за мету:

- ознайомити тих, хто вивчає її, з методами побудови зображень просторових форм на площині, тобто *навчити складати кресленик*;
- розвинути здатність уявного відтворення просторового виду зображеного на кресленку предмета, тобто *навчити читати кресленик*;
- дати знання і необхідні навички для графічного розв'язання задач, пов'язаних із просторовими формами, тобто *навчити графічно розв'язувати задачі з нарисної геометрії*.

Потрібно відмітити важливу роль використання знань з нарисної геометрії при виконанні ескізу деталі з натури.

Конструкторські документи, призначені для одноразового використання, можуть виконуватися в ескізному виді. Ескіз – це зображення, виконане без застосування креслярських інструментів, від руки, за правилами аксонометрії в окомірному масштабі з дотриманням пропорцій деталі. При цьому дотримуються тих самих правил, що й під час побудови аксонометричних проєкцій: під тими самими кутами розташовують осі, розміри відкладають уздовж осей або паралельно їм. У ряді випадків за ескізами складають робочі кресленики. В деяких випадках ескізи використовуються для виготовлення за ними деталей.

Таким чином, знання дисципліни «Нарисна геометрія», безумовно, необхідне усім тим, кому в практичній діяльності доводиться звертатися до креслеників, хто має прямий або непрямої стосунок до техніки.

Викладення основного матеріалу. У комплексі дисциплін графічного циклу відбулися і

відбуваються великі зміни. Нині активно використовують і вивчають комп'ютерні технології розроблення конструкторської документації. Це необхідно, і це визнають усі. Каменем спотикання залишається нарисна геометрія. Чи потрібна вона як навчальна дисципліна? Навіщо потрібна нарисна геометрія студентам технічних вишів? Такі запитання ставлять як прихильники, так і противники дисципліни [1,5].

Відповідь може бути простою: щоб не було безграмотних ескізів (рис. 1, а), 3D-моделей (рис. 1, б) та асоціативних креслеників, побудованих за моделлю (рис. 1, в).

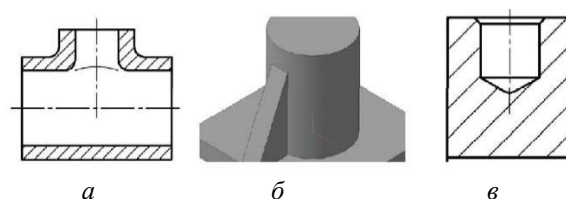


Рис. 1. Приклади ескізу (а), 3D-моделі (б) і кресленика (в)

На рисунку 1 наведено дуже прості приклади з практики. Але допущені в них помилки зовсім не очевидні, як це може здатися викладачам нарисної геометрії. Приклади демонструють, як незнання теорії дисципліни впливає на якість конструкторських документів. Будь-яких документів! Зокрема 3D-моделі деталі та кресленику, отриманого за допомогою моделі [2]. Адже щоб обрати оптимальний алгоритм створення моделі, потрібно знати теорію формоутворення. Щоб оцінити правильність моделі, потрібно не просто уявляти її задалегідь, а й уміти аналізувати результат у всіх нюансах. Якщо модель створюється за креслеником, потрібно «прочитати» кресленик, зрозуміти форму за зображенням. При цьому запитання: «Як побудувати цю лінію в 3D?», – вказуючи на криву, яка є лінією перетину поверхонь, періодично ставлять навіть студенти, які вивчали нарисну геометрію. Що казати про інших? І як відповідати на подібні запитання цим іншим? Але ж часто саме характер проєкції лінії перетину поверхонь на кресленку дає змогу однозначно визначити форму. Навіть у спрощених навчальних завданнях можна знайти чимало прикладів (рисунки 2).

Щоб створити кресленик деталі за її 3D-моделлю, потрібно мати уявлення про проєкційний зв'язок. Щоб виконати розріз на кресленку, асоціативно пов'язаному з моделлю, необхідно розуміти, як і де потрібно вказати положення

січної площини. Щоб проконтролювати правильність зображення (виду або розрізу), потрібно уявляти, що повинно було вийти. А далі, щоб зрозуміти, де допущено помилку (у моделі або під час побудови розрізу, як, наприклад, на рисунку 1, в), знову потрібні знання нарисної геометрії.

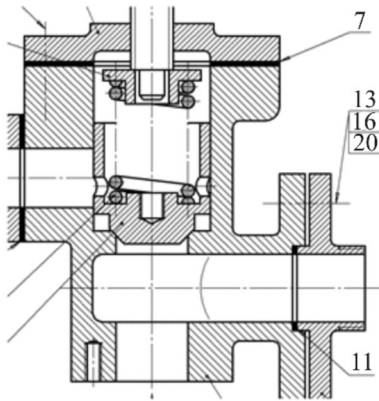


Рис. 2. Приклади кресленика

Ще очевиднішою є необхідність цих знань при виконанні ескізів або креслеників засобами 2D-інструментів САПР. Для перевірки сказаного можна запропонувати тим, хто сумнівається, виконати ескізно два види деталі, представлені на рисунку 3.

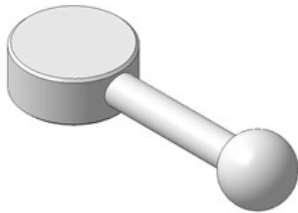


Рис. 3. Деталь

Деталь дуже проста і зрозуміла, але навряд чи правильне зображення вийде у людини, яка не вивчала нарисної геометрії.

Передбачаємо заперечення і навіть погоджуємося з деякими з них. Так, дійсно, людина, яка досконало володіє програмою 3D-моделювання, навряд чи припуститься помилок, подібних до показаних на рисунку 1, б, в. Так, дійсно, розробка кресленика зараз передбачає використання твердотільної моделі, і лінії перетину поверхонь, у разі правильно побудованої моделі, вийдуть на асоціативному кресленнику правильними. Але звернемо увагу, що все сказане вірно саме для досвідчених і грамотних користувачів САПР.

У навчальному процесі підготовка такого користувача вимагає знання теорії нарисної геометрії. Згадуючи про ескізи, часто кажуть, що поняття ескізу наразі розширено, і 3D-модель теж може бути ескізом. Так, це так. Але вміння виконувати зображення на папері від руки, ортогональні або аксонометричні проєкції залишається затребуваним у сучасному виробництві, незважаючи на комп'ютерні технології, що бурхливо розвиваються.

Таким чином, можна стверджувати, що, навіть якщо не розглядати складні питання багатовимірної геометрії тощо, а поставити просту мету навчити майбутнього інженера аналізувати форму та зображення технічного об'єкта для читання й розроблення конструкторських документів, нарисна геометрія необхідна [3].

Критерієм оцінки сформованості компетенцій у цьому випадку може слугувати вміння виконувати ескіз технічного об'єкта. Адже щоб виконати зображення правильно, необхідно проаналізувати форму, визначити поверхні, що обмежують деталь, виділити пари пересічних поверхонь, проаналізувати характер їхніх ліній перетину, вибрати напрямок проєктування, задати поверхні на кресленнику, визначивши контурні лінії, проаналізувати положення поверхонь відносно обраних площин проєкцій, характер проєкцій ліній перетину.

Якщо виконується розріз, то додатково необхідно визначити положення січної площини відносно площин проєкцій і розв'язати задачу про перетин її та поверхонь деталі, визначити форму плоского перерізу, а також «побачити», що перебуває за площиною перерізу і під час побудови не забути про лінії перетину поверхонь отворів і порожнин. Інакше кажучи, сформулювати та розв'язати цілу низку задач нарисної геометрії.

Навчитися бачити класичні навчальні задачі нарисної геометрії в практичному застосуванні не так легко. В Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля для забезпечення логічного переходу від теорії до практики студенти мають виконати графічну роботу, результатом якої є оформлений відповідно до стандартів кресленик об'єкта технічного призначення, максимально наближеного до реального виробу, складність якого залежить від напряму підготовки та виділених на дисципліну годин. Приклади об'єктів показано на рисунку 4, а, б. [4,5]

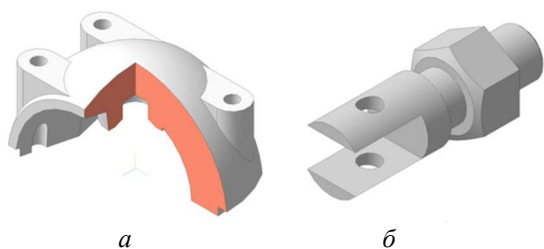


Рис. 4. Приклади об'єктів

Результати. Робота виконується в курсі навчальної геометрії. Виконуючи її, студенти знайомляться також з основними правилами розроблення кресленика: зображеннями на кресленику, позначками видів, розрізів, перерізів, типами ліній на кресленику, правилами заповнення основного напису та технічних вимог, прийомами роботи з аксонометричним зображенням, правилами нанесення розмірів на кресленику, зв'язком розмірів із формотворенням.

Крім того, для формування навичок швидкого розпізнавання поверхонь та аналізу ліній їхнього перетину використовується вправа, для якої розроблено «банк» із 3D-моделей фігур та їхніх наочних плоских зображень. Приклади наведено на рисунку 5. Фігури містять типові елементи деталей машин (отвори, пази, фаски, лиски, ребра жорсткості тощо), для правильного зображення яких потрібне володіння методами побудови плоских проєкційних моделей тривимірних об'єктів і розв'язання позиційних задач.



Рис. 5. Приклади типових елементів

Студенту пропонується в окомірному масштабі, зберігаючи пропорції, виконати:

- зображення фігури в трьох видах (головний, зверху і зліва); як головний вид обирати зображення, що дає найповніше уявлення про форму деталі, положення в просторі зберігати;

- фронтальний та/або профільний, та/або горизонтальний розріз за наявності отворів або пазів, розмістивши у вільному місці листа й позначивши положення січної площини; нанести штрихування;

- побудова лінії перетину поверхонь, що обмежують деталь, використовуючи

мінімальну, але достатню кількість характерних точок;

- проєкції точок позначити буквами або цифрами, використовуючи індекси відповідних площин проєкцій.

Також необхідно дати характеристику всіх отриманих ліній перетину та їхніх проєкцій, позначивши їх на всіх зображеннях.

Комплект наочних зображень доступний студентам, і вони можуть тренуватися, а в більш загальному розумінні – вчитися аналізувати просторові форми та їхні плоскі проєкції. Таким чином, цей «відкритий банк» у сукупності із завданням є своєрідним тренажером для формування навичок ескізування деталей машин, а також закріплення знань, необхідних для розроблення будь-яких конструкторських документів будь-яким способом.

Для перших самостійних вправ розроблено кілька завдань із заготовками кресленика. На рисунку 6 наведено приклади. Їх можна використовувати також для роботи в аудиторії під керівництвом викладача.

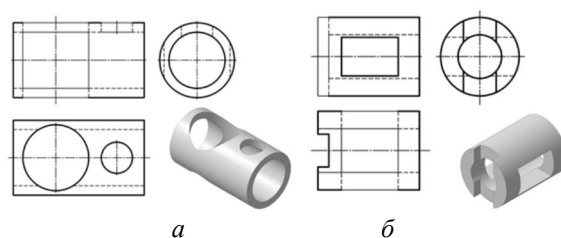


Рис. 6. Приклади завдань

Потрібно визнати, що коло розв'язуваних тут завдань обмежене: у «банку» зібрані фігури, більшість поверхонь яких займають проєкціювальне відносно будь-якої площини проєкцій положення. Однак під час розроблення кресленика деталь зазвичай розташовують саме так: щоб якомога більше її поверхонь були проєкціювальними. Це спрощує не тільки побудову, а й сприйняття зображень, дає змогу нанести розміри та інші необхідні позначення. Тому набуті навички особливо затребувані.

