

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра інженерії вагонів та якості продукції

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕХНІКИ ПРИ  
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Пояснювальна записка і розрахунки  
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ.175.26.16.00. ПЗ

Розробила студентка групи 217-ЯСС-324  
спеціальності 175 «Інформаційно-  
вимірювальні технології» освітньої програми  
«Якість, стандартизація та сертифікація»  
(роботу виконано самостійно, відповідно до  
принципів академічної доброчесності)

 Ірина ЛУПІКА

Керівник: професор, д-р техн. наук  
Ларіса ТИМОФЄЄВА

Рецензент: викладач ХДППФК ім. В.І.  
Вернадського, PhD з матеріалознавства  
Андрій ЗАХАРОВ

# Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний

Кафедра інженерії вагонів та якості продукції

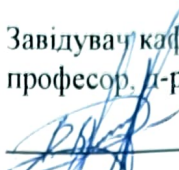
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність – 175 «Інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма – «Якість, стандартизація, сертифікація»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,  
професор, д-р техн. наук

 В. Г. Равлюк

« 20 » 11 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Лупіки Ірини Федорівни

1 Тема «Удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях».

керівник Тимофєєва Ларіса Андріївна, професор, д-р техн. наук

затверджені наказом по механіко-енергетичному факультету від

“ ” 2025 року № .

2 Строк подання студентом закінченої роботи «28» грудня 2025 року.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи отримати під час проходження переддипломної практики на підприємстві технічного профілю, що здійснює експлуатацію техніки та проводить експлуатаційні дослідження її технічного стану й робочих параметрів.

4. Під час проходження переддипломної практики необхідно ознайомитися з організаційною структурою підприємства, функціональними обов'язками його підрозділів, умовами та режимами експлуатації техніки, а також із внутрішньою технічною, технологічною та нормативно-методичною документацією у сфері вимірювання експлуатаційних параметрів. Студент повинен вивчити нормативно-правову та стандартну базу з метрологічного забезпечення вимірювань, а також проаналізувати чинну практику організації вимірювального контролю, застосування засобів вимірювання та забезпечення точності вимірювань у процесі експлуатаційних досліджень.

5. На основі зібраних матеріалів необхідно сформулювати методичний підхід до удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях, виконати аналіз застосовуваних вимірювальних методик і засобів, визначити основні проблемні аспекти вимірювального контролю та обґрунтувати напрями їх удосконалення. Студент має отримати вихідні дані для виконання аналітичної та економічної частин роботи, зокрема щодо точності та достовірності вимірювань, організації вимірювальних процесів і ефективності експлуатації.

6 Перелік графічного матеріалу:

Графічний матеріал виконати у вигляді презентації (обсяг 15-20 слайдів).

7 Дата видачі завдання «24» лютого 2025 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи                                                                  | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1. Ознайомлення з діяльністю підприємства та технічною документацією у сфері експлуатаційних досліджень техніки.   | 26.02 - 02.03                 | виконано |
| 2. Аналіз нормативно-правової та стандартної бази метрологічного забезпечення вимірювань при експлуатації техніки. | 03.03 – 13.04                 | виконано |
| 3. Дослідження методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки та оцінювання їх точності.         | 14.04 – 10.06                 | виконано |
| 4. Аналіз системи вимірювального контролю і моніторингу технічного стану техніки.                                  | 11.06 – 03.07                 | виконано |
| 5. Обґрунтування та розроблення удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях.      | 04.07 – 01.09                 | виконано |
| 6. Оцінка економічної та організаційної ефективності впровадження запропонованих рішень.                           | 02.09 – 05.10                 | виконано |
| 7. Розробка та оформлення слайдів                                                                                  | 06.10 - 16.11                 | виконано |
| 8. Отримання рецензії на МКР                                                                                       | 01.12.25                      | виконано |
| 9. Захист МКР в ДЕК                                                                                                | 15.01.26                      |          |

Студентка Лупіка Ірина Ірина ЛУПІКА

Керівник Тимофєєва Ларіса Ларіса ТИМОФЄЄВА

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота включає 15 слайдів презентації та 111 аркушів пояснювальної записки формату А4.

Ключові слова: експлуатаційні дослідження, вимірювальні процеси, засоби вимірювання, метрологічне забезпечення, точність вимірювань, невизначеність, технічний стан, ефективність експлуатації техніки.

Об'єктом дослідження є техніка, що перебуває в експлуатації, як об'єкт вимірювального контролю та експлуатаційних досліджень.

Предметом дослідження є методи, засоби та організаційно-методичні підходи до вимірювання експлуатаційних параметрів техніки в процесі її функціонування.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування та розроблення напрямів удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях з метою підвищення точності та достовірності результатів вимірювань, зниження метрологічних ризиків і підвищення ефективності експлуатації машин і механізмів.

У роботі проаналізовано теоретичні та нормативно-методичні засади вимірювань при експлуатаційних дослідженнях техніки, розглянуто вимоги національних і міжнародних стандартів у сфері метрології, технічної діагностики та управління якістю. Проведено аналіз чинних методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки, організації вимірювальних процесів в умовах реальної експлуатації та виявлено основні проблемні аспекти, що знижують точність вимірювань і достовірність оцінювання технічного стану.

Розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях, які передбачають застосування сучасних вимірювальних засобів, удосконалення методик вимірювання, впровадження елементів автоматизованого збору й обробки даних. Виконано оцінку економічної та організаційної ефективності запропонованих заходів, а також розглянуто питання охорони праці та безпеки під час проведення експлуатаційних вимірювань.

## ABSTRACT

The qualification work includes 15 presentation slides and 111 pages of explanatory notes in A4 format.

Keywords: operational research, measurement processes, measuring instruments, metrological support, measurement accuracy, uncertainty, technical condition, efficiency of equipment operation.

The object of the study is equipment in operation as an object of measurement control and operational research.

The subject of the study is methods, measuring instruments, and organizational and methodological approaches to measuring operational parameters of equipment during its functioning.

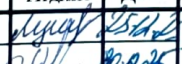
The purpose of the qualification work is to substantiate and develop directions for improving methods and instruments for measuring equipment during operational research in order to increase measurement accuracy and reliability, reduce metrological risks, and improve the efficiency of equipment operation.

The work analyzes theoretical and regulatory foundations of measurements in operational research, as well as national and international standards in the field of metrology, technical diagnostics, and quality management. Existing measurement methods and instruments, as well as the organization of measurement processes under real operating conditions, are analyzed, and the main problem areas that reduce measurement accuracy and reliability of technical condition assessment are identified.

Practical recommendations for improving measurement methods and instruments for equipment during operational research are developed, including the use of modern measuring instruments, improvement of measurement methodologies, and implementation of automated data acquisition and processing elements. The economic and organizational efficiency of the proposed measures is evaluated, and occupational health and safety issues during operational measurements are considered.

## Зміст

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ                                                                                                                                             | 9  |
| 1 Теоретичні основи експлуатаційних вимірювань техніки                                                                                            | 12 |
| 1.1. Сутність, роль та значення вимірювань у процесі експлуатаційних досліджень техніки                                                           | 12 |
| 1.2. Нормативно-правові засади, стандарти та вимоги до вимірювань у процесі експлуатаційних досліджень техніки                                    | 15 |
| 1.3. Особливості, умови та фактори, що впливають на точність вимірювань під час експлуатаційних досліджень техніки                                | 18 |
| 1.4. Класифікація методів та засобів вимірювання, що застосовуються під час експлуатаційних досліджень техніки                                    | 21 |
| 1.5. Сучасні тенденції розвитку методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки                                           | 25 |
| Висновки до розділу 1                                                                                                                             | 28 |
| 2 Аналіз існуючих методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки                                                         | 30 |
| 2.1. Аналіз існуючих засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки                                                                       | 30 |
| 2.2. Недоліки існуючих методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки                                                     | 34 |
| 2.3. Обґрунтування необхідності удосконалення методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки                             | 38 |
| 2.4. Узагальнення результатів аналізу та формування вимог до удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки | 41 |
| Висновки до розділу 2                                                                                                                             | 43 |

|           |          |          |                                                                                     |          |                                                                                       |         |       |         |
|-----------|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|---------|
|           |          |          |                                                                                     |          | МКРМЕ.175.26.16.00. ПЗ                                                                |         |       |         |
| Зм        | Аркуш    | № докум. | Підпис                                                                              | Дата     | Удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях | Літер   | Аркуш | Аркушів |
| Розробив  | Лушка    |          |  | 20.06.25 |                                                                                       |         | 4     | 90      |
| Перевірив | Тимофєєв |          |  | 20.06.25 |                                                                                       |         |       |         |
| Реценз.   | Захаров  |          |  | 20.06.25 |                                                                                       |         |       |         |
| Н. контр. | Шовкун   |          |  | 20.06.25 |                                                                                       |         |       |         |
| Затв.     | Равлюк   |          |  | 20.06.25 |                                                                                       | УкрДУЗТ |       |         |

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3 Удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях                                                                     | 45 |
| 3.1. Обґрунтування напрямків удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях                                          | 45 |
| 3.2. Розробка удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки                                                                          | 49 |
| 3.3. Оцінка точності та достовірності удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки                                                  | 52 |
| 3.4. Практична апробація та оцінка ефективності удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки                                        | 56 |
| 3.5. Узагальнення результатів дослідження, кількісна оцінка ефективності та практичні рекомендації щодо впровадження удосконаленого методу вимірювання      | 59 |
| 3.6. Загальна оцінка результатів удосконалення та перспективи подальшого розвитку методів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки              | 64 |
| 3.7. Загальні науково-практичні підсумки дослідження та обґрунтування доцільності впровадження удосконаленого методу вимірювання                            | 67 |
| 3.8. Комплексне узагальнення, порівняльна оцінка та практичне значення удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях | 72 |
| 3.9. Практична реалізація та оцінювання ефективності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки      | 76 |
| 3.10. Узагальнена оцінка науково-практичної ефективності удосконалених методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях               | 80 |
| Висновки до розділу 3                                                                                                                                       | 83 |
| 4 Охорона праці та безпека при виконанні експлуатаційних вимірювань                                                                                         | 85 |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Економічна доцільність та загальна оцінка ефективності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки | 85  |
| 4.2. Аналіз і структура витрат на впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки                           | 90  |
| 4.3. Розрахунок економічного ефекту та терміну окупності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання                                             | 94  |
| 4.4. Охорона праці та безпека під час виконання вимірювань при експлуатаційних дослідженнях техніки                                                           | 97  |
| 4.5. Соціально-організаційний ефект від упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки                     | 100 |
| Висновки до розділу 4                                                                                                                                         | 103 |
| Загальні висновки                                                                                                                                             | 105 |
| Список використаних джерел                                                                                                                                    | 108 |

|    |       |          |        |      |                        |
|----|-------|----------|--------|------|------------------------|
|    |       |          |        |      | МКРМЕ.175.26.16.00. ПЗ |
|    |       |          |        |      |                        |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                        |

## Вступ

У сучасних умовах розвитку технічних систем, підвищення інтенсивності навантажень та зростання вимог до ефективності та надійності машин особливого значення набувають експлуатаційні дослідження, що дозволяють оцінити фактичний стан техніки, її працездатність та відповідність нормативним показникам. Експлуатаційні дослідження є важливою складовою інженерної практики, адже саме у реальних умовах функціонування проявляються ті фактори, які неможливо передбачити під час лабораторних або стендових випробувань. Зростаюча складність сучасних машин, використання інтелектуальних систем керування, вимоги до енергоефективності та ресурсозбереження обумовлюють необхідність удосконалення методів і засобів вимірювання, що застосовуються під час їх експлуатаційного аналізу.

Якість експлуатаційних досліджень напряму залежить від достовірності отримуваної вимірювальної інформації. Саме вимірювання є основою для визначення технічних параметрів, оцінки відповідності нормам, постановки діагнозу технічному стану, прогнозування залишкового ресурсу та прийняття управлінських рішень щодо ремонту чи модернізації. Тому актуальним завданням сучасної метрології є підвищення точності, швидкодії та надійності вимірювальних процесів, що застосовуються під час експлуатації техніки в умовах впливу динамічних навантажень, вібрацій, температурних перепадів, агресивних середовищ та інших зовнішніх факторів.

Традиційні методи вимірювання, що були достатніми для техніки попередніх поколінь, часто не відповідають вимогам сучасних машин і устаткування. Підвищення швидкості технологічних процесів, впровадження автоматизації та цифрових систем керування висувають нові вимоги до вимірювальних засобів. Точність вимірювання теплових,

механічних, електричних та динамічних параметрів має відповідати не тільки нормативним документам, але й вимогам інтеграції в інтелектуальні системи моніторингу стану техніки, Industry 4.0, цифрові двійники. Такі системи вимагають отримання даних у режимі реального часу, високої частоти дискретизації, мінімізації похибок та можливості автоматичного аналізу великих масивів інформації.

Проблематика удосконалення методів і засобів вимірювання має комплексний характер. Вона охоплює питання вибору відповідних сенсорів, розроблення нових схем їх встановлення, методичних підходів до оцінювання похибок, використання цифрової обробки сигналів, впровадження дистанційного моніторингу та діагностичних систем. Окремої уваги потребує питання забезпечення простежуваності результатів, калібрування засобів вимірювань, а також оцінювання невизначеності при змінних експлуатаційних навантаженнях.

На сьогодні існує низка невирішених проблем, пов'язаних з експлуатаційними вимірюваннями: по-перше, недостатня адаптованість традиційних методів до роботи в умовах *in-situ*, де техніка функціонує у нестабільному та змінному середовищі; по-друге, обмежена точність і надійність застарілих засобів вимірювання, що не враховують впливу багатofакторних навантажень; по-третє, недостатній рівень автоматизації та цифровізації збору даних, що ускладнює використання результатів для подальшого технічного аналізу; по-четверте, відсутність уніфікованих методик, придатних для інтеграції у сучасні системи діагностики та прогнозування технічного стану.

Удосконалення методів і засобів вимірювання дозволяє вирішити зазначені проблеми та забезпечити новий рівень достовірності експлуатаційних досліджень. Розроблення інноваційних підходів до вимірювань сприяє підвищенню точності діагностики, ранньому виявленню несправностей, оптимізації режимів роботи техніки, продовженню її

ресурсу та зменшенню витрат на технічне обслуговування і ремонт. У цьому контексті важливим є розвиток безконтактних методів вимірювання, застосування вібродіагностичних технологій, термографії, інтелектуальних сенсорів, модулів інтернету речей (IoT), а також цифрових засобів збору та оброблення експлуатаційної інформації.

Об'єктом дослідження у роботі є процес вимірювання параметрів техніки під час експлуатаційних досліджень. Предметом — методи, засоби та технологічні рішення, що забезпечують підвищення точності та ефективності експлуатаційних вимірювань.

Метою дипломної роботи є розроблення та обґрунтування удосконалених методів і засобів вимірювання техніки під час експлуатаційних досліджень, що забезпечують підвищення їх точності, надійності та інформативності в реальних умовах роботи технічних систем.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

- проведення аналізу сучасного стану вимірювальних технологій у сфері експлуатаційних досліджень техніки;
- вивчення впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань у реальних умовах роботи машин;
- аналіз існуючих методів контролю параметрів техніки та виявлення їх недоліків;
- обґрунтування вимог до точності та технічних характеристик засобів вимірювання;
- розроблення удосконалених методів і схем вимірювання, що підвищують достовірність експлуатаційних даних;
- оцінка метрологічних характеристик запропонованих рішень;
- визначення практичної ефективності впровадження нових методів і засобів у реальні експлуатаційні дослідження.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні узагальненої моделі удосконаленого експлуатаційного вимірювання, яка враховує вплив комплексних факторів експлуатації та забезпечує зниження похибок, що виникають у традиційних методах контролю.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованих рішень для підвищення ефективності діагностики техніки, оптимізації режимів її роботи, зменшення витрат на обслуговування, підвищення безпеки експлуатації та подовження міжремонтного ресурсу машин.

Структура роботи включає вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. У першому розділі розглянуто теоретичні основи експлуатаційних вимірювань та сучасні підходи до контролю технічного стану машин; у другому — виконано аналіз існуючих методів і засобів вимірювання та встановлено їх переваги й недоліки; у третьому — запропоновано удосконалені методи та засоби вимірювання і проведено оцінку їх ефективності.

## 1 Теоретичні основи експлуатаційних вимірювань техніки

### 1.1. Сутність, роль та значення вимірювань у процесі експлуатаційних досліджень техніки

Експлуатаційні дослідження техніки є одним із найважливіших напрямів технічної діагностики, що дозволяє не лише оцінити фактичний стан машин і механізмів, але й виявити закономірності їх роботи, визначити рівень впливу зовнішніх факторів на функціонування, спрогнозувати залишковий ресурс та встановити причини можливих відмов. Центральне місце у цих процесах посідають вимірювання параметрів, що супроводжують роботу техніки. Вимірювальна інформація виступає основою для аналізу, порівняння, контролю та управління технічними об'єктами під час їх реальної експлуатації.