Завдання не просте для студентів і потребує підготовки. Проте більшість із них справляється. Приклади зображень, виконаних студентами, наведено на рисунку 7.

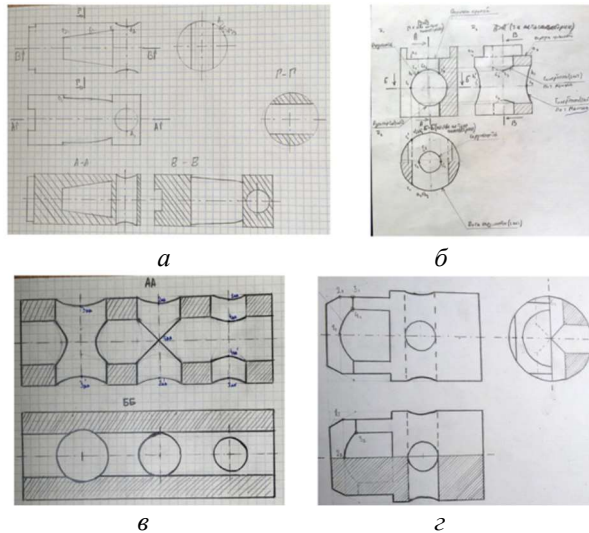


Рис. 7. Приклади зображень, виконаних студентами

Тут є окремі помилки, але очевидно, що студенти розуміють, що таке проєкційний зв'язок, можуть знайти проєкції будь-якої точки, яка належить фігурі, правильно задають поверхні, контурні лінії фігури, розуміють характер ліній перетину поверхонь і вміють за окремими характерними точками правильно побудувати проєкції цих ліній. Зауважимо, що це не кресленик деталі, і мети навчити оформляти кресленик в цьому завданні не ставилося.

Висновки. Насамкінець хочеться зауважити, що робота над ескізом, особливо якщо деталь можна потримати в руках, не менш цікава студентам, ніж розробка 3D-моделі. Можливе й успішне поєднання цих видів навчальної діяльності: вони мають спільну теоретичну базу і, доповнюючи один одного, дають чудові можливості реалізувати теорію на практиці, демонструють практичну значущість вивчення нарисної геометрії. Тому видається важливим при будь-яких змінах робочих програм дисциплін графічного циклу, розробці нового інтегрованого курсу не допустити зниження рівня теоретичної підготовки студентів.

Література

1. Ткаченко В. Л., Тищенко Ю. А., Суховерхов В. К. Нарисна геометрія: навч. посібн. Луганськ: Вид-во Східно-українського національного університету імені Володи-мира Даля, 2004. 192 с.
2. Петренко О. Я. Проектування тривимірних об'єктів засобами AutoCAD. 2008: Навчальний посібник. К: ІПДО НУХТ, 2010. 64 с.
3. Джеджула О. М., Островський А. Й. Нарисна геометрія. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 296 с.

4. Буда А. Г. Нарисна геометрія. Збірник прикладів та задач з теоретичними відомостями для студентів машинобудівних спеціальностей. Вінниця: ВНТУ, 2005. 142 с.
5. Карпюк Л. В., Гуліда М. І., Ревенко С. А. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях: навч. посібник. Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2007. 132 с.
6. Ткаченко В. П., Тищенко Ю. А., Суховерхов В. К. Нарисна геометрія: навч. посібник. Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2004. 192 с.
7. Боголюбов А. Н. Гаспар Монж. Изд. Наука, 1978. 184 с.

References

1. Tkachenko V. L., Tyshchenko Yu. A., Sukhoverkhov V. K. Narysna heometriia: navch. posibn. Luhansk: Vyd-vo Skhidno-ukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volody-myra Dalia, 2004. 192 s.
2. Petrenko O. Ya. Proektuvannia tryvymirnykh ob'ektiv zasobamy AutoCAD. 2008: Navchalnyi posibnyk. K: IPDO NUKhT, 2010. 64 s.
3. Dzhedzhula O. M., Ostrovskiy A. Y. Narysna heometriia. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VNAU, 2019. 296 s.
4. Buda A. H. Narysna heometriia. Zbirnyk prykladiv ta zadach z teoretychnymy vidomostiamy dlia studentiv mashynobudivnykh spetsialnostei. Vinnytsia: VNTU, 2005. 142 s.
5. Karyuk L. V., Hulida M. I., Revenko S. A. Komp'uterna hrafika v mashynobudivnykh kreslenniakh: navch. posibnyk. Luhansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2007. 132 s.
6. Tkachenko V. P., Tyshchenko Yu. A., Sukhoverkhov V. K. Narysna heometriia: navch. posibnyk. Luhansk: SNU im. V. Dalia, 2004. 192 s.
7. Boholiubov A. N. Haspar Monzh. Yzd. Nauka, 1978. 184 s.

Karpyuk L. V., Davydenko N. O., Duryshch O. A. The importance of using descriptive geometry knowledge when developing a sketch

Descriptive geometry is a supporting discipline not only for the course of drawing, which is what its role in the system of higher technical education is actually reduced to, but as a branch of mathematics, it serves as a basis for applied geometry, which solves optimisation multi-parameter, multi-factor problems of design, technology, economics, sociology, etc. The main task of this publication is to present the author's point of view on the role and place of descriptive geometry, as well as the need to use it when developing sketches. Design documents intended for one-time use can be made in sketch form. A sketch is an image made without the use of drawing tools, by hand, according to the rules of axonometry in an eye-view scale, observing the proportions of the detail. In this case, the same rules are followed as for the construction of axonometric projections: the axes are placed at the same angles, and

the dimensions are plotted along the axes or parallel to them. In a number of cases, sketches are used to create working drawings. In some cases, the sketches are used to make parts based on them. A modern student should strive not only for a higher degree of mastery of specialised knowledge, skills and abilities, but also to gradually move from teacher-led activities to self-study. Higher education should train specialists of an integral type of thinking, capable of synthesising knowledge and skills at all stages and levels of continuous education. The discipline «Descriptive Geometry» contributes to the development of spatial abstract thinking, which is necessary for engineering and design activities [6]. In their professional activities, engineering students are faced with the development of designs for structures, mechanisms, and machines, which requires knowledge of projection image theories. Modern teaching methods pay considerable attention to the use of the information and educational environment – a system of information sources available to the user, methods and means of processing it, as well as the conditions of the subject's information interaction with these sources. The complex of graphic cycle disciplines studied at universities is undergoing major changes all the time. Today, computer technologies for developing design documentation are actively used and studied. It is necessary, and everyone recognises this. Descriptive geometry remains a

stumbling block. Is it necessary as an academic discipline? Why do students of technical universities need descriptive geometry? These questions are asked by both supporters and opponents of the discipline. The authors of this article have tried to answer these and other questions.

Key words: *sketch, graphic disciplines, the drawing, descriptive geometry, model, shaping.*

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, karp224@gmail.com

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, nat.davidenko11@gmail.com

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, duryshhev@ukr.net

Стаття подана 15.10.2024.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-65-71>

УДК 004.9

INTERNET OF THINGS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AGRICULTURE

Kunup T.V.

ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Кунуп Т. В.

This article explores the role of modern technologies such as the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) in the development of agriculture. This combination facilitates process automation, increases production efficiency, optimizes resource utilization, and improves product quality. Applications in crop cultivation and livestock farming are discussed, helping farmers make more informed decisions based on real data. The challenges and economic benefits of implementing IoT and AI in agriculture are analyzed, including the need for substantial investments and ensuring cybersecurity across various countries worldwide.

Technological advancements in agriculture meet the growing demands for farm automation, economic digitalization, and environmental sustainability. Current industry trends emphasize the transition to precision farming, which allows for more efficient use of time and resources, reduces production costs, and minimizes crop losses.

The integration of innovative solutions in agricultural management processes shifts the balance of influence in domestic markets, creating new opportunities for growth. Artificial intelligence technologies significantly enhance efficiency across various sectors, including agriculture, and address many pressing challenges. Agricultural robots designed for AI integration ensure the effective use of this technology in agribusiness.

In the context of rapid global population growth, agriculture faces numerous challenges, and the use of AI and IoT can become a key element in overcoming them. Despite high initial costs, which may deter some producers, investments in innovative technologies typically pay off within a few years, demonstrating their economic viability.

By utilizing IoT and AI technologies, the agricultural sector can produce more with fewer resources, improve product quality, and accelerate time to market. With IoT sensors, farmers can more accurately calculate the required volumes of water, fertilizers, and pesticides, reducing their consumption. The rational use of energy

and natural resources lowers costs and minimizes environmental harm. Continuous monitoring of growing conditions (temperature, humidity, light levels) enhances crop quality and livestock productivity. AI helps predict diseases and implement preventive measures.

These technologies prevent crop losses caused by adverse weather conditions, pests, or diseases. Supply chain monitoring ensures better control over product storage and transportation. AI algorithms analyze large volumes of data to forecast yields, determine optimal planting and harvesting times, and provide farmers with precise decision-making recommendations. Precision farming systems reduce dependence on climate variability through accurate data and adaptive management methods. IoT and AI technologies contribute to increased yields and agricultural stability, addressing the challenges posed by global population growth.

The implementation of IoT and AI in agriculture not only improves the efficiency and competitiveness of the sector but also creates the foundation for the sustainable development of the agricultural industry.

Key words: *Internet of Things, Artificial Intelligence, AIoT (Artificial Intelligence of Things) concept, innovative technologies.*

Introduction. This paper examines the implementation of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) in agriculture amidst contemporary challenges, including the need to enhance food security, adapt to climate change, and utilize resources efficiently. Integrating innovative technologies such as IoT and AI addresses global food issues, optimizes resource use, and improves agricultural production efficiency. In the context of Ukraine, state support for these technologies underscores the importance of introducing innovations in key economic sectors, contributing to

the country's strengthened position in the global market.

The aim of the work is to comprehensively study the implementation of Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI) technologies in agriculture, in particular their impact on increasing productivity and optimizing resource use. The study also aims to analyze the benefits and problems of integrating modern technologies, assess various aspects of their application, and determine the prospects for the development of these technologies in the agricultural sector of Ukraine and the world.

Modern agriculture is rapidly evolving, with innovative technologies such as the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) coming to the forefront, promising to revolutionize the agricultural sector.

Modern agriculture requires high production efficiency combined with high-quality output. This applies to both crop production and livestock farming, among other areas. To meet these demands, advanced data analysis methods, including Artificial Intelligence (AI) techniques, are increasingly being utilized [7 p.62].

Artificial Intelligence is seen as a tool for improving crop quality, monitoring it at various stages, enhancing key agricultural operations, and advancing other technological components that can mitigate the negative effects of climate change and adapt the industry to the rapid growth of the global population.

The analysis of recent research and publications has shown that the primary providers of modern Artificial Intelligence systems for agriculture are countries in Western Europe, the United States, and China. The two most advanced agricultural nations in the world are the United States and the Netherlands, followed by France, Germany, Canada, and Australia. Their agricultural leadership is based on the use of high technologies. Ukrainians are also beginning to adopt these technologies, but to a much lesser extent. A diagram illustrating the implementation of Artificial Intelligence and the Internet of Things in agriculture worldwide is shown in Figure.