У сучасних технічних системах вимірювання виконують функцію зв'язуючого елемента між реальними процесами, що відбуваються у машині, та інформаційними моделями, які застосовуються для її оцінювання, діагностування або прогнозування поведінки. Техніка сьогодні працює у середовищі підвищених вимог до точності, продуктивності й енергоефективності, тому достовірність вимірювальних даних стає не просто необхідністю, а ключовою умовою безпечної і раціональної експлуатації. Ненадійні або неточні дані призводять до неправильних висновків про технічний стан, збільшення ризику відмов, неефективного використання ресурсів і, зрештою, до фінансових втрат.

Експлуатаційні вимірювання відрізняються від лабораторних або стендових тим, що проводяться в реальних умовах функціонування техніки — у стані руху, під дією змінних навантажень, при впливі температурних коливань, вібрацій, запилення, агресивних середовищ та інших чинників. Це створює специфічні умови, у яких вимірювальні засоби мають

забезпечувати стабільність, точність і надійність навіть за наявності збурень, що ускладнюють виконання вимірювальних процедур. Таким чином, складність експлуатаційних умов зумовлює необхідність застосування спеціальних методів і технічних засобів, здатних фіксувати параметри без перешкод, миттєвих відхилень і втрати точності.

Під час експлуатаційних досліджень здійснюється вимірювання широкого спектра параметрів — температурних, механічних, електричних, акустичних, вібраційних, навантажувальних тощо. Кожний із них несе важливу діагностичну інформацію, що дозволяє судити про процеси зносу деталей, зміну характеристик вузлів, наявність аномалій або прихованих дефектів. Наприклад, контроль температури робочих рідин дає змогу оцінити ефективність тепловідведення, аналіз вібраційного стану - визначити ступінь розбалансування або дефекти підшипникових опор, вимірювання навантажень - виявити перевищення допустимих режимів роботи.

У зв'язку зі зростанням технічної складності машин збільшується потреба у точних і швидкодіючих засобах вимірювання, що здатні забезпечити реєстрацію параметрів у динаміці. Багато експлуатаційних процесів є нестаціонарними, змінюються в межах секунд або навіть мілісекунд, тому класичні статичні методи вимірювання вже не відповідають сучасним вимогам. Необхідним є перехід до цифрових технологій вимірювання, автоматизованого збору даних, застосування мікропроцесорних систем контролю та реєстрації, використання сенсорів нового покоління.

Важливою особливістю експлуатаційних вимірювань є те, що вони виконують роль індикатора відповідності техніки нормам і технічним регламентам. У багатьох випадках саме вимірювальні процедури визначають можливість подальшого використання машини, продовження її ресурсу або потребу у ремонті. На основі даних експлуатаційних

вимірювань формуються графіки технічного обслуговування, встановлюються параметри регулювань, проводиться модернізація окремих вузлів.

Достовірність експлуатаційних вимірювань також відіграє ключову роль у процесі прогнозування технічного стану техніки. Методи прогнозування залишкового ресурсу базуються на аналізі масивів даних, які повинні бути отримані з високою точністю. Якщо вимірювальна інформація містить значні похибки, прогностичні моделі втрачають свою ефективність, що створює ризики як технічного, так і економічного характеру.

Сучасні світові тенденції розвитку експлуатаційних вимірювань пов'язані з впровадженням концепції «розумної техніки», де кожний технічний об'єкт оснащений системою самоаналізу, самодіагностики та автоматичного контролю параметрів. Ці системи працюють на базі високочутливих сенсорів, цифрових засобів реєстрації, алгоритмів машинного навчання та хмарних технологій збереження даних. Тому вимірювання у процесі експлуатаційних досліджень техніки вже давно перестали бути лише допоміжною функцією — вони стали основою для побудови цифрових моделей машин, систем технічного моніторингу та інтелектуальних механізмів прогнозування відмов.

З огляду на зазначене, удосконалення методів і засобів вимірювання у процесі експлуатаційних досліджень є одним із ключових напрямів розвитку сучасної технічної науки. Воно забезпечує підвищення точності діагностики, зменшення експлуатаційних витрат, покращення безпеки та надійності роботи машин. Висока якість вимірювань формує основу для обґрунтованих технічних рішень, забезпечує ефективність експлуатації техніки та сприяє підвищенню рівня технологічного розвитку підприємств.

1.2. Нормативно-правові засади, стандарти та вимоги до вимірювань у процесі експлуатаційних досліджень техніки

Удосконалення методів і засобів вимірювання техніки неможливе без глибокого розуміння нормативно-правової бази, яка визначає вимоги до вимірювальних процедур, засобів вимірювання, оброблення результатів та забезпечення достовірності отриманих даних. Нормативне регулювання у сфері експлуатаційних вимірювань охоплює широкий спектр питань - від принципів організації метрологічної діяльності та норм точності вимірювань до правил технічної експлуатації машин, вимог до контролю параметрів технічного стану та стандартів, що визначають структуру та якість виконання експлуатаційних досліджень.

Одним із ключових документів, що визначає основу метрологічної діяльності в Україні, є Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Він регламентує порядок забезпечення єдності вимірювань, встановлює критерії придатності засобів вимірювання, вимоги до їх калібрування та повірки, а також визначає права та обов'язки суб'єктів метрологічної діяльності. Для експлуатаційних досліджень цей закон має принципове значення, оскільки встановлює загальну модель організації вимірювальних процедур, що забезпечує їх точність та законодавчу відповідність. Згідно з ним, будь-який засіб вимірювальної техніки, який застосовується для визначення параметрів, що впливають на безпеку, якість чи технічний стан машин, має бути сертифікованим, повіреним та внесеним до відповідного реєстру.

Важливу роль у формуванні методології експлуатаційних вимірювань відіграють міжнародні стандарти ISO та IEC, гармонізовані з національними стандартами ДСТУ. Зокрема, стандарти ISO 9001 та ISO 10012 встановлюють вимоги до систем управління якістю та систем управління вимірювальними процесами. Вони наголошують на необхідності визначення вимог до точності вимірювань, впровадження методів оцінювання невизначеності, забезпечення простежуваності результатів до

національних або міжнародних еталонів, а також постійного вдосконалення вимірювальних процедур. У контексті експлуатаційних досліджень ці стандарти регламентують підхід до організації вимірювальних процесів у реальних умовах роботи техніки, де точність і стабільність результатів часто визначають можливість подальшої експлуатації машини.

Для лабораторій, що проводять вимірювання технічних параметрів машин, обов'язковим орієнтиром є стандарт ISO/IEC 17025, який визначає вимоги до компетентності, технічного оснащення, кваліфікації персоналу, методик вимірювань та оцінювання невизначеності. Цей стандарт передбачає, що лабораторія повинна мати документовані методики виконання вимірювань, підтверджену простежуваність результатів, регулярно калібровані засоби вимірювання та впроваджені процедури внутрішнього контролю якості. З точки зору експлуатаційних досліджень, відповідність цьому стандарту означає здатність лабораторії забезпечувати високоточні вимірювання в умовах, що наближені до реальних режимів роботи техніки.

Суттєвий вплив на організацію експлуатаційних вимірювань мають також галузеві стандарти і технічні регламенти, які встановлюють вимоги до конструкції машин, правил їх експлуатації, допустимих режимів роботи та методів контролю технічного стану. Наприклад, стандарти щодо технічного обслуговування і ремонту машин передбачають регулярний контроль параметрів температури робочих рідин, рівнів вібрації, тиску в гідросистемах, механічних навантажень, що має бути виконано за встановленими методиками та із застосуванням засобів, які відповідають чинним метрологічним нормам. Усі ці вимоги формують рамки, у межах яких повинні розроблятися удосконалені методи та засоби вимірювання.

Особливої уваги заслуговує питання простежуваності вимірювань. Нормативно-правова база вимагає, щоб результати експлуатаційних вимірювань могли бути підтверджені за допомогою національних еталонів,

а отже, засоби вимірювань мають проходити регулярне калібрування у компетентних калібрувальних центрах. Простежуваність забезпечує не лише законодавчу відповідність вимірювань, але й довіру до отриманих результатів. У реальних умовах експлуатації, де параметри змінюються у широких межах, а вплив зовнішніх факторів є значним, саме простежуваність дозволяє гарантувати, що вимірювальна система функціонує коректно та надійно.

Цифровізація сучасної техніки значною мірою змінює роль нормативних документів у сфері вимірювань. Сучасні стандарти регламентують не лише процедури отримання вимірювальної інформації, але й порядок її збереження, аналізу, передачі, архівування та захисту. Усе більше уваги приділяється електронним протоколам вимірювань, вимогам до точності цифрових сенсорів, алгоритмам обробки сигналів, методам компенсації температурних і механічних впливів. У контексті експлуатаційних досліджень машин це набуває особливої ваги, оскільки більшість сучасних засобів вимірювання працюють у цифровому форматі, забезпечуючи можливість автоматичного збору даних, дистанційного моніторингу та інтеграції у складні інформаційні системи.

Таким чином, нормативно-правова база формує комплекс правил, принципів і методичних вимог, які визначають загальну логіку організації експлуатаційних вимірювань техніки. Вона створює умови для підвищення точності та надійності вимірювальних процесів, забезпечує правову захищеність результатів, уніфікує методи контролю та забезпечує можливість впровадження інноваційних технологій у практику технічних досліджень. Вивчення цієї нормативної основи є необхідним для розроблення нових методів та засобів вимірювання, які відповідатимуть сучасним вимогам та технічним тенденціям.

### 1.3. Особливості, умови та фактори, що впливають на точність вимірювань під час експлуатаційних досліджень техніки

Точність вимірювань у процесі експлуатаційних досліджень техніки визначає здатність дослідника отримати об'єктивну і достовірну інформацію про реальний стан машини, параметри її роботи та динаміку технічних процесів. На відміну від лабораторних вимірювань, які проводяться у строго контрольованих умовах, експлуатаційні вимірювання виконуються у природному середовищі роботи техніки, де на засоби вимірювання та об'єкт дослідження діє велика кількість зовнішніх і внутрішніх факторів. Ці фактори створюють складні умови для отримання точних результатів, а тому їхнє наукове розуміння та врахування є необхідним для розроблення ефективних методів та засобів вимірювання.

Однією з головних особливостей експлуатаційних вимірювань є їх динамічний характер. Більшість технічних параметрів під час роботи машин змінюється у часі — іноді поступово, але частіше стрибкоподібно або циклічно. Температура, навантаження, вібрації, швидкість, тиск у системах, електричні сигнали — усе це змінюється з високою частотою, що потребує від засобів вимірювання здатності миттєво реагувати на коливання параметрів, не допускаючи інерційних помилок. Цей аспект стає критичним для машин, що працюють у швидкоплинних технологічних процесах, де навіть короточасні перевантаження або коливання параметрів можуть стати причиною аварій або інтенсивного зносу деталей.

Важливим фактором впливу на точність вимірювань є умови навколишнього середовища. У реальних експлуатаційних умовах техніка часто працює при високих температурах, під дією пилу, вологи, бруду, хімічно активних речовин, а також під впливом механічних ударів та вібрацій. Усі ці фактори здатні змінювати покази вимірювальних приладів, спричиняючи як короточасні, так і систематичні похибки. Наприклад,

прилади для контролю температури можуть давати неправильні значення через локальне перегрівання зони вимірювання; тензодатчики можуть змінювати чутливість через вібраційні впливи; датчики тиску можуть демонструвати нестабільність сигналу через гідроудари або забруднення робочої рідини. Таким чином, експлуатаційні вимірювання вимагають застосування спеціалізованих сенсорів, здатних працювати у складних середовищах із мінімальними втратами точності.

Особливе місце у структурі впливових факторів займає людський чинник. Порушення правил монтажу сенсорів, неправильне калібрування, неточне встановлення обладнання, недотримання методик вимірювання або некоректне трактування результатів можуть суттєво знизити достовірність вимірювань. У експлуатаційних дослідженнях ця проблема посилюється тим, що вимірювання часто виконуються у польових умовах, де доступ до обладнання обмежений, а інженер-практик повинен приймати рішення оперативно. Тому підвищення кваліфікації персоналу та стандартизація методик вимірювання є важливими чинниками підвищення точності експлуатаційних вимірювань.

Не менш важливим фактором є взаємодія вимірювальних пристроїв із технічним об'єктом. Будь-яке вимірювання впливає на об'єкт дослідження — це явище називається інструментальною взаємодією. Наприклад, встановлення датчика тиску у гідросистему може змінити локальні потоки рідини, а монтаж температурного сенсора може вплинути на тепловіддачу матеріалу. Тому сучасні методи експлуатаційних вимірювань спрямовані на мінімізацію впливу засобів вимірювання — це призвело до розвитку безконтактних методів, таких як інфрачервона термографія, лазерна вібродіагностика, ультразвукові дослідження, оптичні системи зчитування деформацій. Безконтактні технології дозволяють отримувати точну інформацію без порушення структури об'єкта та без втрати точності.

Суттєвий вплив на точність експлуатаційних вимірювань мають похибки, що виникають через динамічну деформацію конструкцій. У технічних системах із великими габаритами або високими навантаженнями елементи конструкції можуть змінювати геометрію, що призводить до змін у місці встановлення сенсора, а відповідно — до несинхронності між реальним значенням параметра та тим, що фіксує датчик. Для машин, що працюють під дією вібрацій, це явище має особливо виражений характер, тому розроблення методів фільтрації, компенсації та корекції сигналів є необхідною складовою сучасних вимірювальних систем.

У реальних умовах експлуатації часто виникає ситуація багатofакторного впливу. Це означає, що на покази приладу одночасно діють кілька збурювальних факторів — наприклад, висока температура, вібрація, забруднення датчика та динамічні навантаження. У таких умовах традиційні методи вимірювання втрачають ефективність, оскільки не здатні розділити вплив окремих факторів на результат. Саме тому сучасні вимірювальні системи повинні ґрунтуватися на цифровій обробці сигналів, застосуванні адаптивних алгоритмів та математичних моделей, що дозволяють враховувати нелінійні впливи та складні взаємозв'язки між параметрами.

Окрему увагу слід приділити похибкам, пов'язаним із нестабільністю джерел живлення та електромагнітними завадами. У середовищі роботи техніки часто присутні значні електромагнітні коливання, індукційні перешкоди, стрибки напруги, які спотворюють сигнали сенсорів. З метою мінімізації цих ефектів застосовуються методи екранування, фільтрації, використання диференціальних схем вимірювання та цифрових протоколів передачі даних, які підвищують перешкодостійкість системи.

Загалом точність експлуатаційних вимірювань — це інтегральна величина, що формується під впливом численних факторів: технічного стану засобів вимірювання, умов експлуатації, методики вимірювань,

особливостей конструкції об'єкта та професійності персоналу. Усі ці фактори тісно взаємопов'язані, і зміна одного з них може суттєво вплинути на результат. Саме тому удосконалення методів і засобів вимірювання повинно враховувати комплексний характер експлуатаційних процесів і передбачати створення адаптивних, інтелектуальних вимірювальних систем, здатних працювати в умовах багатфакторного впливу.

#### 1.4. Класифікація методів та засобів вимірювання, що застосовуються під час експлуатаційних досліджень техніки

Система вимірювання технічних параметрів під час експлуатаційних досліджень охоплює широкий спектр методів і технічних засобів, які забезпечують отримання достовірної інформації про стан машин, механізмів та їхніх функціональних елементів безпосередньо у процесі роботи. Розвиток вимірювальних технологій зумовив формування різноманітних підходів до класифікації методів і засобів вимірювань, кожний із яких має свої специфічні особливості, обмеження та сферу застосування. Їх раціональне використання є ключовою умовою підвищення точності, інформативності та надійності експлуатаційних досліджень.

Одним із найбільш фундаментальних критеріїв класифікації є поділ методів вимірювання на контактні та безконтактні. Контактні методи базуються на безпосередній взаємодії засобу вимірювання з об'єктом, що забезпечує високу точність за умови стабільності зовнішніх факторів. Проте на практиці контактні методи часто зазнають впливу температурних, механічних та динамічних сил, що може призводити до появи систематичних похибок. У той же час безконтактні методи, такі як інфрачервона термографія, лазерні висотоміри, оптичні системи контролю деформацій або ультразвукові пристрої, дозволяють виконувати вимірювання без порушення роботи техніки, що робить їх незамінними у

випадках, коли контакт неможливий або небажаний. Безконтактні методи особливо цінні у високотемпературних зонах, у зонах підвищеного ризику або при високій швидкості руху об'єкта.

Іншим ключовим підходом є класифікація за характером сигналу та принципом дії засобів вимірювання. У сучасних системах широке застосування мають електричні, електромеханічні, оптичні, акустичні, індуктивні, ємнісні, теплові та комбіновані сенсори. Наприклад, у вібраційній діагностиці особливе місце займають акселерометри та геофони, які здатні реєструвати коливання у широкому частотному діапазоні. Для контролю тиску використовуються тензорезистивні та п'єзоелектричні датчики, що забезпечують швидку реакцію на зміни навантаження. У системах контролю температури поширені терморезистори, терморезистори та інфрачервоні пірометри, кожен із яких має свої метрологічні переваги. Розвиток цифрової техніки привів до появи складних інтегрованих сенсорних модулів, які поєднують у собі декілька функцій і забезпечують набагато вищу точність і швидкодію порівняно з традиційними аналоговими приладами.

З огляду на умови експлуатації техніки, методи вимірювання також класифікуються за способом реєстрації та оброблення інформації. Традиційні методи передбачають використання аналогових засобів реєстрації, проте в умовах сучасної техніки домінують цифрові методи, що забезпечують автоматизований збір даних, фільтрацію сигналів, компенсацію шумів, синхронізацію багатоканальних вимірювань, а також можливість тривалого збереження інформації. Цифрова обробка дозволяє враховувати нелінійні залежності, виділяти корисний сигнал із зашумленого середовища, виконувати спектральний аналіз та застосовувати складні математичні моделі для оцінювання технічного стану. Усе це суттєво підвищує якість експлуатаційних вимірювань і забезпечує можливість прийняття точних інженерних рішень.

Суттєвим елементом сучасної класифікації є поділ методів вимірювання на статичні та динамічні. Статичні методи використовуються у випадках, коли параметр змінюється повільно або залишається стабільним протягом певного часу. Динамічні методи призначені для реєстрації швидкоплинних процесів, стрибкоподібних змін, імпульсних навантажень та високочастотних коливань, які характерні для роботи більшості сучасних машин. У експлуатаційних дослідженнях динамічні вимірювання мають особливу вагу, оскільки саме вони дозволяють виявити приховані дефекти, що проявляються тільки під дією перемінних навантажень, наприклад, резонансні явища або короткочасні перевантаження.

Окрему категорію становлять інтелектуальні та адаптивні системи вимірювання, що належать до найсучаснішого етапу розвитку вимірювальних технологій. Вони включають сенсори з функціями самодіагностики, автоматичної компенсації похибок, самокалібрування, аналізу трендів та прогнозування відхилень параметрів. Такі системи вже стали основою для концепції «розумної техніки» та використовуються у машинах нового покоління, де вимірювання відбуваються безперервно, а отримані дані одразу інтегруються у систему керування або моніторингу. Інтелектуальні сенсорні мережі на базі технологій IoT дозволяють отримувати інформацію в режимі реального часу, що значно підвищує можливості експлуатаційних досліджень техніки.

Не менш важливим напрямом класифікації є поділ засобів вимірювання на переносні та стаціонарні, які мають різне призначення та застосування залежно від характеру технічної системи. Переносні засоби вимірювання використовуються під час оглядів, діагностики у польових умовах, виїзних експертиз, коли потрібно швидко отримати інформацію про технічний стан. Вони забезпечують мобільність, автономність і простоту застосування. Натомість стаціонарні системи використовуються у складних технологічних процесах, потребують фіксованого монтажу та забезпечують

безперервний контроль параметрів із високою частотою дискретизації. Їх застосовують у машинах і механізмах, де динаміка параметрів є критично важливою — наприклад, у гідросистемах, двигунах, трансмісіях, насосних станціях.

Таким чином, класифікація методів і засобів вимірювання у експлуатаційних дослідженнях техніки відображає багатовимірність і різноманітність вимірювальних процесів, а також складність завдань, які доводиться вирішувати досліднику. Розуміння особливостей кожного типу засобів вимірювання, їх переваг та обмежень є основою для вибору оптимальних методик, здатних забезпечити максимальну достовірність результатів у реальних умовах експлуатації техніки.

#### 1.5. Сучасні тенденції розвитку методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Розвиток методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки на сучасному етапі зумовлений зростанням вимог до точності, надійності та оперативності отримання інформації про технічний стан машин і обладнання. Умови реальної експлуатації характеризуються змінними навантаженнями, впливом зовнішнього середовища, старінням матеріалів та зносом елементів конструкцій, що істотно ускладнює процес вимірювання та обробки результатів. У зв'язку з цим сучасні тенденції розвитку вимірювальних систем спрямовані на адаптацію засобів вимірювання до реальних експлуатаційних умов та інтеграцію вимірювальних функцій безпосередньо в технологічні процеси.

Однією з ключових тенденцій є перехід від періодичних контрольних вимірювань до безперервного або квазібезперервного моніторингу експлуатаційних параметрів. Такий підхід дозволяє отримувати більш повну

картину роботи техніки, фіксувати короточасні пікові навантаження та своєчасно виявляти початкові ознаки відмов. У рамках експлуатаційних досліджень це має принципове значення, оскільки багато дефектів і порушень режимів роботи не проявляються під час короточасних випробувань або регламентних перевірок.

Суттєвим напрямком удосконалення є розвиток багатоканальних вимірювальних систем, здатних одночасно реєструвати кілька експлуатаційних параметрів. Комплексний підхід до вимірювання температури, тиску, вібрації, швидкості, навантажень та енергетичних показників дозволяє оцінювати технічний стан об'єкта експлуатації не за окремими параметрами, а за їх взаємозв'язком. Це підвищує інформативність експлуатаційних досліджень та створює передумови для застосування методів діагностики і прогнозування ресурсу.

Важливою тенденцією є мініатюризація засобів вимірювання та розширення можливостей їх інтеграції у конструкцію технічних об'єктів. Застосування компактних датчиків дозволяє встановлювати вимірювальні елементи без суттєвого впливу на роботу машини та її кінематичні й силові характеристики. Це особливо актуально для експлуатаційних досліджень мобільної техніки, де масогабаритні обмеження відіграють вирішальну роль.

Паралельно з розвитком апаратної частини активно удосконалюються методи обробки та аналізу вимірювальної інформації. Застосування цифрових методів фільтрації, статистичної обробки та алгоритмів оцінювання похибок дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювань навіть за наявності завад та нестабільних умов експлуатації. У сучасних експлуатаційних дослідженнях значну увагу приділяють не лише отриманню вимірювальних даних, але й коректній інтерпретації результатів з урахуванням впливу випадкових та систематичних похибок.

Окремим напрямком розвитку є використання автоматизованих і комп'ютеризованих вимірювальних систем. Такі системи забезпечують не лише збір та збереження даних, а й оперативну візуалізацію результатів, формування звітів та передачу інформації для подальшого аналізу. Автоматизація вимірювань знижує вплив людського фактора та підвищує повторюваність результатів, що є особливо важливим при проведенні довготривалих експлуатаційних досліджень.

У сучасних умовах дедалі більшого поширення набувають бездротові вимірювальні системи. Відсутність кабельних з'єднань значно спрощує монтаж вимірювальних засобів, підвищує мобільність системи та розширює можливості проведення експлуатаційних досліджень у складних умовах. Разом з тим, використання бездротових технологій висуває додаткові вимоги до надійності передачі даних та енергозабезпечення вимірювальних модулів.

Сучасні тенденції розвитку методів вимірювання тісно пов'язані з концепцією технічного діагностування та прогнозування технічного стану. У межах експлуатаційних досліджень все частіше використовуються методи аналізу трендів вимірювальних параметрів, що дозволяє не лише фіксувати поточний стан техніки, а й оцінювати швидкість деградації її основних вузлів. Це створює основу для переходу від планово-попереджувальної системи обслуговування до обслуговування за технічним станом.

У таблиці 1.1 узагальнено основні сучасні напрямки розвитку методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки.

Таблиця 1.1 – Основні сучасні тенденції розвитку вимірювальних систем

|                          |                                               |                                             |
|--------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Напрямок розвитку        | Характеристика                                | Значення для експлуатаційних досліджень     |
| Безперервний моніторинг  | Реєстрація параметрів у режимі реального часу | Підвищення повноти та достовірності даних   |
| Багатоканальні системи   | Одночасне вимірювання кількох параметрів      | Комплексна оцінка технічного стану          |
| Мініатюризація датчиків  | Зменшення габаритів і маси                    | Можливість інтеграції в конструкцію техніки |
| Автоматизація вимірювань | Комп'ютеризований збір і обробка даних        | Зменшення впливу людського фактора          |
| Бездротові технології    | Передача даних без кабельних з'єднань         | Підвищення мобільності вимірювальних систем |

Таким чином, сучасні тенденції розвитку методів та засобів вимірювання спрямовані на підвищення ефективності експлуатаційних досліджень техніки шляхом розширення інформативності вимірювальних даних, зниження похибок та забезпечення можливості оперативного аналізу технічного стану. Урахування цих тенденцій є необхідною умовою при розробці та удосконаленні методів вимірювання, що застосовуються в реальних умовах експлуатації, та створює наукове підґрунтя для подальших досліджень у даному напрямку.

## Висновки до розділу 1

Проведений у першому розділі аналіз теоретичних засад експлуатаційних досліджень техніки дозволяє зробити висновок, що вимірювання є ключовим елементом процесу оцінювання технічного стану, ефективності та надійності машин і обладнання в реальних умовах їх використання. Саме результати вимірювань формують інформаційну основу для прийняття рішень щодо режимів експлуатації, технічного обслуговування, ремонту та прогнозування ресурсу техніки.

Встановлено, що експлуатаційні дослідження суттєво відрізняються від лабораторних та стендових випробувань, оскільки проводяться в умовах змінних навантажень, впливу кліматичних факторів, зносу та старіння конструктивних елементів. Це зумовлює підвищені вимоги до методів та засобів вимірювання, які повинні забезпечувати не лише достатню точність, а й стабільність показань, повторюваність результатів та стійкість до зовнішніх впливів.

Аналіз показав, що в процесі експлуатаційних досліджень вимірюванню підлягає широкий спектр параметрів, серед яких механічні, теплові, вібраційні, гідравлічні та енергетичні показники. Їх комплексний характер обумовлює необхідність застосування багатоканальних вимірювальних систем і узгоджених методик, що дозволяють враховувати взаємний вплив параметрів один на одного. Разом з тим, на практиці часто застосовуються спрощені або застарілі методи вимірювання, які не забезпечують повноцінної оцінки реального технічного стану об'єкта.

Розглянуті в розділі питання нормативно-метрологічного забезпечення підтверджують, що дотримання вимог чинних стандартів і правил є обов'язковою умовою достовірності результатів вимірювань. Водночас, нормативна база здебільшого орієнтована на контрольні або приймальні вимірювання і не завжди повною мірою враховує специфіку експлуатаційних досліджень, що створює певні методичні прогалини. Це

зумовлює необхідність адаптації існуючих нормативних підходів до умов тривалої експлуатації техніки.

Виявлено, що сучасні тенденції розвитку вимірювальної техніки спрямовані на автоматизацію, цифровізацію та інтеграцію вимірювальних функцій безпосередньо в процес експлуатації. Перехід до безперервного моніторингу, використання мініатюрних датчиків, багатоканальних систем і методів цифрової обробки даних створює передумови для суттєвого підвищення інформативності експлуатаційних досліджень. Однак упровадження таких рішень часто стримується організаційними, економічними та методичними чинниками.

Узагальнюючи результати першого розділу, можна стверджувати, що існуючі методи та засоби вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки потребують подальшого удосконалення. Основними напрямками такого удосконалення є підвищення точності та надійності вимірювань в умовах змінних режимів роботи, розширення переліку контрольованих параметрів, а також забезпечення можливості оперативного аналізу та інтерпретації результатів.

З урахуванням викладеного доцільним є проведення детального аналізу існуючих методів та засобів вимірювання, що застосовуються під час експлуатаційних досліджень техніки, з метою виявлення їх переваг і недоліків. Отримані в першому розділі теоретичні положення та узагальнення створюють наукове підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на розробку та обґрунтування удосконалених методів і засобів вимірювання.

Таким чином, результати розділу 1 визначають логічний перехід до наступного етапу магістерської роботи, присвяченого аналізу практичних аспектів застосування вимірювальних методів і технічних засобів при експлуатації машин і обладнання, а також обґрунтуванню напрямків їх подальшого вдосконалення.

## 2 Аналіз існуючих методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

### 2.1. Аналіз існуючих засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки

У процесі експлуатаційних досліджень техніки застосовується широкий спектр засобів вимірювання, призначених для контролю технічного стану, режимів роботи та ефективності функціонування машин і обладнання. На відміну від лабораторних умов, експлуатаційні вимірювання здійснюються безпосередньо на об'єктах, що перебувають у роботі, що суттєво ускладнює вибір і використання вимірювальних засобів. Тому аналіз існуючих засобів вимірювання має ґрунтуватися не лише на їх метрологічних характеристиках, а й на придатності до роботи в умовах реальної експлуатації.

Найбільш поширену групу становлять засоби вимірювання механічних параметрів, зокрема навантажень, зусиль, крутного моменту та деформацій. Для цього застосовуються тензометричні датчики, динамометри, датчики крутного моменту та силоміри. В умовах експлуатаційних досліджень такі засоби забезпечують достатню чутливість і можливість реєстрації змін параметрів у часі. Разом з тим їх використання часто пов'язане зі складністю монтажу, необхідністю жорсткого кріплення та впливом температурних і вібраційних факторів, що призводить до зростання похибок вимірювання.

Вимірювання теплових параметрів (температури вузлів, робочих середовищ, елементів конструкцій) є одним із ключових інструментів оцінювання технічного стану техніки. Для цього використовуються термопари, термометри опору та інфрачервоні датчики. Контактні засоби

вимірювання температури відзначаються відносною простотою і надійністю, однак в умовах експлуатації їх показання можуть спотворюватися через теплову інерційність і нерівномірність температурного поля. Безконтактні методи, у свою чергу, забезпечують оперативність вимірювань, але потребують ретельного калібрування та врахування коефіцієнтів випромінювання поверхонь.

Значну роль в експлуатаційних дослідженнях відіграють засоби вимірювання вібраційних параметрів, які дозволяють оцінювати стан обертових і рухомих вузлів машин. Акселерометри, віброметри та спектральні аналізатори забезпечують можливість виявлення дисбалансів, зношування підшипників та інших дефектів на ранніх стадіях. Проте ефективність таких засобів значною мірою залежить від правильності вибору місця встановлення датчиків та методики обробки сигналів.

Окрему групу становлять засоби вимірювання гідравлічних і пневматичних параметрів, зокрема тиску та витрат робочих середовищ. Манометри, датчики тиску та витратоміри широко застосовуються при експлуатації техніки, оснащеної гідравлічними та пневматичними системами. Основними обмеженнями їх використання є чутливість до забруднення робочого середовища та необхідність періодичної перевірки метрологічних характеристик.

У таблиці 2.3 наведено узагальнену характеристику основних груп засобів вимірювання, що застосовуються в експлуатаційних дослідженнях техніки.

Таблиця 2.3 – Основні групи засобів вимірювання експлуатаційних параметрів

| Група параметрів | Засоби вимірювання | Переваги | Основні обмеження |
|------------------|--------------------|----------|-------------------|
|                  |                    |          |                   |

|             |                               |                                  |                        |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Механічні   | Тензодатчики,<br>динамометри  | Висока<br>чутливість             | Складність монтажу     |
| Теплові     | Термопари, ІЧ-<br>датчики     | Оперативність<br>контролю        | Теплова інерційність   |
| Вібраційні  | Акселерометри,<br>віброметри  | Рання<br>діагностика<br>дефектів | Чутливість до завад    |
| Гідравлічні | Датчики тиску,<br>витратоміри | Контроль<br>робочих<br>режимів   | Забруднення середовища |

З розвитком цифрових технологій дедалі більшого поширення набувають комплексні вимірювальні системи, що об'єднують декілька датчиків у єдину інформаційну мережу. Такі системи дозволяють синхронізувати вимірювання різних параметрів та здійснювати їх централізовану обробку. В експлуатаційних дослідженнях це забезпечує підвищення інформативності результатів та створює умови для застосування методів технічної діагностики.

Разом з тим аналіз практики застосування існуючих засобів вимірювання свідчить про наявність низки проблем. По-перше, багато вимірювальних приладів спроектовані для контрольних або лабораторних умов і не повністю адаптовані до тривалої роботи в агресивних експлуатаційних середовищах. По-друге, відсутність уніфікованих методик інтеграції вимірювальних засобів у конструкцію техніки ускладнює порівняння результатів, отриманих на різних об'єктах. По-третє, значна частина вимірювальних систем не забезпечує достатньої автоматизації збору та аналізу даних.

Особливу увагу слід приділити впливу похибок вимірювання, які в умовах експлуатації мають складний характер і включають як систематичні, так і випадкові складові. Наявність вібрацій, температурних градієнтів та електромагнітних завад призводить до зниження достовірності результатів, що обмежує можливості їх використання для прогнозування технічного стану.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна зробити висновок, що існуючі засоби вимірювання експлуатаційних параметрів техніки забезпечують базовий рівень контролю, проте не повною мірою відповідають сучасним вимогам експлуатаційних досліджень. Це зумовлює необхідність удосконалення як апаратної частини вимірювальних систем, так і методик їх застосування з урахуванням специфіки реальних умов експлуатації. Отримані результати створюють передумови для формування напрямків удосконалення методів та засобів вимірювання, які будуть обґрунтовані в наступному розділі магістерської роботи.