The following Artificial Intelligence and Internet of Things technologies have been implemented in agriculture: computer vision, robotics and automation, data analysis and forecasting, unmanned aerial vehicles (drones) with AI, AI for livestock management, smart irrigation systems (soil moisture sensors, automatic irrigation systems), smart systems for soil condition monitoring (soil temperature and pH sensors, nutrient level monitoring), smart farms for livestock

(wearable devices for cattle, automated feeding and milking), agrometeorological stations (weather condition monitoring, forecasting, and alerts for extreme weather events), logistics tracking systems, and more [7].

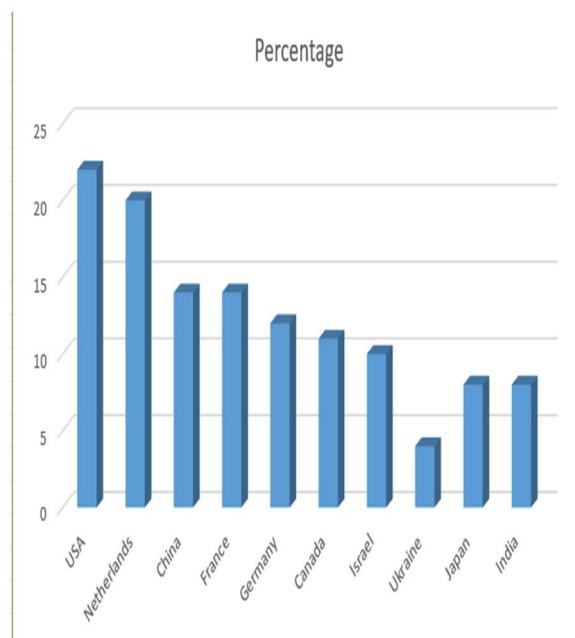


Fig. Introduction of artificial intelligence and the Internet of Things in agriculture

Agriculture encompasses a range of processes and stages, most of which involve manual labor. By complementing existing technologies, Artificial Intelligence (AI) can simplify the execution of the most complex and routine tasks. It can collect and process large amounts of data on a digital platform, devise the best course of action, and even initiate this action in combination with other technologies [7 p.64].

Artificial Intelligence can be utilized in various aspects of agricultural activities, such as precision farming, livestock management, crop production, poultry farming, smart irrigation systems, greenhouse automation, climate condition monitoring, raw material management, and more. Let us consider some of these in detail.

Precision Farming. International experience has demonstrated that crop yields depend 80% on natural conditions. However, with the use of precision farming systems, the influence of climate and weather conditions is reduced to 20%, while technology and management in agriculture become decisive factors, accounting for 80%. For Ukraine, as a region with high risks in agriculture, the implementation of precision farming systems is highly appropriate given the diversity of climatic

conditions and field heterogeneity. This allows for minimizing risks and optimizing costs.

Digital farming encompasses several stages: data collection, information analysis, and making agronomic decisions based on this analysis.

Agrochemical analysis of soil using sensor equipment allows for the assessment of its fertility, obtaining data on suitability for growing specific crops, optimizing nutrient systems, and reducing fertilizer costs. Monitoring crops with satellites or drones provides comprehensive information about the condition of the soil and plants, enabling prompt management decisions regarding soil treatment or pest control.

Meteorological monitoring helps determine optimal periods for planting, irrigation, and fertilization, which also reduces water consumption. Precision technologies in agriculture are focused on economic efficiency and soil conservation, increasing yield per hectare, reducing field losses, and, overall, improving the efficiency of land use in the country.

In livestock farming, Artificial Intelligence plays a key role due to its powerful capabilities in analyzing large volumes of data and computing complex algorithms. It contributes to increased efficiency in various areas, such as breeding livestock, poultry farming, rabbit farming, aquaculture, and others.

One of the main advantages of Artificial Intelligence in livestock farming is its application in the animal breeding process. By using machines to learn algorithms and big data analysis, farmers can select optimal pairs for breeding, which improves the genetic quality of the herd and results in healthier and more productive offspring. This contributes to increased productivity, meeting market demands, and enhancing the characteristics of the animals [9].

Additionally, Artificial Intelligence significantly simplifies farm management. AI enables the monitoring of animal housing conditions, such as temperature, humidity, lighting, and ventilation. Algorithms help ensure optimal conditions to minimize risks of diseases and stress, which positively impacts the health and productivity of animals. AI also generates recommendations for improving living conditions, promoting animal welfare.

Monitoring feeding behavior is a key element of livestock management, as it provides essential information about the health, productivity, and overall well-being of animals. With Artificial Intelligence and sensor systems, this process is automated, delivering real-time data. RFID (radio

frequency identification) tags or smart collars are commonly used to track feeding times and frequency, as well as the duration of an animal's stay at the feeding station. The collected data is analyzed by AI to improve animal management [5].

Automated counting of cattle and tracking their movements are crucial for supply chain management. Beyond mere numbers, herd monitoring plays a significant role in disease control, inventory management, movement tracking, productivity enhancement, and ensuring the profitability of enterprises. Traditional methods of manual animal counting are often inaccurate, labor-intensive, and challenging for large herds.

Artificial Intelligence and sensor technologies offer a transformative solution to this problem. Radio Frequency Identification (RFID) has become a key technology for automatic counting and tracking animals. RFID tags implanted in livestock provide automatic identification and tracking of each animal at various stages of the supply chain. Readers, strategically placed along this chain, collect data, ensuring comprehensive record-keeping and minimizing errors compared to traditional counting methods [5].

In modern crop production, robotics holds significant potential for automating various processes, contributing to improved cultivation quality, increased yields, and reduced costs. Robotics is utilized at different levels, from large farming enterprises to greenhouses and even private households. It finds applications in areas such as grain cultivation, horticulture, viticulture, berry farming, and vegetable gardening. The main directions for the use of robots in crop production include:

1. Irrigation and Plant Nutrition: Irrigation robots can automatically water plants, taking into account their needs, soil type, and weather conditions. This enables efficient water use and maintains optimal growth conditions.

2. Soil Tilling and Seed Sowing: Specialized robots can automatically till the soil and plant seeds at a specified depth and with the required spacing, ensuring uniform seed placement and optimal use of the available area.

3. Weed Removal: Weed-removal robots can identify and eliminate weeds without manual intervention, ensuring clean fields and reducing the negative impact of weeds on crop yields.

4. Harvesting: Harvesting robots automatically determine the ripeness of fruits using sensors or computer vision and carefully harvest the crops, minimizing damage to the fruits.

5. Pest and Disease Control: Plant treatment robots can detect pests and signs of diseases and automatically apply pesticides or fertilizers as needed. Utilizing sensors and cameras, these robots conduct precise monitoring and treatment of specific areas, effectively controlling pests and plant diseases.

These technologies enable the optimization of processes in crop production, improving the quality and productivity of farms.

In poultry farming, artificial intelligence is used for process automation, production monitoring, and disease diagnostics. Artificial intelligence analyzes the behavior of birds, helping to detect signs of stress or illness, which allows for quick responses and the prevention of potential problems.

An intriguing development comes from a team of Japanese researchers led by Professor Adrian David Cheok from the University of Tokyo, who created a system capable of translating chicken clucking into human language using Artificial Intelligence. Their system interprets various emotional states of chickens, such as hunger, fear, anger, satisfaction, excitement, and distress, through a method they call "deep emotional analysis." [6].

To test the system, the team recorded and analyzed sound samples from 80 chickens and then fed this data into an AI algorithm. The algorithm matched these vocal samples with the corresponding emotional states of the birds. In collaboration with psychologists, animal behaviorists, and veterinarians, the researchers achieved high accuracy in determining the mental states of individual birds. They also trained artificial intelligence to recognize the emotional state of chickens based on their sounds, which could significantly improve their living conditions and production [5].

Definition and Tracking of Animals as Key Aspects.

Many livestock-producing countries have recognized artificial intelligence and digital transformation as effective and practical solutions to address numerous challenges in monitoring and decision-making within the industry.

Biometric Methods for Assessing Animal Health and Welfare.

The most common methods for evaluating animal health and welfare include visual and subjective approaches, particularly for analyzing animal behavior, or invasive methods.

Let us consider some methods for monitoring animal health:

1. Thermal Imaging

The use of infrared cameras enables the detection of localized temperature increases on the animal's skin, which may indicate inflammatory processes or infections. The temperature T is measured using the formula:

$$T = \left(\frac{R \cdot E}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

where: R - radiation intensity recorded by the camera,

E - emissivity coefficient of the Surface (for animal skin about 0.98),

σ - Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{Вт/м}^2 \text{К}^4$).

This method provides non-invasive, real-time insights into potential health issues, making it an essential tool for modern livestock management.

1.1. Photoplethysmography (PPG).

Heart rate (HR) and respiration rate (RR) are assessed by analyzing changes in skin color in RGB video streams. The algorithm extracts the signal from the variations in the intensity of the green channel $G(t)G(t)$, processing it using the Fast Fourier Transform (FFT):

$$HR = f_{\max} \cdot 60 \quad (2)$$

where: f_{\max} - the signal frequency with the highest intensity in the spectrum.

2. Performance Analysis

2.1. Milk Yield Prediction

Milk yield prediction is based on multivariate regression:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3)$$

where: Y - expected milk yield (liters),

X_1, X_2, \dots, X_n - factors (temperature, humidity, diet),

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ - model coefficients,

ε - residual noise.

2.2. The heat stress index (THI) is calculated using the formula:

$$THI = (1.8 \cdot T + 32) - (0.55 - 0.0055 \cdot RH) \cdot (1.8 \cdot T - 26) \quad (4)$$

where: T - air temperature ($^{\circ}\text{C}$),

RH - relative humidity (%).

When THI >72, the likelihood of decreased productivity and deteriorating health increases significantly.

3. Optimization of Well-being

3.1. Stress Detection through Behavior Analysis

Video analysis of animal motor activity enables the identification of signs of stress or discomfort. Optical flow is used:

$$V(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (5)$$

where: $V(t)$ - the average movement speed of animals,
 x_i, y_i - coordinates of the position in the frame.

3.2 Predictive Model Construction

To assess the impact of environmental changes on animal behavior, gradient boosting is employed:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \gamma_m \cdot h_m(x) \quad (6)$$

where: $F_m(x)$ - the current model,
 γ_m - learning rate,
 $h_m(x)$ - loss function gradient.

The main drawback of traditional methods based on the use of contact or invasive sensors for assessing physiological responses is that they may cause stress in the animal, which, in turn, can distort the results.

Another example is "smart greenhouses," where the Internet of Things enables the creation of optimal microclimates for "sensitive" crops. IoT systems manage irrigation, lighting, air humidity, and temperature. For instance, Artificial Intelligence can predict plants' needs for watering or fertilization to ensure optimal growth. To use water efficiently across the entire field, sensors are installed to monitor soil dryness and looseness. As soon as the system detects deviations from the norm, automatic irrigation is activated. This solution prevents both dryness and overwatering.