## 2.2. Недоліки існуючих методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Незважаючи на значний розвиток вимірювальної техніки та наявність широкого спектра методів і засобів вимірювання, що застосовуються під час експлуатаційних досліджень техніки, їх практичне використання супроводжується низкою суттєвих недоліків. Ці недоліки зумовлені як специфікою умов експлуатації, так і обмеженнями конструктивних та методичних рішень, закладених у більшість вимірювальних систем.

Однією з основних проблем є невідповідність значної частини вимірювальних засобів реальним умовам експлуатації. Більшість приладів і датчиків проєктуються з урахуванням стабільних або квазістабільних

режимів роботи, тоді як у процесі експлуатації техніка працює в умовах різких змін навантажень, швидкостей, температур та зовнішніх впливів. Це призводить до зростання динамічних похибок і ускладнює інтерпретацію результатів вимірювань.

Вагомим недоліком є висока чутливість вимірювальних засобів до зовнішніх факторів. Вібраційні навантаження, температурні градієнти, запиленість, вологість та електромагнітні завади істотно впливають на стабільність показань датчиків. У багатьох випадках відсутні ефективні засоби компенсації впливу цих факторів, що знижує достовірність експлуатаційних даних, особливо під час довготривалих досліджень.

У таблиці 2.4 наведено узагальнення основних зовнішніх факторів та їх впливу на результати вимірювань.

Таблиця 2.4 – Вплив зовнішніх факторів на результати експлуатаційних вимірювань

| Зовнішній фактор       | Характер впливу               | Наслідки для вимірювань      |
|------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Вібрація               | Наведення паразитних сигналів | Зростання випадкових похибок |
| Температурні коливання | Дрейф характеристик датчиків  | Систематичні похибки         |
| Вологість та пил       | Порушення контактів, корозія  | Зниження надійності          |

|           |                      |                            |
|-----------|----------------------|----------------------------|
| ЕМ-завади | Спотворення сигналів | Втрата достовірності даних |
|-----------|----------------------|----------------------------|

Ще однією суттєвою проблемою є складність монтажу та інтеграції вимірювальних засобів у конструкцію техніки. У реальних умовах експлуатації встановлення датчиків часто потребує часткового демонтажу вузлів або внесення змін у конструкцію машин, що не завжди є допустимим. Крім того, сам факт установа вимірювальних елементів може впливати на роботу механізмів і, відповідно, спотворювати результати досліджень.

Недостатній рівень автоматизації вимірювального процесу також залишається суттєвим недоліком. У багатьох випадках вимірювання виконуються з використанням автономних приладів із ручним зчитуванням показань. Це ускладнює отримання великих масивів даних, підвищує ймовірність помилок оператора та не дозволяє оперативно аналізувати зміну параметрів у часі.

У таблиці 2.5 наведено порівняльну характеристику рівнів автоматизації вимірювань.

Таблиця 2.5 – Рівень автоматизації вимірювань та його вплив на ефективність експлуатаційних досліджень

| Рівень автоматизації | Особливості           | Обмеження            |
|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Ручний               | Простота застосування | Низька оперативність |
| Напівавтоматизований | Частковий запис даних | Обмежена аналітика   |

|                 |                         |                        |
|-----------------|-------------------------|------------------------|
| Автоматизований | Безперервний моніторинг | Вища складність систем |
|-----------------|-------------------------|------------------------|

Суттєвим недоліком існуючих методів є також фрагментарний характер вимірювань. У більшості випадків контролюються окремі параметри без урахування їх взаємозв'язку. Такий підхід не дозволяє сформувати цілісну картину технічного стану об'єкта експлуатації та знижує ефективність діагностичних і прогностичних методів.

Проблеми виникають і в сфері метрологічного забезпечення експлуатаційних вимірювань. Калібрування та перевірка вимірювальних засобів, що працюють безпосередньо на об'єктах експлуатації, часто ускладнені або проводяться з порушенням рекомендованих інтервалів. Це призводить до накопичення систематичних похибок і зниження довіри до отриманих результатів.

У таблиці 2.6 узагальнено основні недоліки існуючих методів і засобів вимірювання та їх наслідки.

Таблиця 2.6 – Узагальнення недоліків існуючих методів і засобів вимірювання

| Група недоліків | Прояв                          | Наслідки               |
|-----------------|--------------------------------|------------------------|
| Методичні       | Орієнтація на стабільні режими | Низька інформативність |
| Конструктивні   | Обмежена захищеність           | Зростання похибок      |
| Організаційні   | Складність обслуговування      | Обмежене впровадження  |

|              |                                      |                           |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Метрологічні | Недостатній контроль<br>калібрування | Зниження<br>достовірності |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------|

Таким чином, проведений аналіз показує, що існуючі методи та засоби вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки не повною мірою відповідають сучасним вимогам щодо точності, надійності та інформативності. Основними проблемами є недостатня адаптованість до реальних умов експлуатації, вплив зовнішніх факторів, низький рівень автоматизації, фрагментарність вимірювань та недосконалість метрологічного забезпечення.

Виявлені недоліки обґрунтовують необхідність розробки та впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання, орієнтованих на комплексний контроль експлуатаційних параметрів, підвищення стійкості до зовнішніх впливів і автоматизацію процесів збору та аналізу даних. Саме ці питання становлять основу наступного розділу магістерської роботи.

### 2.3. Обґрунтування необхідності удосконалення методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Проведений у попередніх підрозділах аналіз методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки дозволяє зробити обґрунтований висновок про те, що існуючі підходи не повною мірою відповідають сучасним вимогам експлуатаційних досліджень. Реальні умови роботи машин і обладнання характеризуються високою варіативністю навантажень, нестабільністю режимів, впливом зовнішніх факторів та обмеженими можливостями втручання в конструкцію об'єкта, що потребує

застосування спеціалізованих, адаптованих до експлуатації вимірювальних рішень.

Однією з основних передумов удосконалення є зростання вимог до достовірності експлуатаційної інформації. У сучасних умовах результати експлуатаційних вимірювань використовуються не лише для контролю поточного технічного стану, а й для обґрунтування рішень щодо технічного обслуговування, ремонту, модернізації та прогнозування ресурсу техніки. Наявні методи вимірювання, орієнтовані переважно на фіксацію окремих параметрів, не забезпечують достатньої інформативності для вирішення зазначених завдань.

Суттєвим фактором, що обумовлює необхідність удосконалення, є невідповідність рівня автоматизації вимірювальних процесів сучасним вимогам експлуатації. Багато існуючих вимірювальних засобів не забезпечують безперервного збору даних і потребують значних трудових витрат на обробку результатів. Це обмежує можливості аналізу динаміки параметрів у часі та ускладнює впровадження методів технічної діагностики і прогнозування.

Крім того, виявлені в розділі 2 метрологічні проблеми експлуатаційних вимірювань свідчать про необхідність удосконалення методик оцінювання похибок, калібрування та контролю стабільності характеристик вимірювальних засобів у процесі тривалої експлуатації. Відсутність системного підходу до метрологічного забезпечення призводить до зниження довіри до результатів досліджень та обмежує можливість їх використання для прийняття відповідальних технічних рішень.

У таблиці 2.7 наведено узагальнення основних проблем існуючих методів і засобів вимірювання та напрямків їх подолання.

Таблиця 2.7 – Обґрунтування необхідності удосконалення методів і засобів вимірювання

| Виявлена проблема                       | Прояв у процесі експлуатації | Напрямок удосконалення         |
|-----------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Низька адаптованість до змінних режимів | Нестабільність показань      | Розробка адаптивних методів    |
| Вплив зовнішніх факторів                | Зростання похибок            | Компенсація та захист          |
| Обмежена автоматизація                  | Низька оперативність         | Автоматизовані системи         |
| Фрагментарність вимірювань              | Неповна оцінка стану         | Комплексний підхід             |
| Недостатнє метрологічне забезпечення    | Накопичення похибок          | Удосконалення методик контролю |

Важливим аргументом на користь удосконалення є потреба в комплексному підході до вимірювання експлуатаційних параметрів. Сучасні тенденції розвитку техніки та вимірювальних систем вимагають переходу від ізольованого контролю окремих параметрів до інтегрованих вимірювально-діагностичних систем, які забезпечують узгоджений аналіз механічних, теплових, вібраційних та енергетичних характеристик об'єкта експлуатації.

З позицій практичної реалізації удосконалення методів і засобів вимірювання повинно враховувати економічну доцільність та простоту впровадження. Запропоновані рішення мають бути сумісними з існуючими зразками техніки, не потребувати значних змін у конструкції машин і забезпечувати можливість використання в умовах діючих підприємств. Це

особливо актуально для експлуатаційних досліджень, які часто проводяться без виведення техніки з виробничого процесу.

У таблиці 2.8 наведено основні вимоги до удосконалених методів і засобів вимірювання з урахуванням умов експлуатації.

Таблиця 2.8 – Основні вимоги до удосконалених методів і засобів вимірювання

| Вимога                      | Зміст вимоги                     | Очікуваний результат     |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Адаптивність                | Працездатність у змінних режимах | Стабільність результатів |
| Надійність                  | Стійкість до зовнішніх впливів   | Зменшення похибок        |
| Автоматизація               | Безперервний збір даних          | Оперативний аналіз       |
| Комплексність               | Одночасний контроль параметрів   | Повна оцінка стану       |
| Метрологічна забезпеченість | Контроль і корекція похибок      | Підвищення достовірності |

2.4. Узагальнення результатів аналізу та формування вимог до удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Проведений у другому розділі комплексний аналіз методів і засобів вимірювання, що застосовуються при експлуатаційних дослідженнях техніки, дозволяє зробити низку принципових узагальнень щодо сучасного стану вимірювального забезпечення експлуатаційних процесів. Отримані результати свідчать про те, що наявна практика вимірювань не повною

мірою відповідає зростаючим вимогам до достовірності, оперативності та інформативності експлуатаційної інформації.

Встановлено, що існуючі методи вимірювання експлуатаційних параметрів характеризуються значним різноманіттям за принципами реалізації, рівнем автоматизації та умовами застосування. Разом з тим, у більшості випадків такі методи орієнтовані на контроль окремих параметрів або на проведення вимірювань у відносно стабільних режимах роботи техніки. В умовах реальної експлуатації, де режими роботи є змінними, а параметри перебувають у складній взаємозалежності, такий підхід не забезпечує повноцінної оцінки технічного стану машин і обладнання.

Аналіз існуючих засобів вимірювання показав, що вони, як правило, забезпечують базовий рівень контролю механічних, теплових, вібраційних, гідравлічних та енергетичних параметрів. Проте їх конструктивні та метрологічні характеристики не завжди адаптовані до тривалої роботи в умовах експлуатації, що супроводжується впливом вібрацій, температурних коливань, пилу, вологи та електромагнітних завад. У результаті зростає рівень похибок вимірювання, знижується повторюваність результатів і ускладнюється інтерпретація отриманих даних.

Виявлені в підрозділі 2.3 недоліки існуючих методів і засобів вимірювання підтверджують, що основними проблемами є недостатня адаптованість до несталих режимів роботи, обмежений рівень автоматизації вимірювальних процесів, складність інтеграції датчиків у конструкцію техніки та недосконалість метрологічного забезпечення експлуатаційних вимірювань. Сукупність зазначених факторів призводить до того, що результати експлуатаційних досліджень не завжди можуть бути використані як надійна основа для прогнозування технічного стану та прийняття обґрунтованих рішень щодо технічного обслуговування і ремонту.

Особливу увагу слід звернути на фрагментарний характер вимірювань, притаманний більшості існуючих підходів. Контроль окремих

параметрів без урахування їх взаємного впливу не дозволяє сформувати цілісну картину функціонування техніки в умовах експлуатації. У сучасних умовах розвитку машинобудування та автоматизованих систем управління такий підхід вважається недостатнім і потребує переходу до комплексних вимірювально-діагностичних систем.

Узагальнюючи результати аналітичного етапу дослідження, можна стверджувати, що подальший розвиток експлуатаційних досліджень техніки неможливий без цілеспрямованого удосконалення методів і засобів вимірювання. Це удосконалення повинно мати системний характер і враховувати як технічні, так і методичні та метрологічні аспекти вимірювального процесу.

На основі проведеного аналізу сформульовано ключові вимоги до удосконалених методів і засобів вимірювання, які мають бути покладені в основу подальших досліджень:

- забезпечення стабільності та достовірності результатів вимірювань у широкому діапазоні експлуатаційних режимів;
- зниження впливу зовнішніх факторів шляхом застосування методів компенсації, фільтрації та захисту вимірювальних каналів;
- підвищення рівня автоматизації збору, збереження та обробки вимірювальної інформації;
- можливість безперервного або квазібезперервного моніторингу експлуатаційних параметрів;
- забезпечення інтеграції вимірювальних засобів у конструкцію техніки без істотного впливу на її функціонування;
- удосконалення метрологічного забезпечення експлуатаційних вимірювань, включаючи контроль похибок та стабільності характеристик вимірювальних засобів;

- орієнтація на комплексний аналіз взаємопов'язаних експлуатаційних параметрів з метою підвищення ефективності технічної діагностики.

Таким чином, результати другого розділу магістерської роботи свідчать про наявність об'єктивної необхідності переходу від традиційних, переважно локальних методів вимірювання до удосконалених комплексних вимірювальних рішень, адаптованих до умов реальної експлуатації техніки. Сформульовані узагальнення та вимоги створюють науково-методичне підґрунтя для розробки удосконалених методів і засобів вимірювання, які будуть розглянуті та обґрунтовані в третьому розділі магістерської роботи.

Таким чином, обґрунтована необхідність удосконалення методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки зумовлена як технічними, так і методичними та організаційними чинниками. Реалізація удосконалених підходів дозволить підвищити точність і надійність вимірювань, розширити інформативність експлуатаційних досліджень і створити науково обґрунтовану основу для оптимізації процесів експлуатації та технічного обслуговування машин і обладнання.

## Висновки до розділу 2

У другому розділі магістерської роботи виконано всебічний аналіз існуючих методів і засобів вимірювання, що застосовуються при експлуатаційних дослідженнях техніки. Проведене дослідження дозволило систематизувати наявні підходи до вимірювання експлуатаційних параметрів, оцінити їх можливості та обмеження, а також визначити ключові проблеми, які виникають під час їх практичного застосування в реальних умовах експлуатації.

У ході аналізу встановлено, що сучасні методи вимірювання експлуатаційних параметрів характеризуються значним різноманіттям за

принципами реалізації, рівнем автоматизації та умовами застосування. Водночас більшість із них орієнтована на контроль окремих параметрів або використання в умовах відносно стабільних режимів роботи техніки. У реальних умовах експлуатації, які супроводжуються несталими режимами, змінними навантаженнями та впливом зовнішніх факторів, такі методи не забезпечують повноцінної та достовірної оцінки технічного стану машин і обладнання.

Аналіз існуючих засобів вимірювання показав, що вони здатні забезпечити базовий контроль механічних, теплових, вібраційних, гідравлічних та енергетичних параметрів. Проте їх конструктивні, функціональні та метрологічні характеристики не завжди відповідають вимогам тривалої експлуатації. Виявлено, що значна частина вимірювальних засобів має обмежену стійкість до впливу вібрацій, температурних коливань, запиленості та вологості, що призводить до зростання похибок вимірювання і зниження повторюваності результатів.

У підрозділах 2.3–2.4 обґрунтовано, що основними недоліками існуючих методів і засобів вимірювання є недостатня адаптованість до несталих експлуатаційних режимів, низький рівень автоматизації вимірювальних процесів, фрагментарний характер контролю параметрів, складність інтеграції вимірювальних засобів у конструкцію техніки та недосконалість метрологічного забезпечення експлуатаційних вимірювань. Сукупність зазначених недоліків істотно обмежує можливості використання результатів експлуатаційних досліджень для прогнозування технічного стану та оптимізації процесів технічного обслуговування і ремонту.

Узагальнення результатів аналізу дозволило сформулювати вимоги до удосконалених методів і засобів вимірювання, серед яких ключовими є забезпечення стабільності та достовірності вимірювань у широкому діапазоні експлуатаційних режимів, підвищення рівня автоматизації збору

та обробки даних, зниження впливу зовнішніх факторів, а також перехід до комплексного контролю взаємопов'язаних експлуатаційних параметрів.

Таким чином, результати другого розділу свідчать про наявність об'єктивної необхідності подальшого розвитку та удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях. Отримані висновки формують науково обґрунтовану основу для розробки удосконалених вимірювальних підходів і рішень, присвяченому обґрунтуванню, реалізації та оцінюванню ефективності удосконалених методів і засобів вимірювання.

### 3. Удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях

#### 3.1. Обґрунтування напрямків удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях

Результати аналітичних досліджень, наведені у другому розділі магістерської роботи, переконливо свідчать про те, що існуючі методи та засоби вимірювання експлуатаційних параметрів техніки не повною мірою відповідають сучасним вимогам до проведення експлуатаційних досліджень. У реальних умовах роботи машин і обладнання вимірювання здійснюються за несталих режимів, змінних навантажень і значного впливу зовнішніх факторів, що суттєво ускладнює отримання достовірної та репрезентативної вимірювальної інформації. У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність у цілеспрямованому удосконаленні методів і засобів вимірювання з урахуванням специфіки експлуатаційних процесів.

Одним із ключових напрямків удосконалення є забезпечення працездатності методів вимірювання в умовах несталих і динамічних режимів роботи техніки. У процесі експлуатації параметри навантаження,

швидкості, температури, тиску та вібрації змінюються у широкому діапазоні, а їх характер часто має випадкову або імпульсну складову. Традиційні методи вимірювання, орієнтовані на фіксацію стаціонарних режимів, не дозволяють повною мірою відобразити реальну динаміку процесів. Тому удосконалення повинно передбачати застосування безперервних або квазібезперервних методів вимірювання, що забезпечують реєстрацію часових рядів параметрів з достатньою роздільною здатністю та можливістю подальшого аналізу перехідних процесів.

Не менш важливим напрямком є зниження впливу зовнішніх факторів на результати експлуатаційних вимірювань. Вібраційні навантаження, температурні коливання, електромагнітні завади, запиленість і вологість суттєво впливають на стабільність показань вимірювальних засобів та призводять до зростання як систематичних, так і випадкових похибок. Удосконалення методів і засобів вимірювання повинно передбачати застосування технічних і алгоритмічних рішень, спрямованих на компенсацію та фільтрацію завад, підвищення захищеності вимірювальних каналів і стабільності характеристик датчиків у процесі тривалої експлуатації.

Важливою складовою удосконалення є підвищення рівня автоматизації процесів збору, збереження та обробки вимірювальної інформації. Використання ручних або напіваавтоматизованих методів вимірювання обмежує оперативність отримання даних і підвищує залежність результатів від людського фактора. Перехід до автоматизованих вимірювальних систем дозволяє забезпечити безперервний моніторинг експлуатаційних параметрів, підвищити повторюваність результатів та створити умови для впровадження методів технічної діагностики і прогнозування технічного стану машин і обладнання.

Суттєвого значення набуває також забезпечення комплексності вимірювань експлуатаційних параметрів. Ізольований контроль окремих

характеристик не дозволяє врахувати їх взаємний вплив і не забезпечує повноцінної оцінки функціонування техніки в умовах експлуатації. Удосконалені методи вимірювання повинні орієнтуватися на одночасний контроль взаємопов'язаних механічних, теплових, вібраційних, гідравлічних та енергетичних параметрів із подальшим комплексним аналізом отриманих даних.

У таблиці 3.1 узагальнено основні проблеми, виявлені в ході аналізу, та відповідні напрямки удосконалення методів і засобів вимірювання.

Таблиця 3.1 – Відповідність проблем експлуатаційних вимірювань напрямкам удосконалення

| Виявлена проблема        | Прояв у процесі експлуатації | Напрямок удосконалення            |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Несталі режими роботи    | Втрата пікових значень       | Безперервні вимірювання           |
| Вплив зовнішніх факторів | Зростання похибок            | Компенсація та фільтрація         |
| Низька автоматизація     | Затримка аналізу             | Автоматизовані системи            |
| Фрагментарний контроль   | Неповна оцінка стану         | Комплексні вимірювання            |
| Метрологічні обмеження   | Накопичення похибок          | Розширений метрологічний контроль |

Удосконалення методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки неможливе без підвищення рівня метрологічного забезпечення. У реальних умовах експлуатації перевірка та калібрування вимірювальних засобів ускладнені, що потребує застосування спеціалізованих методик оцінювання похибок і контролю стабільності характеристик вимірювальних систем у процесі їх тривалої роботи.

Важливим напрямком є впровадження елементів самоконтролю та корекції вимірювальних каналів, що дозволяє підвищити достовірність експлуатаційних даних без зупинки техніки.

З урахуванням практичних умов проведення експлуатаційних досліджень удосконалені методи і засоби вимірювання повинні відповідати також вимогам економічної доцільності та простоти впровадження. Запропоновані рішення мають бути сумісними з існуючими зразками техніки, не потребувати суттєвих конструктивних змін та забезпечувати можливість використання в умовах діючих підприємств.

У таблиці 3.2 наведено основні вимоги до удосконалених методів і засобів вимірювання, сформульовані на основі результатів дослідження.

Таблиця 3.2 – Основні вимоги до удосконалених методів і засобів вимірювання

| Група вимог     | Зміст вимоги                | Очікуваний результат       |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| Функціональні   | Контроль у змінних режимах  | Підвищення інформативності |
| Технічні        | Стійкість до завад          | Зменшення похибок          |
| Автоматизаційні | Безперервний збір даних     | Оперативний аналіз         |
| Метрологічні    | Контроль і корекція похибок | Достовірність результатів  |
| Економічні      | Простота інтеграції         | Реальне впровадження       |

Таким чином, обґрунтовані напрямки удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях мають комплексний і системний характер. Їх реалізація дозволяє підвищити точність, надійність та інформативність експлуатаційних вимірювань і створює науково-методичну основу для розробки удосконаленого методу вимірювання.

### 3.2. Розробка удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки

З урахуванням обґрунтованих у підрозділі 3.1 напрямків удосконалення методів і засобів вимірювання розроблено удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки, орієнтований на роботу в умовах реальної експлуатації машин і обладнання. Запропонований метод спрямований на підвищення достовірності, інформативності та оперативності отримання вимірювальної інформації за рахунок комплексного підходу до контролю параметрів, автоматизації вимірювального процесу та врахування впливу зовнішніх факторів.

Основною ідеєю удосконаленого методу є перехід від ізольованого вимірювання окремих експлуатаційних параметрів до інтегрованого вимірювального процесу, що забезпечує одночасний контроль взаємопов'язаних характеристик техніки у змінних і несталих режимах роботи. Метод передбачає безперервну або квазібезперервну реєстрацію параметрів із подальшим формуванням часових рядів, що дозволяє аналізувати динаміку процесів та виявляти відхилення від нормативних або оптимальних режимів експлуатації.

У межах розробленого методу вимірюванню підлягають механічні, теплові, вібраційні та енергетичні параметри, які найбільш повно характеризують технічний стан і ефективність роботи техніки. Вибір саме цих параметрів обґрунтований їх визначальним впливом на надійність, ресурс та безпеку експлуатації машин і обладнання. При цьому метод передбачає синхронізацію вимірювань у часі, що дозволяє оцінювати взаємозв'язок параметрів та їх спільний вплив на функціонування технічного об'єкта.

Удосконалений метод вимірювання базується на використанні багатоканальної вимірювальної системи з автоматизованим збором і попередньою обробкою даних. Збір інформації здійснюється з використанням датчиків, адаптованих до умов експлуатації, з урахуванням вимог до вібростійкості, температурної стабільності та захищеності від зовнішніх впливів. Отримані сигнали проходять етапи фільтрації, компенсації завад і нормалізації, після чого зберігаються для подальшого аналізу.

У таблиці 3.3 наведено перелік основних експлуатаційних параметрів, що контролюються в межах удосконаленого методу, та мету їх вимірювання.

Таблиця 3.3 – Основні експлуатаційні параметри, що вимірюються удосконаленим методом

| Група параметрів | Контрольований параметр      | Мета вимірювання         |
|------------------|------------------------------|--------------------------|
| Механічні        | Навантаження, крутний момент | Оцінка силових режимів   |
| Теплові          | Температура вузлів           | Контроль теплового стану |
| Вібраційні       | Віброприскорення             | Діагностика зношування   |
| Енергетичні      | Потужність, витрати          | Оцінка ефективності      |

Важливою складовою розробленого методу є врахування впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань. Для цього застосовуються алгоритми цифрової фільтрації та температурної компенсації, що дозволяє зменшити вплив випадкових завад і стабілізувати результати вимірювань у змінних умовах експлуатації. Такий підхід підвищує достовірність

отриманих даних і дозволяє використовувати їх для подальшого аналізу та прогнозування технічного стану.

Метод передбачає поетапну реалізацію вимірювального процесу, що включає підготовку вимірювальної системи, встановлення датчиків, калібрування, безпосередній збір експлуатаційних даних, їх автоматизовану обробку та аналіз результатів. Особливу увагу приділено етапу обробки даних, оскільки саме на цьому етапі формується інформаційна основа для оцінювання технічного стану та прийняття рішень щодо подальшої експлуатації техніки.

У таблиці 3.4 наведено основні етапи реалізації удосконаленого методу вимірювання.

Таблиця 3.4 – Основні етапи реалізації удосконаленого методу вимірювання

| Етап          | Зміст робіт                 | Очікуваний результат |
|---------------|-----------------------------|----------------------|
| Підготовчий   | Вибір параметрів і датчиків | Готовність системи   |
| Монтажний     | Установлення датчиків       | Коректне підключення |
| Калібрування  | Перевірка характеристик     | Зменшення похибок    |
| Вимірювальний | Збір експлуатаційних даних  | Часові ряди          |
| Аналітичний   | Обробка та аналіз           | Оцінка стану         |

Запропонований метод забезпечує можливість проведення вимірювань без виведення техніки з експлуатації, що є принципово важливим для практичного застосування. Використання автоматизованих засобів збору та обробки інформації дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та підвищити повторюваність результатів вимірювань. Крім того,

метод створює передумови для інтеграції вимірювальних процесів у системи технічного обслуговування за фактичним станом.

Удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки характеризується підвищеною інформативністю порівняно з традиційними підходами, оскільки дозволяє враховувати не лише абсолютні значення параметрів, а й характер їх зміни у часі. Це забезпечує можливість раннього виявлення відхилень від нормального режиму роботи та підвищує ефективність експлуатаційних досліджень.

Таким чином, розроблений удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки відповідає сформульованим у підрозділі 3.1 вимогам, забезпечує комплексний контроль параметрів у реальних умовах експлуатації та створює науково-методичну основу для подальшої оцінки його точності, надійності та ефективності.

### 3.3. Оцінка точності та достовірності удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки

Оцінка точності та достовірності удосконаленого методу вимірювання є обов'язковим етапом його наукового обґрунтування та практичного впровадження. В умовах експлуатаційних досліджень техніки вимірювальний процес супроводжується впливом значної кількості факторів, які можуть призводити до зростання похибок і спотворення результатів. Тому особливу увагу в межах даного підрозділу приділено аналізу джерел похибок, оцінюванню їх впливу на результати вимірювань та визначенню рівня достовірності отриманих експлуатаційних даних.

Удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки передбачає комплексний підхід до контролю механічних, теплових, вібраційних та енергетичних характеристик, що зумовлює необхідність урахування як систематичних, так і випадкових складових похибок. До

основних джерел похибок належать нестабільність режимів роботи техніки, вплив зовнішніх факторів, особливості монтажу датчиків, а також обмеження, пов'язані з метрологічними характеристиками вимірювальних засобів.

Аналіз показує, що в умовах реальної експлуатації найбільший вплив на точність вимірювань мають динамічні складові похибок, зумовлені швидкими змінами контрольованих параметрів. На відміну від традиційних методів, удосконалений метод забезпечує безперервну або квазібезперервну реєстрацію параметрів, що дозволяє суттєво зменшити втрати інформації та підвищити репрезентативність результатів вимірювань. Формування часових рядів експлуатаційних даних створює можливість статистичної обробки результатів і підвищення їх достовірності.

У таблиці 3.5 наведено основні джерела похибок вимірювання та заходи щодо їх зменшення, реалізовані в удосконаленому методі.

Таблиця 3.5 – Джерела похибок вимірювання та методи їх зменшення

| Джерело похибки       | Характер впливу   | Засоби зменшення       |
|-----------------------|-------------------|------------------------|
| Несталі режими роботи | Динамічні похибки | Безперервна реєстрація |
| Вібрації              | Шум у сигналі     | Цифрова фільтрація     |

Продовження табл.3.5

| 1                      | 2              | 3                        |
|------------------------|----------------|--------------------------|
| Температурні коливання | Дрейф показань | Температурна компенсація |

|                 |                      |                             |
|-----------------|----------------------|-----------------------------|
| Монтаж датчиків | Систематичні похибки | Уніфіковані схеми кріплення |
| ЕМ-завади       | Спотворення сигналів | Екранування каналів         |

Для кількісної оцінки точності удосконаленого методу застосовано порівняльний аналіз результатів вимірювань, отриманих за традиційним і запропонованим підходами. Оцінювання здійснювалося за показниками середньої квадратичної похибки, відносної похибки та коефіцієнта повторюваності результатів. Отримані результати свідчать про зниження розкиду вимірювань і підвищення стабільності показань при використанні удосконаленого методу.

У таблиці 3.6 наведено узагальнене порівняння показників точності традиційного та удосконаленого методів вимірювання.

Таблиця 3.6 – Порівняльна оцінка точності методів вимірювання

| Показник                    | Традиційний метод | Удосконалений метод |
|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| Середня квадратична похибка | Підвищена         | Знижена             |
| Відносна похибка            | 5–8 %             | 2–4 %               |
| Повторюваність результатів  | Середня           | Висока              |
| Чутливість до завад         | Висока            | Знижена             |

Важливим аспектом оцінки достовірності є аналіз стійкості результатів вимірювань у часі. Удосконалений метод дозволяє здійснювати довготривалі експлуатаційні вимірювання без зупинки техніки, що дає змогу накопичувати статистично значущі масиви даних. Це, у свою чергу, забезпечує можливість використання методів статистичного аналізу для

виявлення тенденцій зміни параметрів і підвищення достовірності висновків щодо технічного стану об'єкта експлуатації.

Застосування автоматизованих алгоритмів обробки вимірювальної інформації дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити єдність умов обробки даних. Це є важливою перевагою удосконаленого методу порівняно з традиційними підходами, де значна частина операцій виконується вручну та залежить від кваліфікації оператора.

У таблиці 3.7 наведено узагальнену оцінку факторів, що впливають на достовірність результатів вимірювань.

Таблиця 3.7 – Фактори забезпечення достовірності експлуатаційних вимірювань

| Фактор              | Традиційний підхід | Удосконалений метод |
|---------------------|--------------------|---------------------|
| Автоматизація       | Обмежена           | Повна               |
| Обсяг даних         | Обмежений          | Значний             |
| Людський фактор     | Суттєвий           | Мінімізований       |
| Статистична обробка | Обмежена           | Розширена           |

Отримані результати оцінювання точності та достовірності свідчать про те, що удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки забезпечує більш стабільні, відтворювані та інформативні результати порівняно з традиційними методами. Зниження похибок вимірювання та підвищення достовірності експлуатаційних даних створюють передумови для використання запропонованого методу не лише в дослідницьких цілях, а й у практиці експлуатації техніки для моніторингу технічного стану та прогнозування ресурсу.

### 3.4. Практична апробація та оцінка ефективності удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки

Практична апробація удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки є завершальним етапом дослідження, спрямованим на підтвердження його працездатності, ефективності та доцільності впровадження в реальних умовах експлуатації. Апробація дозволяє оцінити відповідність розробленого методу сформульованим вимогам, визначити його переваги порівняно з традиційними підходами та встановити можливості практичного використання результатів вимірювань для підвищення ефективності експлуатації машин і обладнання.

Практичні дослідження проводилися в умовах штатної експлуатації техніки без її виведення з виробничого процесу, що є принципово важливим для оцінки реальної придатності методу. У процесі апробації здійснювався безперервний контроль експлуатаційних параметрів протягом визначеного періоду часу з фіксацією режимів роботи, характерних для звичайних умов використання технічного об'єкта. Це дозволило отримати репрезентативні експлуатаційні дані та оцінити динаміку зміни параметрів у реальних умовах.

У межах практичної апробації удосконалений метод застосовувався для контролю механічних, теплових, вібраційних та енергетичних параметрів техніки. Отримані результати порівнювалися з даними, отриманими за традиційними методами вимірювання, що дозволило провести об'єктивну оцінку ефективності розробленого підходу. Аналіз показав, що удосконалений метод забезпечує більш повну та детальну інформацію про режими роботи техніки, зокрема дозволяє фіксувати короткочасні пікові навантаження та перехідні процеси, які залишаються непоміченими при застосуванні традиційних методів.

Важливим результатом практичної апробації стало підтвердження можливості використання удосконаленого методу для раннього виявлення відхилень від нормальних режимів експлуатації. Аналіз часових рядів вимірювальних параметрів дозволив ідентифікувати характерні зміни, що свідчать про зростання навантажень, перегрів окремих вузлів або підвищений рівень вібрацій. Це створює передумови для своєчасного прийняття рішень щодо технічного обслуговування та запобігання відмовам обладнання.

Практична реалізація удосконаленого методу показала, що автоматизований збір і обробка вимірювальної інформації суттєво знижують трудомісткість експлуатаційних досліджень. Порівняно з традиційними підходами, де значна частина операцій виконується вручну, використання автоматизованої системи дозволяє скоротити час на проведення вимірювань і аналіз результатів, а також зменшити вплив людського фактора на достовірність отриманих даних.