An American farmer, Dorn Cox, co-founder of "Farm Hack"—a global community of farmers who create and modify their own tools—produces organic products on his 120-hectare farm in New Hampshire, primarily for restaurants. His farm grows blueberries, mushrooms, vegetables, maple syrup, sunflower oil, and baked goods from his own grain. In 2011, when the community was formed, one of the first problems discussed was the remote detection of critical temperature rises in greenhouses. Using a modified GSM signal and a mobile phone, the project created a temperature

sensor that sends a text message if the greenhouse temperature exceeds acceptable levels [10].

Quality control of food products is a crucial aspect of protecting consumer health and safety. An important component of quality control is monitoring storage and transportation conditions, which is especially critical for perishable goods. Selecting the right software for these processes is also essential to ensuring product quality. The use of sensors enables real-time monitoring of temperature, humidity, and other parameters that affect product quality.

The implementation of strict standards and regular inspections at all stages of production and distribution is key to maintaining high quality and safety of food products. Thus, modern technologies and rigorous agricultural control standards help protect consumer health and build trust in producers [14].

The economic aspects of implementing Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) in agriculture across various sectors open new opportunities for optimizing decisions and managing processes. A key economic benefit is the reduction of production and operational costs.

In recent years, the introduction of information technologies in agriculture has led to adjustments in crop processing methods and field management. These technologies have fundamentally changed the concept of agriculture, making it more profitable, efficient, safe, and straightforward.

Therefore, examining the experience of implementing artificial intelligence and Internet of Things in agriculture leads to the conclusion that these technologies are fundamentally transforming the industry. They are turning a millennia-old human endeavor into a technological business with high productivity.

Conclusions. The implementation of artificial intelligence and the Internet of Things in agriculture creates broad opportunities for increasing productivity, efficiency, and competitiveness in the agricultural sector. These technologies enable process automation, resource optimization, cost reduction, and improved product quality.

The advantages of artificial intelligence and Internet of Things integration in agriculture include accurate monitoring of soil, crops, and livestock using sensors, drones, and analytical platforms. Routine processes such as irrigation, fertilization, harvesting, and livestock care can be automated, leading to enhanced resource efficiency, including water, fertilizers, and energy.

In crop production, these technologies reduce dependence on climatic conditions, increase yields, and minimize losses.

In livestock farming, artificial intelligence supports breeding, animal health management, monitoring of feeding behavior, and automation of livestock tracking.

Monitoring storage and transportation conditions ensures high product quality and consumer safety.

Challenges in implementing artificial intelligence and Internet of Things include the need for significant investments in infrastructure development, ensuring cybersecurity and data protection, and addressing the shortage of qualified professionals to operate these advanced technologies.

For Ukraine, integrating innovative technologies allows for mitigating climatic risks and improving the country's competitiveness in the global market. It reduces production costs through process optimization and increases profitability by enhancing the efficient use of land resources and reducing losses.

State support for the development of these technologies will contribute to their more active implementation.

Artificial intelligence and Internet of Things have the potential to fundamentally transform the agricultural sector, turning traditional farming into a high-tech business with maximum productivity and efficiency. Implementing these technologies is strategically important for ensuring food security and the sustainable development of Ukraine's agricultural industry.

References

- Gutierrez J. V., et al. Smart Agriculture: IoT, AI and Their Applications in Agriculture. Wiley, 2023. 320 p.
- Lenniy D. Artificial Intelligence in Agriculture: Rooting Out the Seed of Doubt [Електронний ресурс] / Dmytro Lenniy // Intellia Karolinska Street 15 and 39, 04080, Kyiv, Ukraine. 2022. <https://intellias.com/artificial-intelligence-inagriculture/>.
- Sandeep Kumar, Vikas Artificial Intelligence and Machine Learning in Agriculture. Kyiv: Naukova Dumka, 2021. 280 p.
- Sharma, R. K., Singh, A. K. IoT in Agriculture: Innovation, Applications, and Challenges. Elsevier. 2022. 350 p.
- Suresh Neethiraja. Artificial Intelligence and Sensor Technologies in Dairy Livestock Export: Charting a Digital Transformation. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23167045>
- <https://psm7.com/uk/iskusstvennyj-intellekt/yaponiya-sozdala-iskusstvennyj-intellekt-rasshifrovyvayushhij-yazyk-kur.html>
- Tahsin KN (2016) Development of a propeller P8X 32A based wireless biosensor system for cattle health monitoring and disease detection. British Journal of Applied Science and Technology 18(2), 1-14
- Bondarenko D. A. Zastosuvannya tekhnolohiy internetu rechey v silskomu hospodarstvi. Telekomunikatsiyni ta informatsiyni tekhnolohiyi. 2022. №2(75).
- Humenyuk, V. I., Kovalchuk, S. M. Internet rechey u silskomu hospodarstvi: tekhnolohiyi ta zastosuvannya. Kyiv: Agrarna osvita, 2021. 350 s.
- Kyivstar biznes. Internet rechey u silskomu hospodarstvi. <https://hub.kyivstar.ua/articles/efektyvna-robota-agrotehniky-za-dopomogoyu-iot-rishenhttps>
- Petrenko, O. M. Shtuchnyy intelekt u silskomu hospodarstvi: praktychnyy posibnyk. Lviv: Vydavnytstvo "Agroosvita", 2022. – 280 s.
- Savchenko A. S. Metody ta systemy shtuchnoho intelektu: posibnyk. NAU: 2017. – 176 s.
- Solona O. V., Skoromna O.I. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2023. №4(123). s.43–50. <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2024/5gJoIndA33kbLIZav2WI.pdf>
- Propozytsiya. Holovnyy zhurnal z pytan ahrobiznesu. Big Data v velykykh hospodarstvakh. <https://propozitsiya.com/ua/big-data-v-bolshih-hozyaystvah>

Література

- Gutierrez J. V., et al. Smart Agriculture: IoT, AI and Their Applications in Agriculture. Wiley, 2023. 320 p.
- Lenniy D. Artificial Intelligence in Agriculture: Rooting Out the Seed of Doubt [Електронний ресурс] / Dmytro Lenniy // Intellia Karolinska Street 15 and 39, 04080, Kyiv, Ukraine. 2022. <https://intellias.com/artificial-intelligence-inagriculture/>.
- Sandeep Kumar, Vikas Artificial Intelligence and Machine Learning in Agriculture. Kyiv: Naukova Dumka, 2021. 280 p.
- Sharma, R. K., Singh, A. K. IoT in Agriculture: Innovation, Applications, and Challenges. Elsevier. 2022.350 p.
- Suresh Neethiraja. Artificial Intelligence and Sensor Technologies in Dairy Livestock Export: Charting a Digital Transformation. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23167045>
- <https://psm7.com/uk/iskusstvennyj-intellekt/yaponiya-sozdala-iskusstvennyj-intellekt-rasshifrovyvayushhij-yazyk-kur.html>
- Tahsin KN (2016) Development of a propeller P8X 32A based wireless biosensor system for cattle health monitoring and disease detection. British Journal of Applied Science and Technology 18(2), 1-14

8. Бондаренко Д. А. Застосування технологій інтернету речей в сільському господарстві. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2022. № 2 (75).
9. Гуменюк, В. І., Ковальчук, С. М. Інтернет речей у сільському господарстві: технології та застосування. Київ: Аграрна освіта, 2021. 350 с.
10. Київстар бізнес. Інтернет речей у сільському господарстві.
<https://hub.kyivstar.ua/articles/efektyvna-robota-agrotehniky-za-dopomogoyu-iot-rishen><https://hub.kyivstar.ua/articles/efektyvna-robota-agrotehniky-za-dopomogoyu-iot-rishen>
11. Петренко, О. М. Штучний інтелект у сільському господарстві: практичний посібник. Львів: Видавництво "Агроосвіта", 2022. 280 с.
12. Савченко А. С. Методи та системи штучного інтелекту: посібник. НАУ: 2017. 176 с.
13. Солоня О. В., Скоромна О.І. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2023. №4(123). С. 43-50.
<https://eos.com/uk/blog/suchasni-tekhnohii-v-silskomu-hospodarstvi/>
14. Пропозиція. Головний журнал з питань агробізнесу. Big Data в великих господарствах.
<https://propozitsiya.com/ua/big-data-v-bolshih-hozyaystvah>

Кунуп Т. В. Інтернет речей та штучний інтелект у сільському господарстві

У цій статті досліджується роль сучасних технологій, таких як інтернет речей (IoT) і штучний інтелект (AI) у розвитку сільського господарства. Ця комбінація полегшує автоматизацію процесів, підвищує ефективність виробництва, оптимізує використання ресурсів і покращує якість продукції. Обговорюється застосування у вирощуванні сільськогосподарських культур і тваринництві, що допомагає фермерам приймати більш обґрунтовані рішення на основі реальних даних. Проаналізовано проблеми та економічні переваги впровадження інтернету речей та штучного інтелекту у сільському господарстві, включаючи потребу в значних інвестиціях та забезпечення кібербезпеки в різних країнах світу.

Технологічний прогрес у сільському господарстві відповідає зростаючим вимогам до автоматизації ферм, цифровізації економіки та екологічної стійкості. Сучасні тенденції галузі підкреслюють перехід до точного землеробства, що дозволяє більш ефективно використовувати час і ресурси, зменшити собівартість виробництва та мінімізувати втрати врожаю.

Інтеграція інноваційних рішень у процеси управління сільським господарством змінює баланс впливу на внутрішніх ринках, створюючи нові можливості для зростання. Технології штучного інтелекту значно підвищують ефективність у різних секторах, включаючи сільське господарство, і вирішують багато нагальних проблем. Сільськогосподарські

роботи, розроблені для інтеграції штучного інтелекту, забезпечують ефективне використання цієї технології в агробізнесі.

В умовах стрімкого зростання глобального населення сільське господарство стикається з численними викликами, і використання штучного інтелекту та інтернету речей може стати ключовим елементом у їх подоланні. Незважаючи на високі початкові витрати, які можуть стримувати деяких виробників, інвестиції в інноваційні технології зазвичай окупаються протягом кількох років, демонструючи свою економічну життєздатність.

Використовуючи технології інтернету речей та штучного інтелекту, сільськогосподарський сектор може виробляти більше з меншими ресурсами, покращувати якість продукції та прискорювати час виходу на ринок. За допомогою датчиків IoT фермери можуть точніше розраховувати необхідні обсяги води, добрив і пестицидів, зменшуючи їх споживання. Раціональне використання енергії та природних ресурсів знижує витрати та мінімізує шкоду навколишньому середовищу. Постійний моніторинг умов вирощування (температура, вологість, освітленість) покращує якість врожаю та продуктивність худоби. ШІ допомагає прогнозувати захворювання та впроваджувати профілактичні заходи.

Ці технології запобігають втратам врожаю через несприятливі погодні умови, шкідників або хвороби. Моніторинг ланцюга постачання забезпечує кращий контроль за зберіганням і транспортуванням продукції. Алгоритми штучного інтелекту аналізують великі обсяги даних, щоб прогнозувати врожайність, визначати оптимальний час посіву та збору врожаю та надавати фермерам точні рекомендації щодо прийняття рішень. Системи точного землеробства зменшують залежність від мінливості клімату завдяки точним даним і адаптивним методам управління. Технології інтернету речей та штучного інтелекту сприяють підвищенню врожайності та стабільності сільського господарства, вирішуючи проблеми, пов'язані зі зростанням населення планети.

Впровадження Інтернету речей та штучного інтелекту в сільському господарстві не тільки підвищує ефективність і конкурентоспроможність галузі, але й створює основу для сталого розвитку аграрної галузі.

Ключові слова: Інтернет речей, штучний інтелект, концепція AIoT (Artificial Intelligence of Things), інноваційні технології.

Кунуп Тетяна Василівна – к.т.н., старший викладач кафедри Інформаційних технологій, Національного університету «Одеська політехніка».
e-mail: Kunup.t.v.@op.edu.ua.

Стаття подана 22.10.2024.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-72-82>

УДК 004.89:659

АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ ФРЕЙМВОРК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ДАНИХ З МОНІТОРИНГУ GSM-ТЕХНОЛОГІЙ

Ніжегородцев В.О., Білокопитов Д.С., Філоненко М. М., Лаговський В. В.

HARDWARE AND SOFTWARE FRAMEWORK OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR DATA COLLECTION FROM GSM TECHNOLOGY MONITORING

Nizhehorodtsev V.O., Bilokopytov D.S., Filonenko M. M., Lagovskyi V. V.

Комплексна система спостережень, збору, обробки, систематизації та аналізу даних з мережі пристроїв моніторингу інформації про стан навколишнього середовища дозволяє отримати обґрунтовані рекомендації для прийняття управлінських рішень в різних галузях, таких як промисловість, сільське господарство, військова галузь, охорона здоров'я. Створення мобільних систем збору та передачі даних із їх подальшою обробкою за допомогою методів штучного інтелекту є перспективним напрямом для вирішення таких завдань. Для досягнення цієї мети використовуються сучасні методи та інструменти програмування, методи аналізу даних, а також апаратні можливості сучасних датчиків та мікроконтролерів.

Такі системи здатні значно та позитивно вплинути на країну у різних аспектах, а розробка систем збору та систематизації даних з мережевих пристроїв моніторингу дає простір для розвитку сучасних питань які можна порушити, а саме: етичність використання та створення штучного інтелекту, залежність всього людства від технологій, оптимізацію технологій віртуальної реальності.

Метою дослідження є проектування системи прийому та подальшої обробки GSM сигналу, яка допоможе спроектувати модулі з шифрування даних для передачі та зберігання інформації для системи збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу. На основі отриманих даних які надходять з зовнішніх датчиків моніторингу, а саме з GSM антени, яка генерує інформацію щодо сили наявного сигналу та його спектру, та даних з генерації отриманих координат випромінюваного сигналу, зробити аналіз даних та забезпечити зручний спосіб моніторингу та обробки інформації, в реальному часі.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні підстав для створення апаратно-програмного прототипу

інтелектуальної системи збору даних з мережі пристроїв моніторингу на основі комплексу інженерно-технічних та дослідницьких робіт: аналізу апаратних продуктів моніторингу радіо середовища, проектуванню рухомої платформи та моделювання її елементів, створення реляційної моделі даних СУБД, інтерфейсу користувача системи, налаштування серверу обробки даних.

Ключові слова: мікроконтролер, моніторинг, програмне забезпечення, датчик, GSM.

Вступ. Сучасний світ характеризується стрімким розвитком технологій Інтернету речей (IoT), що призводить до появи величезних обсягів даних, які генеруються різноманітними пристроями моніторингу. Ефективний збір, зберігання та аналіз цих даних є ключовим завданням для багатьох галузей, таких як промисловість, медицина, військова техніка, сільське господарство тощо.

Мікроконтролери на сьогодні відіграють ключову роль у майбутньому розвитку автоматизованих систем, забезпечуючи їх ефективність, гнучкість та низьку вартість реалізації дослідження особливостей. Сучасні рішення в галузі автоматизації та робототехніки неможливо уявити без використання мікропроцесорних інструментів та систем.

Шляхи оптимізації управління процесами цифрових технологій нами вже описані були в публікаціях [1], [10], [12], де розглянуті системи з різноманітних рішень у технологічних процесах, куди входять і програмні і апаратні рішення

мікроконтролерного пристрою керування електромеханічною системою.

Система збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу, може використовувати різноманітні реалізації та мають змогу приймати необхідні потоки даних, в залежності від датчиків – приймачів інформації. Одним з таких видом вхідних даних виступає GSM (Global System for Mobile Communications) сигнал, який моніториться відповідним обладнанням та складається з апаратної частини та спеціального програмного забезпечення.

Створення надійної системи передачі даних з використанням GSM-технологій та шифрування є актуальним завданням у багатьох сферах. Основними компонентами такої системи є: апаратна частина (GSM-модуль, мікроконтролер, датчики, джерело живлення, антена) та програмна частина (протокол передачі даних, алгоритми шифрування, протоколи аутентифікації, програмне забезпечення для мікроконтролера, серверна частина).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розуміння концепції систем на основі мікроконтролерів для вибору найкращого апаратного забезпечення займалися групи закордонних дослідників: Ergun Coşgun, Sıtkı Kocaoğlu, Eray Yılmazlar [9], програмування комп'ютерів та мікроконтролерів займався колектив: Abdulkareem A., Dike U. Ike, Adewale A. Ajao, Adelakun A. A. [8], оцінкою параметрів трафіку та міського простору з мереж GSM: Steenbruggen J. Borzacchiello M. T., Nijkamp P. Scholten [11]. Важливий внесок у розвиток процедур надійної системи передачі даних з використанням GSM-технологій та шифрування потоків даних зробили також і сучасні українські науковці: С.О. Кравчук [7], М.М. Кайденко [4], В.Д. Голь [3] та інші.

Метою даної роботи є проектування системи прийому та подальшої обробки GSM сигналу, яка допоможе спроектувати модулі з шифрування даних для передачі та зберігання інформації для системи збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу.

Постановка задачі. Для досягнення цієї мети будуть використані сучасні методи та інструменти програмування, методи аналізу даних, а також апаратні можливості сучасних датчиків та мікроконтролерів. Результатом роботи є апаратно-програмний фреймворк інтелектуальної системи збору даних та апаратно-програмний прототип пристрою моніторингу, що може стати платформою для подальших досліджень із практичного застосування СШ з метою

виявлення та класифікації об'єктів у радіо середовищі. Для програмної реалізації обрано сучасні засоби розробки, апаратна платформа базується на поширеній компонентній базі. У роботі використано дві станції моніторингу для позиціонування джерела радіо сигналу, для триангуляції включно із напрямом пропонується використання трьох станцій.

Викладання основного матеріалу. В стандарті GSM аудіо-сигнали перетворюються з аналогової форми в цифрову перед тим, як вони будуть передані. Це перетворення є ключовим для забезпечення високого рівня безпеки, який є характерним для GSM мереж.

Загальна безпека у системах мобільного зв'язку GSM базується на комбінації технічних, організаційних і юридичних аспектів. Для досягнення максимально ефективного захисту, ці елементи мають працювати у координації один з одним. В стандарті GSM досягається висока ступінь безпеки передачі повідомлень яке здійснюється шляхом шифрування повідомлень по алгоритму шифрування з відкритим з відкритим ключем RSA (Rivest–Shamir–Adleman).

У структурі GSM суворо визначено часові характеристики огиначаючої сигналу, випромінюваного пакетами на каналному часовому інтервалі TDMA кадру, та спектральна характеристика сигналу. Тимчасова маска обгинальної для сигналів - випромінюються на інтервалі АВ повного TDMA кадру, а маска для сигналів NB, FB, DB і SB повного TDMA кадру. Різні форми огиначаючих випромінюваних сигналів відповідають різною тривалістю інтервалу АВ (88 біт) по відношенню до інших вказаним інтервалам повного TDMA кадру (148 біт).

Одна з особливостей формування сигналів у стандарті GSM - використання повільних стрибків по частоті у процесі сеансу зв'язку. Для захисту від помилок в радіоканалах при передаванні повідомлень застосовується блокове та згорткове кодування з переміщенням, а підвищення ефективності кодування та переміщення за малої швидкості переміщення рухомих станцій досягається повільним переключенням робочих частот (SFH - Slow Frequency Hopping) [2, с. 11].

Головне призначення таких стрибків - забезпечення частотного рознесення в радіоканалах, що функціонують в умовах багатопроменового поширення радіохвиль. SFH використовується у всіх рухомих мережах, що підвищує ефективність кодування та переміщення при повільному русі абонентських станцій. Принцип формування повільних стрибків по частоті

полягає в тому, що повідомлення, що передається у виділеному абоненту тимчасовому інтервалі TDMA кадру (577 мкс), у кожному наступному кадрі передається (приймається) на нову фіксовану частоту.

У процесі стрибків по частоті постійно зберігається дуплексне рознесення 45 МГц між каналами прийому і передачі. Всім активним абонентам, що знаходяться в одній соті, ставляться у відповідність ортогональні формують послідовності, що виключає взаємні перешкоди при прийомі повідомлень абонентами в соті. Параметри послідовності перемикавання частот (частотно-часова матриця та початкова частота) призначаються кожній рухомій станції у процесі встановлення каналу. Ортогональність послідовностей перемикавання частот в соті забезпечується початковим частотним зрушенням однієї і тієї ж (за алгоритмом формування) послідовності. У суміжних стільниках використовуються різні формують послідовності.

Так, як до радіосередовища мають доступ багато пристроїв і користувачів, потрібно їх аутентифікувати. Процедура аутентифікації встановлює справжність і приналежність до мережі користувача і обладнання, визначає права і повноваження користувача і право доступу до мережних ресурсів. Безпека зв'язку забезпечується також застосуванням процедур аутентифікації і шифрування повідомлень, аутентифікація проводиться за допомогою двох функціональних об'єктів: SIM-картки в мобільній станції і центром аутентифікації [7, с. 474].

В основі безпеки GSM лежать три алгоритми, які є офіційно закритими, тобто секретними: А3 (алгоритм аутентифікації); А8 (алгоритм генерації ключа шифрування для сеансу зв'язку); А5 (алгоритм шифрування сигналу у процесі сеансу зв'язку). Мобільна станція шифрує це число алгоритмом А3, використовуючи ключ шифрування, який у свою чергу записано на SIM-карті абонента (модуль автентичності абонента). Зашифрований запит відправляється від мобільної станції назад оператору. Отримана відповідь перевіряється на правильність: оператор проводить таке саме шифрування випадкового числа, відправленого на мобільну станцію. Якщо отриманий результат збігається з відповіддю з мобільної станції, вважається, що автентифікація пройшла успішно. Відповідь, отримана після роботи алгоритму А3, потрібна для визначення ключа шифрування. Цей ключ дозволяє передавати все повідомлення у режимі захисту інформації. Зашифрована відповідь надходить алгоритм А8, який у свою чергу за

допомогою деяких перетворень обчислює ключ. Подібна дія провадиться і оператором, що забезпечує ідентичність ключа на стороні оператора та стороні мобільної станції.

Поряд із випадково визначеним числом, мережа також надсилає на мобільний пристрій спеціальну числову послідовність, яка використовується як ключ шифрування. Ця послідовність тісно корелює з актуальним значенням ключа, що допомагає запобігти створенню помилкового ключа. Мобільний пристрій зберігає це число та інкорпорує його у перше повідомлення, яке відправляється назад у мережу, гарантуючи таким чином безпеку комунікації.

Для того щоб отримати інформацію про закриті дані абонента, необхідно мати досить складно обладнання, яке б дозволяло отримати доступ до обладнання абонента таким чином, щоб абонент сам про це не здогадувався. Таке обладнання є дорогим та доступно аж ніяк не кожній людині.