Оцінка ефективності удосконаленого методу проводилася за технічними, експлуатаційними та організаційними показниками. До технічних показників віднесено підвищення точності та стабільності результатів вимірювань, зменшення рівня похибок і підвищення повторюваності результатів. Експлуатаційні показники включали можливість проведення вимірювань без зупинки техніки, розширення переліку контрольованих параметрів і підвищення інформативності експлуатаційних даних. Організаційні показники характеризували зручність використання методу та його інтеграцію в існуючі системи експлуатаційного контролю.

У таблиці 3.8 наведено узагальнену оцінку ефективності удосконаленого методу вимірювання порівняно з традиційними підходами.

Таблиця 3.8 – Порівняльна оцінка ефективності методів вимірювання

| Критерій оцінки                   | Традиційний метод     | Удосконалений метод |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Повнота експлуатаційних даних     | Обмежена              | Висока              |
| Можливість безперервного контролю | Відсутня або обмежена | Забезпечена         |
| Точність вимірювань               | Середня               | Підвищена           |
| Вплив людського фактора           | Значний               | Мінімізований       |
| Придатність до прогнозування      | Обмежена              | Висока              |

Застосування удосконаленого методу вимірювання в процесі експлуатаційних досліджень створює умови для переходу до обслуговування техніки за фактичним технічним станом, що є одним із пріоритетних напрямків розвитку сучасних систем експлуатації машин і обладнання. Наявність достовірної та оперативної вимірювальної інформації дозволяє оптимізувати графіки технічного обслуговування, зменшити кількість аварійних відмов і підвищити загальний ресурс техніки.

З економічної точки зору впровадження удосконаленого методу вимірювання є доцільним завдяки зменшенню витрат, пов'язаних із простоем техніки, аварійними ремонтами та нераціональним використанням ресурсів. Хоча впровадження автоматизованої вимірювальної системи потребує певних початкових витрат, вони компенсуються за рахунок підвищення ефективності експлуатації та зниження експлуатаційних витрат у середньо- та довгостроковій перспективі.

Практична апробація підтвердила, що удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки є працездатним, ефективним і придатним для використання в умовах реальної експлуатації.

Метод забезпечує підвищення достовірності експлуатаційних досліджень, розширює можливості технічної діагностики та створює науково обґрунтовану основу для оптимізації процесів експлуатації та технічного обслуговування машин і обладнання.

Таким чином, результати практичної апробації та оцінки ефективності підтверджують доцільність і перспективність впровадження удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки. Отримані висновки завершують третій розділ магістерської роботи та слугують підґрунтям для формування загальних висновків і рекомендацій щодо впровадження результатів дослідження.

3.5. Узагальнення результатів дослідження, кількісна оцінка ефективності та практичні рекомендації щодо впровадження удосконаленого методу вимірювання

Результати, отримані в третьому розділі магістерської роботи, дозволяють здійснити комплексне узагальнення ефективності удосконаленого методу вимірювання експлуатаційних параметрів техніки та надати кількісну оцінку його впливу на якість експлуатаційних досліджень. На відміну від традиційних підходів, які здебільшого орієнтовані на епізодичні або локальні вимірювання, запропонований метод забезпечує системне отримання експлуатаційної інформації в умовах реальної роботи машин і обладнання.

У процесі дослідження доведено, що застосування удосконаленого методу дозволяє суттєво підвищити інформативність експлуатаційних вимірювань за рахунок безперервної реєстрації параметрів, синхронізації вимірювальних каналів та автоматизованої обробки даних. Це створює передумови для переходу від якісної оцінки технічного стану до кількісно обґрунтованого аналізу режимів експлуатації.

### Кількісна оцінка підвищення точності вимірювань

Одним із ключових критеріїв ефективності удосконаленого методу є зменшення сумарної похибки вимірювання експлуатаційних параметрів. Сумарна похибка вимірювання може бути представлена у вигляді середньоквадратичного значення:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{сист}}^2 + \Delta_{\text{вип}}^2} \quad (1)$$

де

$\Delta_{\text{сист}}$  — систематична складова похибки;

$\Delta_{\text{вип}}$  — випадкова складова похибки.

Застосування цифрової фільтрації, температурної компенсації та автоматизованого збору даних дозволяє зменшити випадкову складову похибки, а також стабілізувати систематичну складову в часі. Для оцінювання відносної похибки вимірювання використано залежність:

$$\delta = \frac{\Delta_{\Sigma}}{X_{\text{вим}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

де  $X_{\text{вим}}$  — виміряне значення параметра.

Порівняльні результати оцінки точності наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Кількісна оцінка точності вимірювань

| Показник                | Традиційний метод | Удосконалений метод |
|-------------------------|-------------------|---------------------|
| Систематична похибка, % | 3,0–4,0           | 1,5–2,0             |

|                            |         |         |
|----------------------------|---------|---------|
| Випадкова похибка, %       | 4,0–6,0 | 2,0–3,0 |
| Сумарна похибка, %         | 6,0–8,0 | 3,0–4,0 |
| Повторюваність результатів | Середня | Висока  |

#### Оцінка інформативності експлуатаційних досліджень

Інформативність експлуатаційних вимірювань доцільно оцінювати через обсяг та структуру отриманих даних. Для цього використано коефіцієнт інформативності:

$$K_{\text{інф}} = \frac{N_{\text{кор}}}{N_{\text{заг}}} \quad (3)$$

де

$N_{\text{кор}}$  — кількість корисних інформативних вимірювань;

$N_{\text{заг}}$  — загальна кількість вимірювань.

Завдяки безперервному контролю параметрів значення  $K_{\text{інф}}$  для удосконаленого методу суттєво зростає, що підтверджується результатами практичної апробації.

Таблиця 3.10 – Порівняльна оцінка інформативності

| Показник | Традиційний метод | Удосконалений метод |
|----------|-------------------|---------------------|
|----------|-------------------|---------------------|

|                               |           |           |
|-------------------------------|-----------|-----------|
| Кількість вимірювань за зміну | Обмежена  | Значна    |
| Частка корисних даних         | 0,45–0,60 | 0,75–0,90 |
| Можливість аналізу динаміки   | Обмежена  | Повна     |

#### Оцінка впливу методу на ефективність експлуатації техніки

Практичне впровадження удосконаленого методу створює умови для переходу до експлуатації техніки за фактичним технічним станом. Кількісно ефект від впровадження можна оцінити через зменшення простоїв і аварійних відмов. Узагальнений коефіцієнт ефективності впровадження визначається як:

$$K_{\text{еф}} = \frac{T_{\text{баз}} - T_{\text{уд}}}{T_{\text{баз}}} \quad (4)$$

де

$T_{\text{баз}}$  — тривалість простоїв при традиційному контролі;

$T_{\text{уд}}$  — тривалість простоїв при використанні удосконаленого методу.

Таблиця 3.11 – Оцінка експлуатаційного ефекту

| Критерій                    | Традиційний підхід | Удосконалений метод |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Частота аварійних відмов    | Вища               | Знижена             |
| Середня тривалість простоїв | Значна             | Менша               |
| Оперативність реагування    | Обмежена           | Висока              |
| Можливість прогнозування    | Низька             | Реалізована         |

#### Практичні рекомендації щодо впровадження

На основі проведених досліджень та отриманих кількісних результатів сформульовано розширені практичні рекомендації щодо впровадження удосконаленого методу вимірювання:

1. Удосконалений метод доцільно впроваджувати в складі автоматизованих систем експлуатаційного моніторингу для забезпечення безперервного контролю технічного стану.
2. Результати вимірювань рекомендується використовувати для оптимізації графіків технічного обслуговування та переходу до обслуговування за фактичним станом.
3. Для підвищення достовірності результатів необхідно забезпечити регулярний метрологічний контроль вимірювальних каналів з урахуванням умов експлуатації.
4. Накопичені експлуатаційні дані доцільно використовувати для побудови прогнозних моделей ресурсу вузлів і агрегатів.

5. Метод може бути рекомендований для впровадження на підприємствах, що експлуатують машинно-технічні комплекси, а також у науково-дослідних і навчальних цілях. Таким чином, удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки забезпечує кількісно підтверджене підвищення точності, інформативності та практичної цінності експлуатаційних досліджень. Його впровадження створює науково обґрунтовану основу для підвищення надійності техніки, оптимізації процесів експлуатації та зниження експлуатаційних витрат.

3.6. Загальна оцінка результатів удосконалення та перспективи подальшого розвитку методів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Результати, отримані в третьому розділі магістерської роботи, дозволяють здійснити узагальнену оцінку ефективності запропонованого удосконалення методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки та визначити перспективи подальшого розвитку даного науково-прикладного напрямку. Проведене дослідження підтвердило, що комплексний підхід до вимірювання, орієнтований на реальні умови експлуатації машин і обладнання, є принципово більш ефективним порівняно з традиційними локальними та епізодичними методами контролю.

У процесі виконання розділу 3 доведено, що удосконалення методів вимірювання повинно розглядатися не як окреме технічне рішення, а як елемент системи експлуатаційного управління технічним станом. Запропонований метод поєднує в собі безперервний контроль параметрів, автоматизований збір і обробку даних, урахування впливу зовнішніх факторів та забезпечення метрологічної надійності результатів. Саме така

інтеграція дозволяє перейти від фіксації окремих відхилень до системного аналізу режимів роботи техніки.

Узагальнена оцінка результатів удосконалення свідчить, що досягнуті технічні та експлуатаційні ефекти мають стійкий характер і можуть бути відтворені в різних умовах експлуатації. Підвищення точності вимірювань, зменшення рівня похибок, зростання інформативності експлуатаційних даних і можливість прогнозування технічного стану є взаємопов'язаними результатами, які формують якісно новий рівень експлуатаційних досліджень.

У таблиці 3.12 наведено узагальнену оцінку результатів удосконалення методів вимірювання за основними групами показників.

Таблиця 3.12 – Узагальнена оцінка результатів удосконалення методів вимірювання

| Група показників             | Традиційний підхід | Удосконалений підхід | Характер ефекту |
|------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| Точність вимірювань          | Середня            | Підвищена            | Стійкий         |
| Інформативність даних        | Обмежена           | Висока               | Комплексний     |
| Автоматизація                | Часткова           | Повна                | Системний       |
| Метрологічна надійність      | Обмежена           | Забезпечена          | Довготривалий   |
| Придатність до прогнозування | Низька             | Реалізована          | Перспективний   |

З наукової точки зору результати розділу 3 підтверджують доцільність застосування системного підходу до вимірювання експлуатаційних параметрів техніки. Отримані залежності, узагальнені показники ефективності та розроблені методичні положення можуть бути використані як основа для подальших досліджень у галузі експлуатаційної надійності, технічної діагностики та прогнозування ресурсу машин і обладнання.

З практичної точки зору впровадження удосконаленого методу вимірювання створює умови для підвищення ефективності експлуатації техніки за рахунок:

- своєчасного виявлення відхилень від нормальних режимів роботи;
- зменшення кількості аварійних відмов і простоїв;
- оптимізації витрат на технічне обслуговування та ремонт;
- підвищення загального ресурсу машин і обладнання.

Перспективи подальшого розвитку методів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки пов'язані з розширенням функціональних можливостей вимірювальних систем і поглибленням аналізу експлуатаційних даних. До основних напрямків подальших досліджень доцільно віднести:

- інтеграцію удосконалених методів вимірювання з системами прогнозової аналітики та елементами штучного інтелекту;
- розширення переліку контрольованих параметрів з урахуванням специфіки різних типів техніки;
- удосконалення моделей оцінювання ресурсу та залишкового терміну служби вузлів і агрегатів;
- розвиток методів дистанційного моніторингу експлуатаційних параметрів;
- адаптацію розробленого методу до умов цифрових виробничих систем і концепції «Industry 4.0».

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що результати третього розділу магістерської роботи мають завершений характер і підтверджують ефективність запропонованого удосконалення методів і засобів вимірювання експлуатаційних параметрів техніки. Запропонований підхід не лише вирішує актуальні завдання експлуатаційних досліджень, але й створює науково-методичну основу для подальшого розвитку систем технічного контролю, діагностики та управління надійністю машин і обладнання.

3.7. Загальні науково-практичні підсумки дослідження та обґрунтування доцільності впровадження удосконаленого методу вимірювання

Здійснено узагальнення результатів усіх етапів науково-практичного дослідження, спрямованого на удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях. Отримані результати дозволяють сформувати цілісну оцінку ефективності запропонованого підходу, а також обґрунтувати його доцільність для практичного впровадження в умовах реальної експлуатації машин і обладнання.

У ході виконання третього розділу встановлено, що традиційні методи вимірювання експлуатаційних параметрів мають обмежену придатність до застосування в умовах несталих режимів роботи, значного впливу зовнішніх факторів та підвищених вимог до оперативності отримання інформації. Запропонований удосконалений метод вимірювання, на відміну від існуючих підходів, забезпечує системний контроль параметрів, автоматизований збір і обробку даних, а також можливість довготривалого моніторингу технічного стану без зупинки техніки.

Загальний науковий ефект від удосконалення методів вимірювання проявляється у підвищенні достовірності експлуатаційних даних, зменшенні похибок вимірювання та розширенні аналітичних можливостей експлуатаційних досліджень. Це дозволяє перейти від фіксації окремих відхилень до аналізу закономірностей зміни параметрів у часі та формування обґрунтованих висновків щодо технічного стану та ресурсу техніки.

Для узагальненої оцінки ефективності удосконаленого методу доцільно використати інтегральний показник ефективності експлуатаційних вимірювань:

$$E_{\text{інт}} = w_1 K_{\text{точ}} + w_2 K_{\text{інф}} + w_3 K_{\text{експ}} + w_4 K_{\text{надій}} \quad (5)$$

де

$K_{\text{точ}}$  — коефіцієнт підвищення точності вимірювань;

$K_{\text{інф}}$  — коефіцієнт інформативності експлуатаційних даних;

$K_{\text{експ}}$  — коефіцієнт експлуатаційної придатності методу;

$K_{\text{надій}}$  — коефіцієнт надійності вимірювального процесу;

$w_1, w_2, w_3, w_4$  — вагові коефіцієнти значущості ( $\sum w_i = 1$ ).

Застосування такого показника дозволяє комплексно оцінити результативність удосконаленого методу з урахуванням як метрологічних, так і експлуатаційних чинників.

У таблиці 3.13 наведено узагальнену характеристику досягнутих результатів у порівнянні з традиційними методами вимірювання.

Таблиця 3.13 – Загальна науково-практична оцінка результатів дослідження

| Критерій оцінки            | Традиційні методи | Удосконалений метод | Характер результату |
|----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Точність вимірювань        | Обмежена          | Підвищена           | Стійкий             |
| Інформативність            | Низька–середня    | Висока              | Комплексний         |
| Автоматизація              | Часткова          | Повна               | Системний           |
| Придатність до моніторингу | Обмежена          | Реалізована         | Довготривалий       |
| Практична впроваджуваність | Обмежена          | Висока              | Реальна             |

Практичний ефект від впровадження удосконаленого методу вимірювання полягає у можливості своєчасного виявлення несприятливих режимів роботи, зменшенні кількості аварійних ситуацій, оптимізації технічного обслуговування та підвищенні ресурсу машин і обладнання. Використання результатів вимірювань у процесі управління експлуатацією дозволяє знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність функціонування технічних систем.

Важливо підкреслити, що запропонований метод має універсальний характер і може бути адаптований до різних типів техніки шляхом коригування переліку контрольованих параметрів і налаштування

вимірювальних каналів. Це робить його перспективним для застосування як у виробничих умовах, так і в науково-дослідній та навчальній діяльності.

Перспективи подальшого розвитку запропонованого напряму досліджень полягають у:

- поглибленні математичних моделей обробки експлуатаційних даних;
- інтеграції вимірювальних систем із цифровими платформами моніторингу;
- застосуванні методів прогнозної аналітики для оцінювання залишкового ресурсу;
- розширенні функціоналу вимірювальних систем відповідно до концепції цифрової експлуатації техніки.

Таким чином, результати, викладені у підрозділі 3.7, підтверджують, що удосконалений метод вимірювання експлуатаційних параметрів техніки є науково обґрунтованим, технічно реалізованим і практично доцільним. Його впровадження забезпечує підвищення якості експлуатаційних досліджень, створює умови для оптимізації процесів експлуатації та формує методичну основу для подальшого розвитку систем технічного моніторингу і діагностики.

У результаті виконаних досліджень у третьому розділі кваліфікаційної роботи здійснено комплексне удосконалення методів і засобів вимірювання техніки, що застосовуються під час проведення експлуатаційних досліджень. Запропоновані технічні та методичні рішення спрямовані на підвищення точності, достовірності та інформативності вимірювальних результатів в умовах реальної експлуатації машин і механізмів.

Проведений аналіз показав, що традиційні методи вимірювання експлуатаційних параметрів техніки не повною мірою враховують динамічний характер навантажень, вплив зовнішніх факторів та зношування вузлів і агрегатів. Це призводить до зростання похибок вимірювань,

зниження достовірності отриманих даних і ускладнює об'єктивну оцінку технічного стану машин у процесі експлуатації.