Таким чином спеціальні підрозділи (наприклад служби безпеки тієї чи іншої країни) можуть через судові рішення отримати дозвіл на отримання кодів доступу та розшифровки GSM сигналу у ефірі моніторингу, які надають представники мобільного зв'язку.

Отриманні дані GSM сигналу які приймає спеціалізована GSM-антена, що здатна сприймати відповідний сигнал, передаються на GSM-приймач, а саме електронний прилад, який перетворює радіосигнали в цифрові дані використовуючи ключі для розшифровки. Приймач GSM зазвичай складається з фільтру який виконує видалення небажаних сигналів з радіосигналу отриманого антеною, підсилювачу для посилення радіосигналу, демодулятора який виконує основну роль для перетворення радіосигналу на цифровий сигнал.

Зміст пакету з даними GSM-ефіру у цифровому вигляді являє собою послідовність байтів, які представляють собою сигнали, що надходять з базових станцій та мобільних телефонів. Ці сигнали дають можливість бути використаними для моніторингу мережі GSM, а також для виявлення та розслідування злочинів, пов'язаних із мобільним зв'язком.

Що б працювала вся система GSM, дуже важливо відстежувати координати користувача. Кожний інформаційний елемент закодований єдиним кодом з восьми біт (ідентифікатором). Довжина інформаційного елемента може бути фіксована або змінна і включати або не включати в себе індикатор довжини. Мережа постійно

оновлює інформацію про місцезнаходження користувача [5, с.25].

Пакет з даними GSM-ефіру може бути відкритий за допомогою програмного забезпечення, такого як аналізатор спектра або генератор графіків. Це програмне забезпечення може використовуватися для перегляду сигналів, що містяться у файлі, а також для їх аналізу.

Саме інформація про координати відносно базової станції відповідає за місце знаходження абонента який взятий до моніторингу. Для дешифрування даних використовується таблиця для розшифрування даних GSM. Варто зазначити, що не маючи кодів доступу декодування блоків і отримання коректних даних наближається до нуля. Метод шифрування не залежить від типу переданих даних (мова, дані користувача або повідомлення сигналізації). Воно застосовується лише до нормальних пакетів (normal burst).

Ідея триангуляції полягає в тому, що на випромінюючий об'єкт визначається напрямок з різних точок простору, після цього дальність до об'єкта визначається відомими кутами та відстанями між станцією. Якщо джерело радіовипромінювання розташоване в горизонтальній або вертикальній площині, то для визначення його розташування достатньо виміряти два азимутальних кута: φ_{a31} і φ_{a32} , а розташування джерела випромінювання визначається точкою перетину O_1S і O_2S .

На вимірному пеленгація кути шляхом простих обчислень, використовуючи теорему синуса, можна визначити діапазони від точок прийому до джерела радіовипромінювання.

$$D_1 = \frac{d \sin(180 - \varphi_{a32})}{\sin(\varphi_{a32} - \varphi_{a31})}, \quad (1.1)$$

$$D_2 = \frac{d \sin \varphi_{a31}}{\sin(\varphi_{a32} - \varphi_{a31})}, \quad (1.2)$$

Існуючі аналізатори спектру, в основному мають швидкість прийому даних від приладу приблизно від 20 до 200 спектрограм на секунду. Отримання даних від приладу надаються в залежності від координати та вектору напрямлення приймача.

У нашому дослідженні була представлена ідея, на основі отриманих даних які надходять з зовнішніх датчиків моніторингу, а саме з GSM антени, яка генерує інформацію щодо сили наявного сигналу та його спектру, та даних з генерації отриманих координат випромінюваного сигналу, зробити аналіз даних та забезпечити зручний спосіб моніторингу та обробки інформації, в реальному часі. У проектуванні даної

експертної системи було поєднано різні технології та підходи, які дозволяють робити аналіз спектру, повідомляти про наявність пристроїв, які випромінюють шуканий сигнал у відповідному до того діапазону частот. В проекті передбачено використання технології, які дозволяють керувати пристроєм через WEB-застосунок: технологію Java, Spring Boot - фреймворк для розробки Java-додатків; PostgreSQL - відкриту реляційну базу даних; комп'ютерну програму – SolidWorks для 3D візуалізації об'єктів; SolidWorks - програму для твердотільного моделювання (CAD) та мову програмування C/C++ - для написання прошивки до мікроконтролерів STM32.

Користувацький інтерфейс для розробленої системи являє собою розроблене середовище в якому відображаються координати знайдених джерел випромінювання (рис. 1) та їхні розраховані теоретичні координати у майбутньому часі які розраховуються на основі штучного інтелекту. Координати розраховуються відносно встановленого приладу – аналізатора GSM сигналу.

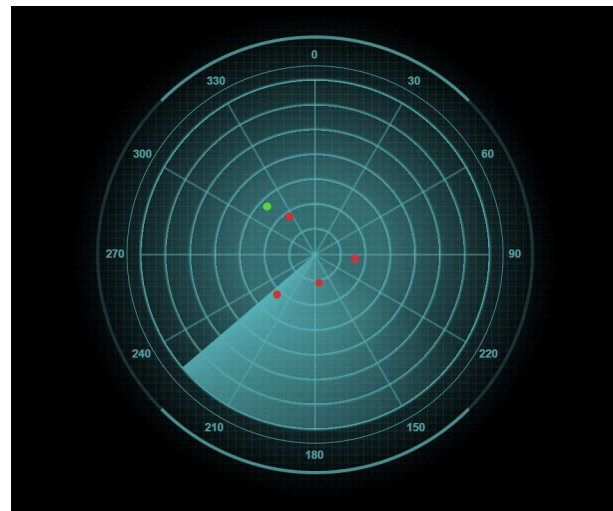


Рис. 1. Користувацький інтерфейс радару

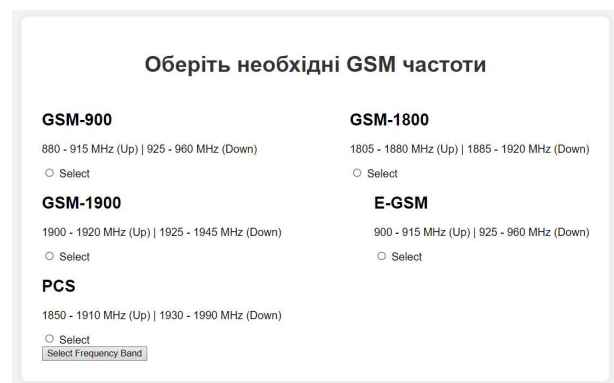


Рис. 2. Аналізу діапазони частот в інтерфейсі

Користувачі системи мають змогу обрати необхідні для аналізу діапазони частот в інтерфейсі (рис. 2), на основі яких і буде проводитись аналіз даних. Фільтрація частот дозволить виділити необхідні джерела випромінювання для подальшої роботи з ними.

Для керування кроковим двигуном за допомогою мікроконтролера використовується апаратна реалізація, яка дозволяє подати на котушки необхідну напругу. Дана апаратна реалізація посилює сигнал з мікроконтролера та керує полярністю задіяної котушки крокового двигуна. Апаратна реалізація складається з шести транзисторів, чотири з яких є силовими, а два керуючими (рис. 3). Дана система дозволяє пропускати через двигун струм в обидві сторони і регулювати його потужність. У реалізації даної схеми використовуються транзистори р-п-р типу (КТ814) та п-р-п (КТ961). Резистори використовуються по 4,7 КОМ і по 10 КОМ.

Для зв'язку мікроконтролера з комп'ютером використовувався інтерфейс передачі даних - UART, який реалізує обмін даними по двох дротах між двома пристроями, при якому передача та прийом даних відбувається по двох розділених дротах.

Найпоширеніший послідовний інтерфейс передачі UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) - протокол універсального асинхронного приймача/передавача був задіяний як пристрій, що передає послідовність бітів (зазвичай згрупованих у байтах) у безперервному потоці сигналів по одному провіднику. Обмін даними через UART відбувається у дуплексному режимі, тобто, передача та приймання даних можуть відбуватися одночасно [6]. Причому контакт передачі даних одного пристрою з'єднується з контактом прийому даних іншого і навпаки (рис. 4).