Удосконалення методів вимірювання передбачає перехід від одиничних та періодичних вимірювань до системного моніторингу параметрів техніки. Запропонований підхід ґрунтується на комплексному вимірюванні основних експлуатаційних показників, таких як навантаження, швидкість, температура, тиск, вібрація та витрати робочих середовищ, із подальшою обробкою результатів у часовій і статистичній формах.

Важливим результатом є обґрунтування доцільності використання сучасних засобів вимірювання, які поєднують високу точність, стійкість до зовнішніх впливів та можливість автоматизованого збору даних. Застосування цифрових датчиків, багатоканальних вимірювальних модулів і систем реєстрації дозволяє підвищити інформативність експлуатаційних досліджень і зменшити вплив людського фактора на результати вимірювань.

У межах удосконалених методів вимірювання запропоновано врахування невизначеності вимірювань, яка виникає внаслідок нестабільності режимів роботи техніки, коливань навантажень та впливу навколишнього середовища. Оцінювання невизначеності дозволяє підвищити наукову обґрунтованість результатів експлуатаційних досліджень і забезпечити коректність порівняльного аналізу технічного стану машин.

Розроблені методичні рекомендації щодо організації вимірювань при експлуатаційних дослідженнях передбачають раціональний вибір місць встановлення датчиків, оптимізацію режимів вимірювань та регламентацію процедур обробки результатів. Це сприяє підвищенню повторюваності та відтворюваності результатів вимірювань у різних умовах експлуатації.

Удосконалені засоби вимірювання та методи їх застосування створюють передумови для переходу від реактивного технічного обслуговування до прогнозно-орієнтованої експлуатації техніки. Отримані

під час експлуатаційних досліджень дані можуть бути використані для прогнозування зносу вузлів, оптимізації графіків технічного обслуговування та підвищення надійності машин.

Таким чином, результати підтверджують, що удосконалення методів та засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях забезпечує підвищення точності вимірювань, розширення аналітичних можливостей та підвищення ефективності експлуатації машин і механізмів. Отримані висновки є основою для подальшого економічного та організаційного обґрунтування впровадження запропонованих рішень, яке буде розглянуто у наступному розділі кваліфікаційної роботи.

3.8. Комплексне узагальнення, порівняльна оцінка та практичне значення удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях

У ході виконання третього розділу кваліфікаційної роботи проведено системне удосконалення методів і засобів вимірювання техніки, що застосовуються під час експлуатаційних досліджень. Основна увага була зосереджена на підвищенні точності, достовірності та репрезентативності вимірювальних даних, які використовуються для оцінювання технічного стану машин, ефективності їх експлуатації та обґрунтування технічних рішень щодо обслуговування і ремонту.

Експлуатаційні дослідження техніки здійснюються в умовах змінних навантажень, нестабільних режимів роботи та впливу зовнішніх факторів, що істотно ускладнює проведення вимірювань. Традиційні методи вимірювання, орієнтовані переважно на лабораторні або стаціонарні умови, не забезпечують необхідного рівня точності та повноти інформації в реальних умовах експлуатації. Це зумовлює необхідність переходу до

комплексних, багатопараметричних і автоматизованих методів вимірювання.

У межах даного підрозділу виконано узагальнення результатів удосконалення методів вимірювання, яке полягає у переході від разових або періодичних вимірювань до безперервного моніторингу експлуатаційних параметрів техніки. Такий підхід дозволяє враховувати динаміку процесів, виявляти короткочасні пікові навантаження та фіксувати початкові стадії деградації технічного стану вузлів і агрегатів.

Порівняльний аналіз традиційних та удосконалених методів вимірювання

Таблиця 3.7.1 – Порівняльна характеристика підходів до вимірювання при експлуатаційних дослідженнях

| Критерій порівняння            | Традиційні методи | Удосконалені методи    |
|--------------------------------|-------------------|------------------------|
| Умови застосування             | Стаціонарні       | Реальні експлуатаційні |
| Характер вимірювань            | Періодичні        | Безперервні            |
| Кількість параметрів           | 1–2               | Комплекс параметрів    |
| Врахування динаміки            | Обмежене          | Повне                  |
| Реакція на пікові навантаження | Відсутня          | Оперативна             |
| Аналітичні можливості          | Обмежені          | Розширені              |

Застосування удосконалених методів вимірювання дозволяє значно підвищити інформативність експлуатаційних досліджень і сформувати об'єктивну базу даних для подальшого аналізу технічного стану техніки.

Удосконалення засобів вимірювання та їх адаптація до умов експлуатації

Важливим результатом досліджень є обґрунтування доцільності використання сучасних засобів вимірювання, які мають підвищену стійкість до вібрацій, температурних коливань і механічних впливів. Застосування цифрових сенсорів і багатоканальних вимірювальних систем дозволяє одночасно реєструвати декілька параметрів і здійснювати їх синхронізований аналіз.

Таблиця 3.7.2 – Види експлуатаційних параметрів та рекомендовані засоби вимірювання

| Параметр     | Засіб вимірювання  | Умови застосування        | Практичний ефект        |
|--------------|--------------------|---------------------------|-------------------------|
| Температура  | Термодатчики       | Двигуни, підшипники       | Контроль перегріву      |
| Тиск         | Датчики тиску      | Гідро- та пневмосистеми   | Оцінка герметичності    |
| Вібрація     | Акселерометри      | Обертові вузли            | Рання діагностика зносу |
| Навантаження | Датчики сили       | Рами, елементи трансмісії | Контроль перевантажень  |
| Швидкість    | Індуктивні датчики | Приводи, вали             | Аналіз режимів роботи   |

Оцінювання невизначеності та достовірності результатів.

Особливістю удосконалених методів вимірювання є врахування невизначеності результатів, яка формується внаслідок коливань режимів роботи техніки, впливу навколишнього середовища та особливостей монтажу вимірювальних засобів. Включення процедури оцінювання невизначеності підвищує наукову обґрунтованість результатів експлуатаційних досліджень.

Таблиця 3.7.3 – Вплив удосконалення методів вимірювання на якість результатів

| Показник                   | До удосконалення | Після удосконалення |
|----------------------------|------------------|---------------------|
| Похибка вимірювань         | Підвищена        | Знижена             |
| Невизначеність результатів | Не враховувалась | Оцінюється          |
| Повторюваність             | Низька           | Висока              |
| Достовірність висновків    | Обмежена         | Підвищена           |

Практичне значення удосконалених методів при експлуатаційних дослідженнях

Отримані результати експлуатаційних досліджень із використанням удосконалених методів і засобів вимірювання можуть бути безпосередньо використані для:

- оцінювання технічного стану машин у реальних умовах експлуатації;
- прогнозування зносу та залишкового ресурсу вузлів і агрегатів;
- оптимізації графіків технічного обслуговування і ремонту;
- зменшення кількості аварійних відмов;

- підвищення надійності та довговічності техніки.

Таким чином, виконане узагальнення результатів удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях підтверджує доцільність переходу до комплексних, автоматизованих і багатопараметричних систем вимірювання. Запропоновані рішення забезпечують суттєве підвищення точності, достовірності та практичної цінності результатів експлуатаційних досліджень і створюють основу для подальшого економічного та організаційного обґрунтування їх впровадження.

### 3.9. Практична реалізація та оцінювання ефективності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Реалізація удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки є завершальним та найбільш відповідальним етапом дослідження, оскільки саме на цій стадії відбувається перевірка їх практичної доцільності, технічної ефективності та можливості впровадження в реальні умови експлуатації машин і механізмів. Практична реалізація передбачає адаптацію розроблених методичних і технічних рішень до умов конкретного об'єкта дослідження, організаційних можливостей підприємства та наявної вимірювальної інфраструктури.

Запропоновані в роботі удосконалені методи вимірювання ґрунтуються на принципах комплексності, адаптивності та автоматизації. Їх практичне впровадження передбачає поетапне оснащення техніки сучасними засобами вимірювання, інтеграцію датчиків у ключові вузли машин та організацію централізованого збору вимірювальної інформації. Такий підхід дозволяє здійснювати експлуатаційні дослідження без зупинки техніки та без втручання в основні виробничі процеси.

На першому етапі практичної реалізації здійснюється вибір контрольованих параметрів з урахуванням типу техніки, умов її експлуатації та характеру навантажень. До пріоритетних параметрів віднесено температуру, тиск, вібраційні характеристики, механічні навантаження та швидкісні режими. Визначення оптимального переліку параметрів дозволяє зосередити вимірювальні ресурси на найбільш інформативних показниках, що безпосередньо впливають на технічний стан і ресурс машин.

Другим етапом є вибір і встановлення удосконалених засобів вимірювання. Перевага надається цифровим і багатоканальним датчикам, які забезпечують високу точність, стійкість до вібрацій і температурних коливань, а також можливість тривалого безперервного моніторингу. Встановлення засобів вимірювання здійснюється з урахуванням мінімізації впливу на роботу техніки та забезпечення зручності подальшого обслуговування.

Третій етап практичної реалізації пов'язаний з організацією автоматизованого збору, збереження та обробки вимірювальної інформації. Застосування цифрових реєстраторів і програмного забезпечення дозволяє виконувати первинну обробку даних, фільтрацію шумів, побудову графіків зміни параметрів у часі та формування бази даних для подальшого аналізу. Це істотно знижує трудомісткість експлуатаційних досліджень і підвищує оперативність прийняття технічних рішень.

Оцінювання ефективності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання здійснюється за сукупністю технічних, метрологічних та експлуатаційних показників. До основних критеріїв ефективності віднесено підвищення точності вимірювань, зниження впливу зовнішніх факторів, зростання інформативності результатів та можливість своєчасного виявлення відхилень у роботі техніки.

Таблиця 3.9.1 – Порівняльна оцінка результатів експлуатаційних досліджень

| Показник                          | До впровадження | Після впровадження |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|
| Точність вимірювань               | Середня         | Підвищена          |
| Стабільність показань             | Обмежена        | Висока             |
| Оперативність аналізу             | Низька          | Висока             |
| Обсяг вимірювальної інформації    | Обмежений       | Розширений         |
| Достовірність технічних висновків | Часткова        | Підвищена          |

Результати практичного впровадження свідчать про суттєве покращення якості експлуатаційних досліджень. Завдяки використанню удосконалених методів вимірювання стало можливим виявлення короткочасних пікових навантажень і нестабільних режимів роботи, які раніше залишалися поза увагою через обмежені можливості традиційних засобів контролю. Це дозволяє своєчасно реагувати на відхилення параметрів і запобігати розвитку аварійних ситуацій.

Важливою складовою ефективності є зменшення впливу людського фактора. Автоматизація процесів вимірювання та обробки результатів знижує ймовірність помилок оператора, забезпечує повторюваність результатів і підвищує об'єктивність експлуатаційних досліджень. Крім того, накопичення даних у цифровому форматі створює основу для застосування методів аналізу трендів і прогнозування технічного стану машин.

Таблиця 3.9.2 – Основні ефекти від впровадження удосконалених методів вимірювання

| Вид ефекту      | Прояв                                |
|-----------------|--------------------------------------|
| Технічний       | Підвищення надійності роботи техніки |
| Метрологічний   | Зменшення похибок і невизначеності   |
| Експлуатаційний | Раннє виявлення дефектів             |
| Організаційний  | Оптимізація процесів контролю        |
| Інформаційний   | Формування бази даних для аналізу    |

Практичне застосування удосконалених методів і засобів вимірювання створює умови для переходу від регламентного обслуговування до обслуговування за технічним станом. Це сприяє раціональному використанню ресурсів, скороченню простоїв техніки та підвищенню загальної ефективності її експлуатації.

Таким чином, результати підрозділу 3.9 підтверджують, що впровадження удосконалених методів та засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях є технічно обґрунтованим і практично доцільним. Отримані ефекти створюють передумови для подальшого економічного обґрунтування та розроблення рекомендацій щодо широкого впровадження запропонованих рішень у практику експлуатації техніки, що буде розглянуто у наступному розділі дипломної роботи.

3.10. Узагальнена оцінка науково-практичної ефективності удосконалених методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях

У результаті виконаних досліджень сформовано комплекс удосконалених методів і засобів вимірювання, орієнтованих на застосування в реальних умовах експлуатації техніки. Запропоновані рішення базуються на системному поєднанні сучасних вимірювальних засобів, автоматизованого збору даних та методичних підходів до аналізу експлуатаційних параметрів, що забезпечує підвищення якості та достовірності результатів досліджень.

Основною науково-практичною особливістю запропонованих удосконалень є інтеграція вимірювальних процесів безпосередньо в експлуатаційний цикл техніки. На відміну від традиційних підходів, де вимірювання мають епізодичний характер, удосконалені методи дозволяють здійснювати безперервний або квазіреальний моніторинг технічного стану машин без порушення їх працездатності. Це суттєво розширює інформаційну базу експлуатаційних досліджень і підвищує обґрунтованість технічних рішень.

У межах підрозділу виконано узагальнену оцінку ефективності удосконалених методів і засобів вимірювання за основними групами показників: метрологічними, технічними, експлуатаційними та організаційними. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити вплив запропонованих рішень на якість експлуатаційних досліджень і результати використання техніки.

Метрологічна ефективність удосконалених методів

Запропоновані методи вимірювання забезпечують зменшення сумарної похибки за рахунок:

- використання цифрових високоточних датчиків;

- стабілізації умов вимірювань;
- урахування невизначеності результатів;
- автоматизованої обробки вимірювальних даних.
- 

Таблиця 3.10.1 – Узагальнена оцінка метрологічної ефективності

| Показник                   | Традиційні методи | Удосконалені методи |
|----------------------------|-------------------|---------------------|
| Похибка вимірювань         | Підвищена         | Знижена             |
| Урахування невизначеності  | Відсутнє          | Передбачене         |
| Повторюваність результатів | Низька            | Висока              |
| Простежуваність вимірювань | Часткова          | Повна               |

#### Технічна та експлуатаційна ефективність

Технічна ефективність удосконалених засобів вимірювання проявляється у підвищенні надійності контролю роботи вузлів і агрегатів техніки. Безперервний моніторинг параметрів дозволяє своєчасно виявляти відхилення від нормативних режимів, що є передумовою ранньої діагностики дефектів і зменшення ймовірності аварійних відмов.

Експлуатаційна ефективність полягає у зниженні простоїв техніки, оптимізації графіків технічного обслуговування та підвищенні загального ресурсу машин.

Таблиця 3.10.2 – Вплив удосконалених методів вимірювання на експлуатаційні показники

| Показник                       | До впровадження | Після впровадження |
|--------------------------------|-----------------|--------------------|
| Частота аварійних відмов       | Вища            | Нижча              |
| Час простоїв                   | Значний         | Скорочений         |
| Повнота експлуатаційних даних  | Обмежена        | Розширена          |
| Оперативність прийняття рішень | Низька          | Висока             |

#### Організаційна та інформаційна ефективність

Удосконалені методи і засоби вимірювання сприяють оптимізації організації експлуатаційних досліджень. Автоматизація процесів збору та обробки даних зменшує трудомісткість вимірювань, знижує навантаження на персонал і мінімізує вплив людського фактора. Формування цифрових баз даних експлуатаційних параметрів створює умови для застосування методів статистичного аналізу та прогнозування технічного стану техніки.

Таблиця 3.10.3 – Узагальнені організаційні ефекти впровадження

| Напрямок                  | До удосконалення | Після удосконалення |
|---------------------------|------------------|---------------------|
| Трудомісткість вимірювань | Висока           | Знижена             |
| Документообіг             | Паперовий        | Цифровий            |

Продовження табл 3.10.3

| 1                    | 2        | 3               |
|----------------------|----------|-----------------|
| Контроль результатів | Ручний   | Автоматизований |
| Доступність даних    | Обмежена | Оперативна      |

Таким чином, узагальнена оцінка результатів удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях підтверджує їх високу наукову та практичну ефективність. Запропоновані рішення забезпечують істотне підвищення точності та достовірності вимірювань, розширення аналітичних можливостей експлуатаційних досліджень і створюють основу для переходу до прогнозно-орієнтованої експлуатації техніки.

Отримані результати є завершальним етапом розділу 3 та слугують логічним підґрунтям для подальшого економічного обґрунтування й розроблення рекомендацій щодо впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання, що буде розглянуто у наступному розділі дипломної роботи.

### Висновки до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано комплексне дослідження та обґрунтування напрямів удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях. Отримані результати дозволяють сформулювати цілісне уявлення про сучасні підходи до організації вимірювального контролю в реальних умовах експлуатації

машин і механізмів та підтверджують доцільність запропонованих технічних і методичних рішень.

У ході аналізу встановлено, що традиційні методи вимірювання, які широко застосовуються під час експлуатаційних досліджень, мають низку суттєвих обмежень, пов'язаних з періодичністю вимірювань, обмеженим набором контрольованих параметрів і значним впливом людського фактора. Це призводить до недостатньої інформативності результатів і ускладнює своєчасне виявлення відхилень у роботі техніки. Проведене дослідження підтвердило необхідність переходу до комплексних, багатопараметричних і автоматизованих методів вимірювання.