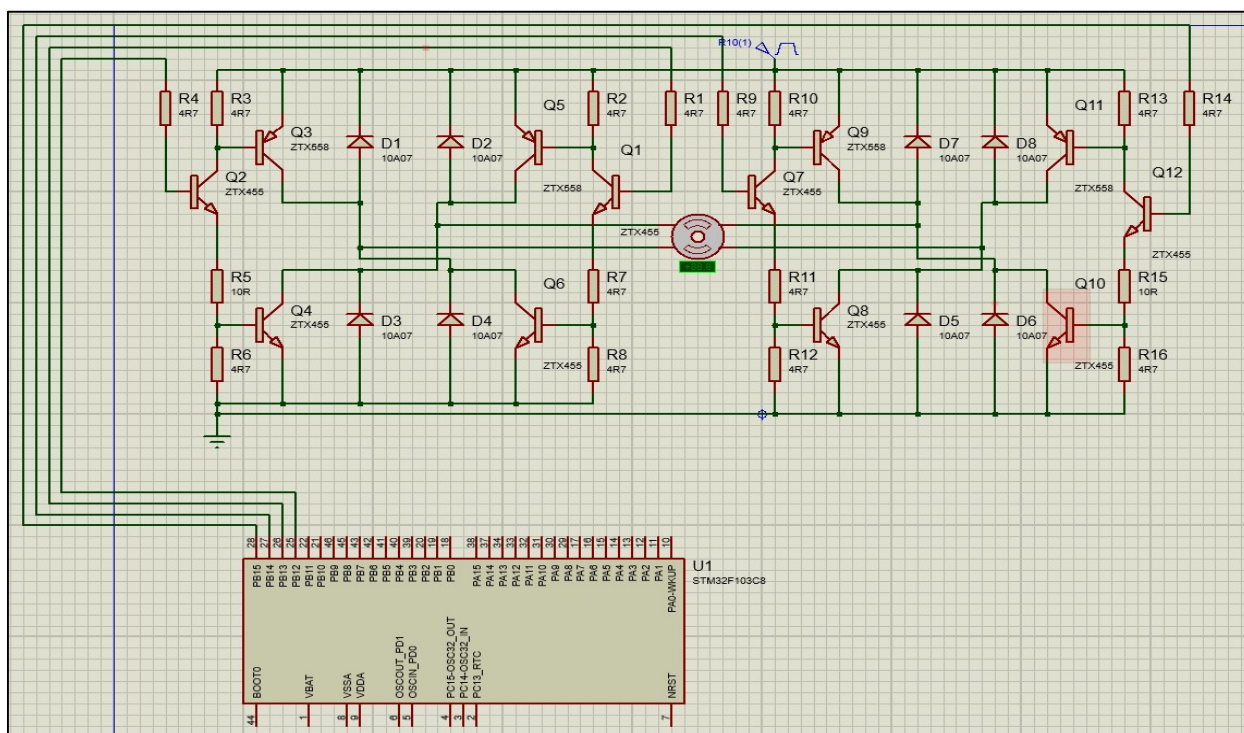


Рис. 3. Апаратна реалізація мікроконтролера з комп'ютером

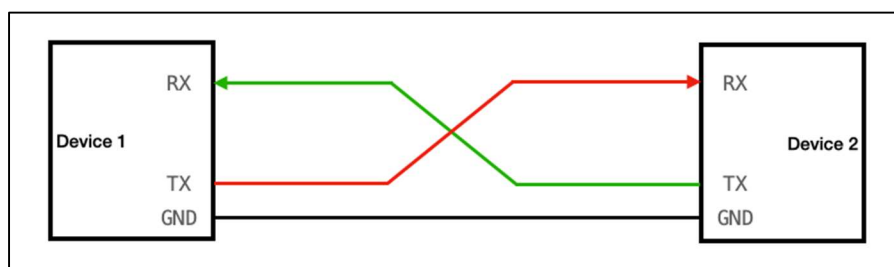


Рис. 4. Схема з'єднання контактів передачі даних

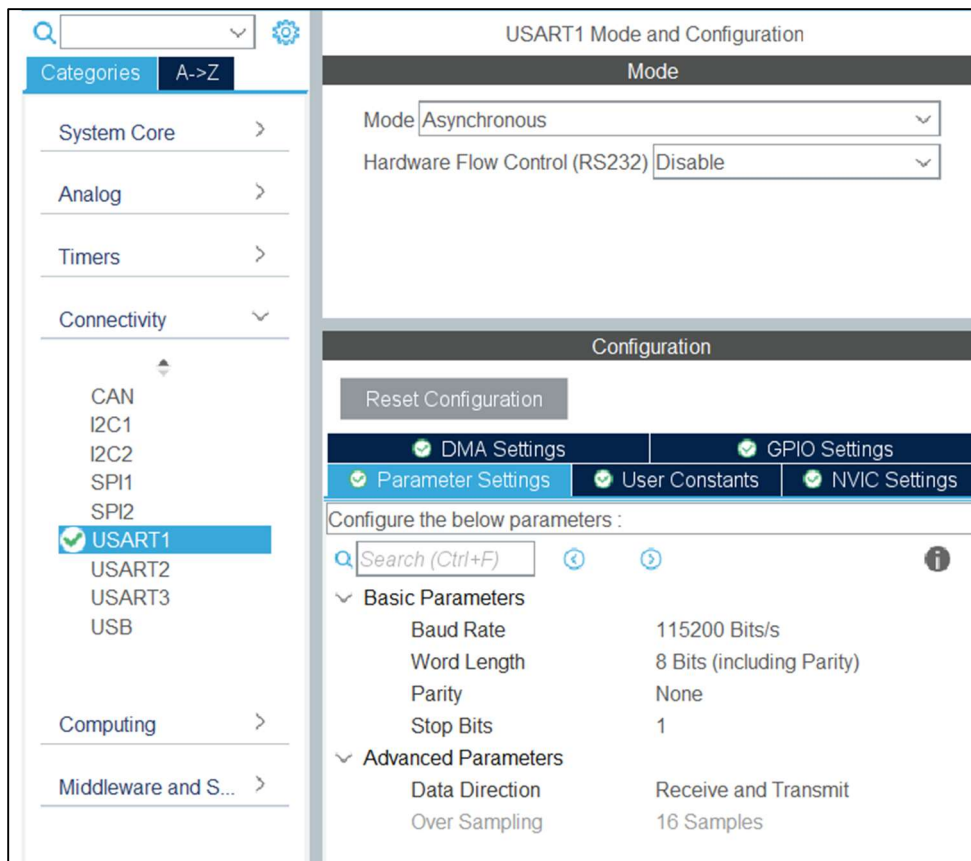


Рис. 5. Встановлення параметрів в середовищі «CubeMX»

У нашому дослідженні було обрано потужний графічний інструмент, який розроблений компанією STMicroelectronics для швидкого та ефективного створення проектів на базі мікроконтролерів сімейства STM32. Він спрощує процес конфігурації периферії, генерації початкового коду та забезпечує зручну візуалізацію проекту. Даний інструмент є незамінним для розробників, які працюють з мікроконтролерами STM32. Він значно спрощує процес створення проектів, дозволяючи зосередитися на розробці власного програмного забезпечення.

Для цього в середовищі «CubeMX» у пункті меню Connectivity вмикаємо UART1 в положення Asynchronous, після чого у налаштуваннях в Configuration встановлюємо параметри які представлено на рисунку 5.

У реальному часі відбувається прослуховування інтерфейсу UART, та в залежності від отриманого коду (даних), програма продовжує керуватись своїм алгоритмом. При отриманні відповідного коду по UART програма виконує відповідні дії, а саме перевіряє логічний стан ініціалізації антени, передає інформацію про стан крокових двигунів, рівень сигналу з антени, тощо. Отримана інформація про стан через UART інтерфейс відправляється на сервер. При

отриманні відповідних керуючих сигналів на мікроконтролер встановлюється відповідний режим роботи всієї системи.

Забезпечувальні підсистемами експертної системи складаються з розробленого програмного забезпечення, яке забезпечує коректну та надійну роботу всієї системи. Програмна складова забезпечувальних підсистем грає основну роль в коректному функціонуванні всіх складових модулів експертної системи.

Реалізація класу для здійснення обміну інформації з МК через UART інтерфейс використовує бібліотеку «jSerialComm», яка являє собою Java-бібліотеку, що надає зручний інтерфейс для роботи з послідовними (UART/COM) портами на різних платформах.

Взаємодія з послідовним портом відбувається шляхом пошуку необхідного порту, після чого відбувається встановлення параметрів конфігурації порту, такі як швидкість передачі, біти даних, стоп-біти та парність.

Швидкість передачі (Baud Rate): Швидкість передачі в бодах вказує, як швидко дані будуть передаватися через порт. Встановлюється за допомогою методу «setBaudRate(int baudRate)». Біти даних (Data Bits): Кількість бітів даних в одному байті. Зазвичай це 8 бітів. Встановлюється

за допомогою методу «setNumDataBits(int dataBits)». Стоп-біти (Stop Bits): Кількість стоп-бітів, які додаються після кожного байта для сигналізації завершення передачі. Зазвичай це 1 стоп-біт. Встановлюється за допомогою методу «setNumStopBits(int stopBits)». Реалізований клас має методи які дозволяють відкривати порт, відправити або отримати дані і закриває порт (рис. 6, рис. 7).

Реалізація забезпечувальної підсистеми на основі ШІ з використанням фреймворку Java Spring, здатна обчислювати координати руху об'єкта який випромінює GSM сигнал на основі записаних координат попереднього руху.

Java Spring передбачає розробку програмного забезпечення, яке зможе виконувати складні завдання, такі як: аналіз даних, прийняття рішень, машинне навчання, комп'ютерний зір, тощо.

```
public void writeLine(String data) throws IOException {
    byte[] b = data.getBytes();
    int l =
    activePort.writeBytes(buffer:b, bytesToWrite: b.length);
    if (l == -1) {
        throw new IOException(message: "Write error.");
    }
}

public void closePort() {
    activePort.closePort();
}
```

Рис. 6. Програмні методи для відправки даних та зачинення порту

```
@Override
public void serialEvent(SerialPortEvent event) {
    int size = event.getSerialPort().bytesAvailable();
    byte[] buffer = new byte[size];
    event.getSerialPort().readBytes(buffer, bytesToRead: size);
    String str="";
    for(byte b:buffer){
        System.out.print((char)b);

    str = str + (char) b;
    if(str.equals(anObject: "comand: 001")){
        System.out.println(x: "comand: 001");
    }
    }
    System.out.println(x: "#closePort");
    closePort();
}
```

Рис. 7. Програмний метод для отримання даних

Одна з головних переваг Spring - впровадження залежності між об'єктами, які без нього розробнику довелося б додавати вручну. Spring використовується в різних проектах, починаючи від невеликих веб-додатків до великих корпоративних систем. За останні роки він став одним з найпопулярніших фреймворків для розробки на Java. Spring використовується в компаніях різного рівня, від стартапів до відомих компаній, таких як Netflix, Spotify, і Amazon. Вибір фреймворка для розробки Java-додатків в значній мірі залежить від вимог та специфіки проекту [13].

Штучний інтелект аналізує записані координати руху та обчислює нові координати. Програмна реалізація базується на основі Deeplearning4j, яка в свою чергу

використовується для створення та навчання нейронної мережі. Deeplearning4j (DL4J) як популярна бібліотека для глибокого навчання, розроблена спеціально для мови Java, вона дозволяє створювати складні нейронні мережі та застосовувати їх для вирішення широкого кола завдань, таких як обробка природної мови, комп'ютерний зір, аналіз часових рядів та багато іншого.

Програмна реалізація (рис. 8) складалася з сервісу прогнозування руху який використовується для створення, тренування та використання моделі нейронної мережі. Вхідні нейрони відповідають за координати які отримуються з GSM антени, та являються основними даними моніторингу.

```
import org.deeplearning4j.nn.conf.layers.DenseLayer;
import org.deeplearning4j.nn.conf.layers.OutputLayer;
import org.deeplearning4j.nn.multilayer.MultiLayerNetwork;
import org.deeplearning4j.nn.weights.WeightInit;
import org.nd4j.linalg.activations.Activation;
import org.nd4j.linalg.api.ndarray.INDArray;
import org.nd4j.linalg.factory.Nd4j;
import org.nd4j.linalg.learning.config.Sgd;
import org.nd4j.linalg.lossfunctions.LossFunctions;
import org.springframework.stereotype.Service;

/**
 * Service for predicting movements based on latitude and longitude inputs.
 * @author Dima
 */
@Service
public class MovementPredictionService {
    private MultiLayerNetwork model;

    public MovementPredictionService() {
        int numInput = 2;
        int numOutputs = 2;
        int numHiddenNodes = 20;
        double learningRate = 0.01;

        MultiLayerConfiguration conf = new NeuralNetConfiguration.Builder()
            .updater(new Sgd(learningRate))
            .weightInit(WeightInit.XAVIER)
            .list()
            .layer(0, new DenseLayer.Builder().nIn(numInput).nOut(numHiddenNodes)
                .activation(Activation.RELU)
                .build())
            .layer(1, new OutputLayer.Builder(LossFunctions.LossFunction.MSE)
                .activation(Activation.IDENTITY)
                .nIn(numHiddenNodes).nOut(numOutputs).build())
            .build();

        this.model = new MultiLayerNetwork(conf);
        this.model.init();
    }
}
```

Рис. 8. Сервіс прогнозування руху

Параметри «numInput» і «numOutputs» відповідають за кількість вхідних і вихідних нейронів, які відповідають за координати. Параметр «DenseLayer» відображає кількість нейронів у прихованому шарі. Прихований шар у нейронній мережі має кілька важливих функцій, і кількість нейронів у цьому шарі має значний вплив на здатність мережі вчитися та адаптуватися до складних шаблонів у даних. Параметр «learningRate» відповідає за швидкість навчання для алгоритму. Конфігурація мережі створюється за допомогою патерну Builder, що дозволяє налаштовувати параметри нейронної мережі.

Учасниками взаємодії з експертною системою являються користувачі які відслідковують GSM сигнал для прийняття рішень щодо подальших дій. Основними учасниками взаємодії з інформаційною системою є адміністратори, які можуть проводити моніторинг у системі та керувати доступом користувачів у систему.

Експертна система збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу, передбачає можливість реєструвати учасників системи, входу до облікового запису, та відновлення доступу до системи у разі втрати даних для аутентифікації. Програмні рішення включили в себе розробку зручних WEB інтерфейсів для користувачів, написання програмних модулів для мікроконтролера STM-32, модулів з реалізацією систем III.

Висновки. У даній роботі була розкрита розроблена інтелектуальна система збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу системи прийому та подальшої обробки GSM сигналу. Розроблений апаратно-програмний фреймворк для інтелектуальної системи збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу здатний забезпечити ефективний збір даних з різноманітних датчиків, їхню попередню обробку та аналіз за допомогою сучасних алгоритмів. Розроблений прототип пристрою моніторингу демонструє високу точність вимірювань та надійність передачі даних.

Отримані результати свідчать про ефективність запропонованого підходу для вирішення задач моніторингу та аналізу даних в реальному часі. Розроблена система може бути використана в різних галузях, таких як промисловість, сільське господарство, військової галузі, охороні здоров'я. Створення мобільних систем збору та передачі даних із їх подальшою обробкою за допомогою методів штучного інтелекту є перспективним напрямом для вирішення таких завдань. Перспективними напрямками подальшого розвитку є розширення

функціональності фреймворку, додавання нових алгоритмів машинного навчання та інтеграція з хмарними платформами.

Література

1. Білокопитов Д. С. Інтелектуальна система збору та систематизації даних з мережі пристроїв моніторингу: магістер. диплом. робота: 122, Комп'ютерні науки / Білокопитов Дмитро Сергійович; наук. керівник Шевченко А. І.; КНЕУ ім. Вадима Гетьмана, Навч.-наук. ін-т «Ін-т інформ. технологій в економіці», Каф. інформ. систем в економіці. Київ, 2024. 86 с.
2. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку: Конспект лекцій. Одеса: ОНАЗ, 2004. 76 с.
3. Голь В.Д., Ірха М.С. Системи передачі даних: конспект лекції. Київ: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 126с.
4. Кайдено, М.М., Роскошний, Д.В. (2018). Архітектура програмно-визначуваних радіосистем для розробки радіобладнання. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій». вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/131302>.
5. Рязанцев О. В. Конспект лекцій з дисципліни «Основи мобільного зв'язку» освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», укл. Рязанцев О. В., Кам'янське; ДДТУ, 2019 р. 75с.
6. Сергій Матвієнко. Урок 10 по STM32: Урок 10 по STM32: UART (загальні відомості). Інформаційний ресурс про електроніку та програмування. IT Master - електроніка та програмування. URL: <https://itmaster.biz.ua/electronics/stm32/stm32-uart-project-blocking.html>.
7. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С.О. Кравчук; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 18,6 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 682 с.
8. Abdulkareem A., Dike U. Ike, Adewale A. Ajao, Ad-elakun A. A . Programming a Computer and a Microcontroller to Control the Speed and Direction of DC Motors. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2014. 3. 5046-5053. URL: https://www.researchgate.net/publication/315706774_Programming_a_Computer_and_a_Microcontroller_to_Control_the_Speed_and_Direction_of_DC_Motors.
9. Güven Y., Coşgun E., Kocaoglu S., Gezici H. , Yilmazlar E. Understanding the Concept of Microcontroller Based Systems To Choose The Best Hardware For Applications. Research Inventy: International

- Journal of Engineering And Science .Vol.6, Issue 9 (September 2017), PP. 38-44. URL: https://www.researchgate.net/publication/322436662_Understanding_the_Concept_of_Microcontroller_Based_Systems_To_Choose_The_Best_Hardware_For_Applications.
10. Morkun V.S. Development of a method for studying traffic of multiservice networks/ Morkun V.S., Hryshchenko S. M., Nizhehorodtsev V.O., Filonenko M.M., Lagovsky V.V. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2023. №2. P.125-133. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-13>.
 11. Steenbruggen J. Borzacchiello M. T., Nijkamp P. Scholten H. Mobile phone data from GSM networks for trafficparameter and urban spatial pattern assessment:a review of applications and opportunities. GeoJournal. 2013. 78:223-243.DOI 10.1007/s10708-011-9413-y.
 12. V.S Morkun. Investigation of a microcontroller control device at a beneficiation plant with fine screening technology / V.S Morkun, S.M. Hryshchenko, Y.O. Hryshchenko, V.O. Nizhehorodtsev, D.E. Tananaiev. // Вісник Криворізького національного університету. Кривий Ріг, 2024. Вип. 58. С. 22-30. URL: <http://visnykknu.com.ua/ua/journal/#2024>.
 13. Yuliia Tunik. З резюме джуна: Spring Framework — популярний фреймворк на Java. 2023. URL: <https://javarush.com/ua/groups/posts/6468-z-rezjume-dzhuna-spring-framework--populjarniy-freymvork-na-java?post=full#discussion>.
- References**
1. Bilokopytov D. S. Intelktualna systema zboru ta systematyzatsii danykh z merezhi prystroiv monitorynhu: mahister. dyplom. robota: 122, Kompiuterni nauky / Bilokopytov Dmytro Serhiiiovych; nauk. kerivnyk Shevchenko A. I.; KNEU im. Vadyma Hetmana, Navch.-nauk. in-t «Int inform. tekhnolohii v ekonomitsi», Kaf. inform. system v ekonomitsi. Kyiv, 2024. 86 s.
 2. Boiko M.P. Systemy stilnykovoho zviazku: Konspekt lektzii. Odesa: ONAZ, 2004. 76 s.
 3. Hol V.D., Irkha M.S. Systemy peredachi danykh: konspekt lektzii. Kyiv: ISZZI KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. 126s.
 4. Kaidenko, M.M., Roskoshnyi, D.V. Arkhitektura prohramno-vyznachuvanykh radiosystem dlia rozrobky radioobladnannia. Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Perspektyvy telekomunikatsii». 2018. vylucheno iz <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/131302>.
 5. Riazantsev O. V. Konspekt lektzii z dystsypliny «Osnovy mobilnogo zviazku» osvithoprofesiinoi prohramy pershoho(bakalavrskoho) rivnia vyshchoi osvity zi spetsialnosti 172 «Telekomunikatsii ta radiotekhnika», ukl. Riazantsev O. V., Kamianske; DDTU, 2019 r. 75s.
 6. Serhii Matviienko. Urok 10 po STM32: Urok 10 po STM32: UART (zahalni vidomosti). Informatsiinyi resurs pro elektroniku ta prohramuvannia. IT Master - elektronika ta prohramuvannia.URL: <https://itmaster.biz.ua/electronics/stm32/stm32-uart-project-blocking.html>.
 7. Teoriia system mobilnykh infokomunikatsii. Systemna arkhitektura [Elektronnyi resurs]: navchalnyi posibnyk dlia stud. spetsialnosti 172 «Telekomunikatsii ta radiotekhnika» / S.O. Kravchuk; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi danni (1 fail: 18,6 Mbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2023. 682 s.
 8. Abdulkareem A., Dike U. Ike, Adewale A. Ajao, Adelakun A. A . Programming a Computer and a Microcontroller to Control the Speed and Direction of DC Motors. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2014. 3. 5046-5053. URL: https://www.researchgate.net/publication/315706774_Programming_a_Computer_and_a_Microcontroller_to_Control_the_Speed_and_Direction_of_DC_Motors.
 9. Güven Y., Coşgun E., Kocaoğlu S., Gezici H. , Yilmazlar E. Understanding the Concept of Microcontroller Based Systems To Choose The Best Hardware For Applications. Research Inveny: International Journal of Engineering And Science .Vol.6, Issue 9 (September 2017), PP. 38-44. URL: https://www.researchgate.net/publication/322436662_Understanding_the_Concept_of_Microcontroller_Based_Systems_To_Choose_The_Best_Hardware_For_Applications.
 10. Morkun V.S. Development of a method for studying traffic of multiservice networks/ Morkun V.S., Hryshchenko S. M., Nizhehorodtsev V.O., Filonenko M.M., Lagovsky V.V. // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2023. №2. R.125-133. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-13>.
 11. Steenbruggen J. Borzacchiello M. T., Nijkamp P. Scholten H. Mobile phone data from GSM networks for trafficparameter and urban spatial pattern assessment:a review of applications and opportunities. GeoJournal. 2013. 78:223-243.DOI 10.1007/s10708-011-9413-y.
 12. V.S Morkun. Investigation of a microcontroller control device at a beneficiation plant with fine screening technology / V.S Morkun, S.M. Hryshchenko, Y.O. Hryshchenko, V.O. Nizhehorodtsev, D.E. Tananaiev. // Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu. Kryvyi Rih, 2024. Vyp. 58. S. 22-30. URL: <http://visnykknu.com.ua/ua/journal/#2024>.
 13. Yuliia Tunik. Z reziume dzhuna: Spring Framework — populjarnyi freimvork na Java. 2023. URL: <https://javarush.com/ua/groups/posts/6468-z-rezjume-dzhuna-spring-framework--populjarniy-freymvork-na-java?post=full#discussion>.

Nizhegorodtsev V.O., Bilokopytov, Filonenko M. M., Lagovskyi V. V. Hardware and software framework of an intelligent system for data collection from gsm technology monitoring

The complex system of observation, collection, processing, systematization and analysis of data from a network of devices for monitoring information about the state of the environment allows you to obtain reasonable recommendations for making management decisions in various industries, such as industry, agriculture, military and healthcare. The creation of mobile data collection and transmission systems with their further processing with the help of artificial intelligence methods is a promising direction for solving such problems. To achieve this goal, modern programming methods and tools, data analysis methods, as well as hardware capabilities of modern sensors and microcontrollers are used.

Such systems can significantly and positively affect the country in various aspects, and the development of systems for collecting and systematizing data from network monitoring devices provides space for the development of related questions that can be raised, namely: the ethics of using and creating artificial intelligence, the dependence of all humanity on technology, the optimization of virtual reality technologies.

The purpose of the research is to design a system for receiving and further processing a GSM signal, which will help design data encryption modules for transmitting and storing information, collecting and systematizing data from a network of monitoring devices.

Based on the received data coming from external monitoring sensors, namely from the GSM antenna, which generates information about the strength of the available signal and its spectrum, and data from the generation of the received coordinates of the emitted signal, to analyze the data and provide a convenient way to monitor and process information in real time.

The scientific novelty consists in substantiating the grounds for creating a hardware and software prototype of an intelligent data collection system from a network of monitoring devices based on a complex of engineering, technical and research works: analysis of hardware products for monitoring the radio environment, design of a mobile platform and modeling of its elements, creation of a relational data model of the DBMS, the system user interface, and configuration of the data processing server.

Keywords: *microcontroller, monitoring, software, sensor, GSM.*

Ніжегородцев Владислав Олександрович – к.пед.н., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), nizhegorodtsev@ukr.net.

Білокопитов Дмитро Сергійович – магістр Навчально-наукового інституту «Інститут інформаційних технологій в економіці» освітньо-професійної програми «Системи штучного інтелекту» Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана (Київ), dmitry.ua.kiev@gmail.com.

Філоненко Михайло Миколайович – к.фіз.-мат. н., завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), filonenko.mykhaylo@gmail.com.

Лаговський Володимир Вікторович – к.е.н., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), vvlagovsky2@gmail.com.

Стаття подана 20.10.2024.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 5 (285) 2024**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 10.12.2024 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 9,7. Обл.-вид. арк. 10,9.
Наклад 50 прим. Вид. № 3398. Замов. № __.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна
E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com