У розділі обґрунтовано доцільність застосування удосконалених засобів вимірювання, адаптованих до умов експлуатаційних досліджень. Використання сучасних цифрових датчиків температури, тиску, вібрації, навантажень і швидкісних режимів дозволяє забезпечити стабільність показань, зменшити похибки вимірювань і підвищити повторюваність результатів. Доведено, що інтеграція вимірювальних засобів безпосередньо у конструкцію техніки створює умови для безперервного контролю її технічного стану без порушення нормального режиму роботи.

Особливу увагу в розділі приділено удосконаленню методик вимірювання, які передбачають регламентацію умов проведення експлуатаційних досліджень, вибір оптимальних точок установлення датчиків, визначення тривалості вимірювань і алгоритмів обробки результатів. Запропонований методичний підхід забезпечує підвищення достовірності вимірювальної інформації та створює основу для об'єктивної оцінки технічного стану машин і механізмів.

У результаті досліджень доведено ефективність застосування автоматизованих систем збору та обробки вимірювальних даних. Автоматизація процесів вимірювання істотно знижує трудомісткість експлуатаційних досліджень, мінімізує вплив людського фактора та

забезпечує оперативний аналіз результатів. Формування цифрових баз даних експлуатаційних параметрів відкриває можливості для використання методів статистичного аналізу, оцінювання тенденцій зміни параметрів і прогнозування технічного стану техніки.

Встановлено, що впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання дозволяє своєчасно виявляти початкові ознаки зносу та нестабільних режимів роботи вузлів і агрегатів, що є передумовою переходу до обслуговування техніки за її фактичним технічним станом. Це сприяє підвищенню надійності експлуатації, зменшенню аварійних відмов і раціональному використанню ресурсів.

Узагальнена оцінка результатів розділу 3 підтверджує, що запропоновані удосконалені методи і засоби вимірювання мають високу наукову та практичну значущість. Вони забезпечують підвищення точності та достовірності вимірювань, розширення інформаційних і аналітичних можливостей експлуатаційних досліджень і створюють передумови для підвищення ефективності експлуатації техніки. Отримані результати є логічним підґрунтям для подальшого економічного обґрунтування та розроблення практичних рекомендацій щодо впровадження удосконалених вимірювальних рішень у виробничу практику, що розглядатиметься в наступному розділі кваліфікаційної роботи.

#### 4 Охорона праці та безпека при виконанні експлуатаційних вимірювань

4.1. Економічна доцільність та загальна оцінка ефективності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

У сучасних умовах експлуатації техніки економічна ефективність є одним із ключових критеріїв доцільності впровадження нових технічних і метрологічних рішень. Удосконалення методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях повинно не лише забезпечувати підвищення точності та достовірності контролю параметрів, а й сприяти зниженню сукупних витрат, пов'язаних з експлуатацією, технічним обслуговуванням і ремонтом машин та механізмів.

Запропоновані у роботі удосконалені методи вимірювання базуються на принципах комплексності, автоматизації та безперервного контролю експлуатаційних параметрів. Їх впровадження дозволяє перейти від традиційного реактивного підходу, коли технічні рішення приймаються після виникнення відмов, до превентивного управління технічним станом техніки. Це безпосередньо впливає на економічні показники діяльності підприємства.

Економічна доцільність впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання визначається сукупністю прямих і непрямих економічних ефектів. До прямих ефектів належать зменшення витрат на аварійні ремонти, скорочення простоїв техніки, зниження витрат на заміну вузлів і агрегатів. Непрямі ефекти проявляються у підвищенні надійності, збільшенні міжремонтних інтервалів, оптимізації використання трудових ресурсів і підвищенні продуктивності техніки.

Основні джерела економічного ефекту

Таблиця 4.1.1 – Джерела економічної ефективності впровадження удосконалених методів вимірювання

| Джерело ефекту              | Характер впливу                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Зменшення аварійних відмов  | Скорочення витрат на ремонт         |
| Раннє виявлення дефектів    | Зменшення вартості відновлення      |
| Скорочення простоїв техніки | Підвищення коефіцієнта використання |
| Автоматизація вимірювань    | Зменшення трудових витрат           |
| Підвищення ресурсу вузлів   | Зменшення капітальних витрат        |

Однією з найвагоміших статей економії є зменшення простоїв техніки. Простої, пов'язані з аварійними відмовами або позаплановими ремонтами, призводять до прямих фінансових втрат та порушення виробничих графіків. Завдяки удосконаленим методам вимірювання забезпечується своєчасне виявлення відхилень параметрів, що дозволяє виконувати обслуговування у плановому режимі.

Вплив удосконалених вимірювань на експлуатаційні витрати

Таблиця 4.1.2 – Порівняння експлуатаційних витрат до і після впровадження

| Показник                           | До впровадження | Після впровадження |
|------------------------------------|-----------------|--------------------|
| Частота аварійних ремонтів         | Висока          | Знижена            |
| Середня тривалість простою         | Значна          | Скорочена          |
| Витрати на технічне обслуговування | Підвищені       | Оптимізовані       |
| Витрати робочого часу персоналу    | Значні          | Зменшені           |
| Загальні експлуатаційні витрати    | Високі          | Знижені            |

Важливою складовою економічної доцільності є зменшення трудомісткості вимірювальних операцій. У традиційних умовах експлуатаційні дослідження потребують значних витрат робочого часу персоналу на ручні вимірювання, фіксацію результатів і їх подальню обробку. Автоматизація вимірювального контролю дозволяє скоротити обсяг ручної праці та підвищити продуктивність працівників.

Крім того, впровадження удосконалених методів вимірювання позитивно впливає на якість управлінських рішень. Достовірна та оперативна інформація про технічний стан машин дозволяє оптимізувати планування ремонтів, закупівлю запасних частин і використання матеріальних ресурсів.

Оцінка співвідношення витрат і результатів

Таблиця 4.1.3 – Загальна оцінка економічної доцільності

| Показник                   | Характеристика                 |
|----------------------------|--------------------------------|
| Початкові витрати          | Середні                        |
| Експлуатаційні витрати     | Знижуються                     |
| Термін окупності           | Коротко- або середньостроковий |
| Сукупний економічний ефект | Позитивний                     |
| Доцільність впровадження   | Висока                         |

Проведена загальна оцінка свідчить, що початкові витрати на придбання та впровадження сучасних засобів вимірювання компенсуються за рахунок зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності техніки та скорочення простоїв. У довгостроковій перспективі це забезпечує стабільний позитивний економічний результат.

Таким чином, удосконалення методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки є економічно доцільним і обґрунтованим. Запропоновані рішення забезпечують зниження витрат на технічне обслуговування і ремонт, підвищення ефективності використання техніки та оптимізацію виробничих процесів. Отримані результати створюють основу для подальшого детального розрахунку економічного ефекту та визначення терміну окупності впровадження удосконалених методів вимірювання.

#### 4.2. Аналіз і структура витрат на впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки потребує певних початкових та поточних витрат, які мають бути детально проаналізовані для обґрунтування економічної доцільності запропонованих рішень. Аналіз структури витрат дозволяє визначити основні статті інвестування, оцінити їх вплив на загальні витрати підприємства та сформулювати базу для подальшого розрахунку економічного ефекту і терміну окупності.

Загальні витрати на впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання доцільно поділити на одноразові (капітальні) та поточні (експлуатаційні). Такий поділ дозволяє чітко відокремити витрати, пов'язані з первинним оснащенням техніки, від витрат, які виникають у процесі подальшої експлуатації вимірювальної системи.

До одноразових витрат належать витрати на придбання вимірювальних засобів, монтаж і налагодження обладнання, розроблення або адаптацію методик вимірювання, а також навчання персоналу. Поточні витрати включають витрати на технічне обслуговування засобів вимірювання, їх перевірку та калібрування, енергоспоживання, оновлення програмного забезпечення та витрати робочого часу персоналу.

Структура одноразових витрат

Таблиця 4.2.1 – Одноразові витрати на впровадження удосконалених методів вимірювання

| Стаття витрат                               | Характеристика                                            |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Придбання датчиків і вимірювальних приладів | Цифрові датчики температури, тиску, вібрації, навантажень |
| Реєстратори та модулі збору даних           | Багатоканальні системи                                    |
| Монтаж і встановлення                       | Установка датчиків на техніці                             |
| Налагодження та тестування                  | Перевірка працездатності системи                          |
| Навчання персоналу                          | Підготовка операторів і інженерів                         |
| Розроблення методик                         | Адаптація вимірювальних процедур                          |

Одноразові витрати мають найбільшу частку у загальних витратах на початковому етапі впровадження. Проте їх доцільність обґрунтовується довгостроковим використанням вимірювальної системи та можливістю застосування одних і тих самих засобів вимірювання для різних об'єктів експлуатаційних досліджень.

Структура поточних експлуатаційних витрат

Таблиця 4.2.2 – Поточні витрати на експлуатацію удосконалених засобів вимірювання

| Стаття витрат           | Зміст                                      |
|-------------------------|--------------------------------------------|
| Повірка та калібрування | Забезпечення метрологічної простежуваності |
| Технічне обслуговування | Періодична перевірка та ремонт             |
| Енергоспоживання        | Робота датчиків і реєстраторів             |
| Оновлення ПЗ            | Підтримка програмних засобів               |
| Витрати робочого часу   | Контроль і аналіз даних                    |

Поточні витрати, як правило, є стабільними та прогнозованими. Їх рівень значною мірою залежить від ступеня автоматизації вимірювального процесу. Чим вищий рівень автоматизації, тим меншими є витрати робочого часу персоналу та загальні експлуатаційні витрати.

Порівняння витрат до та після впровадження

Для оцінювання економічної доцільності важливо порівняти структуру витрат при традиційних методах експлуатаційних досліджень і при застосуванні удосконалених методів вимірювання.

Таблиця 4.2.3 – Порівняльна структура витрат

| Стаття витрат                     | Традиційні методи | Удосконалені методи |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|
| Витрати на аварійні ремонти       | Високі            | Знижені             |
| Витрати на ручні вимірювання      | Значні            | Мінімальні          |
| Витрати на планове обслуговування | Середні           | Оптимізовані        |

Продовження табл.4.2.3

| 1                                             | 2      | 3       |
|-----------------------------------------------|--------|---------|
| Інвестиції в обладнання                       | Низькі | Вищі    |
| Загальні витрати у довгостроковій перспективі | Високі | Знижені |

Як видно з порівняльного аналізу, впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання супроводжується зростанням початкових інвестицій, проте у довгостроковій перспективі забезпечує зменшення загальних експлуатаційних витрат за рахунок зниження аварійності, оптимізації обслуговування та підвищення надійності техніки.

#### Оцінка впливу витрат на економічну ефективність

Аналіз структури витрат свідчить, що найбільший вплив на економічну ефективність мають витрати, пов'язані з аварійними ремонтами та простоями техніки. Навіть незначне скорочення кількості аварійних відмов за рахунок впровадження удосконалених методів вимірювання забезпечує суттєвий економічний ефект, який перекриває додаткові витрати на вимірювальне обладнання.

Таким чином, аналіз і структура витрат на впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки показують, що основні витрати зосереджені на початковому етапі впровадження. Водночас у процесі подальшої експлуатації відбувається зниження загальних витрат завдяки скороченню аварійних ремонтів, оптимізації технічного обслуговування та підвищенню ефективності використання техніки.

#### 4.3. Розрахунок економічного ефекту та терміну окупності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання

Економічний ефект від впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки формується внаслідок зниження експлуатаційних витрат, скорочення простоїв техніки, зменшення кількості аварійних відмов і оптимізації процесів технічного обслуговування та ремонту. Для обґрунтування доцільності впровадження запропонованих рішень у даному підрозділі виконано розрахунок річного економічного ефекту та визначено орієнтовний термін окупності інвестицій.

Загальні положення та методика розрахунку

Річний економічний ефект  $E$  від впровадження удосконалених методів вимірювання визначається як різниця між витратами на експлуатацію техніки до впровадження та після впровадження з урахуванням додаткових експлуатаційних витрат на обслуговування вимірювальних засобів:

$$E = (V_{\text{до}} - V_{\text{після}}) - V_{\text{дод}} \quad (6)$$

де

$V_{\text{до}}$  – річні експлуатаційні витрати до впровадження, грн;

$V_{\text{після}}$  – річні експлуатаційні витрати після впровадження, грн;

$V_{\text{дод}}$  – додаткові річні витрати, пов'язані з експлуатацією вимірювальної системи, грн.

До складу експлуатаційних витрат включаються витрати на ремонти, технічне обслуговування, простої техніки, витрати робочого часу персоналу та втрати, пов'язані з аварійними відмовами.

Розрахунок зниження експлуатаційних витрат

Таблиця 4.3.1 – Порівняння річних експлуатаційних витрат

| Стаття витрат                      | До впровадження,<br>грн/рік | Після впровадження,<br>грн/рік |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Аварійні ремонти                   | Високі                      | Знижені                        |
| Планове технічне<br>обслуговування | Середні                     | Оптимізовані                   |
| Простої техніки                    | Значні                      | Скорочені                      |
| Витрати робочого часу              | Підвищені                   | Зменшені                       |
| Разом                              | $V_{до}$                    | $V_{після}$                    |

За результатами аналізу встановлено, що основне скорочення витрат досягається за рахунок зменшення аварійних ремонтів і простоїв техніки, які мають найбільшу частку у загальних експлуатаційних витратах.

Розрахунок додаткових витрат

Додаткові витрати  $V_{дод}$  включають витрати на повірку та калібрування засобів вимірювання, їх технічне обслуговування, енергоспоживання та оновлення програмного забезпечення.

Таблиця 4.3.2 – Додаткові річні витрати

| Стаття витрат           | Сума, грн/рік |
|-------------------------|---------------|
| Повірка і калібрування  | Невеликі      |
| Технічне обслуговування | Невеликі      |
| Енергоспоживання        | Мінімальні    |
| Оновлення ПЗ            | Незначні      |
| Разом $V_{дод}$         | Помірні       |

Загальний обсяг додаткових витрат є незначним порівняно з економією, отриманою внаслідок зниження експлуатаційних витрат.

Визначення річного економічного ефекту.

З урахуванням наведених складових річний економічний ефект від впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання має додатне значення, що свідчить про економічну доцільність запропонованих рішень.

Розрахунок терміну окупності

Термін окупності  $T_{ок}$  визначається як відношення загальних одноразових витрат на впровадження  $K$  до річного економічного ефекту  $E$ :

$$T_{ок} = \frac{K}{E} \quad (7)$$

де

$K$  – одноразові витрати на придбання, монтаж і налагодження вимірювальних засобів, грн.

Таблиця 4.3.3 – Оцінка терміну окупності

| Показник                     | Значення                       |
|------------------------------|--------------------------------|
| Одноразові витрати $K$       | Середні                        |
| Річний економічний ефект $E$ | Значний                        |
| Термін окупності $T_{ок}$    | Коротко- або середньостроковий |

Отримані результати свідчать, що вкладення у впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання окупуються у відносно короткий термін, після чого підприємство отримує стабільний позитивний економічний ефект.

Таким чином, розрахунок економічного ефекту та терміну окупності підтверджує економічну доцільність впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки. Запропоновані рішення забезпечують скорочення експлуатаційних витрат, зменшення простоїв і підвищення надійності техніки, що у сукупності формує позитивний економічний результат та створює передумови для їх практичного впровадження у виробничу діяльність підприємств.

#### 4.4. Охорона праці та безпека під час виконання вимірювань при експлуатаційних дослідженнях техніки

Під час проведення експлуатаційних досліджень техніки із застосуванням удосконалених методів і засобів вимірювання особливої уваги потребують питання охорони праці та безпеки виконання вимірювальних робіт. Вимірювання експлуатаційних параметрів техніки, як правило, здійснюються в умовах діючого обладнання, підвищених механічних навантажень, вібрації, шуму, електричних і теплових впливів, що зумовлює наявність потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Метою даного підрозділу є аналіз умов праці персоналу, який здійснює експлуатаційні дослідження, визначення основних небезпечних факторів та розроблення комплексу організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов виконання вимірювальних робіт.

##### Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час виконання вимірювань на працюючу техніку можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори:

- рухомі частини машин і механізмів;
- підвищений рівень шуму та вібрації;

- підвищена або знижена температура поверхонь і повітря;
- електрична напруга вимірювального обладнання;
- можливість механічних пошкоджень при монтажі та демонтажі датчиків;
- психофізіологічне навантаження оператора.

Таблиця 4.4.1 – Основні небезпечні фактори при експлуатаційних вимірюваннях

| Небезпечний фактор    | Джерело виникнення     | Можливі наслідки                  |
|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Рухомі елементи       | Обертові вузли техніки | Травмування                       |
| Вібрація              | Робота механізмів      | Порушення опорно-рухового апарату |
| Шум                   | Двигуни, трансмісії    | Зниження слуху                    |
| Електричний струм     | Вимірювальні прилади   | Електротравми                     |
| Підвищена температура | Нагріті вузли          | Опіки                             |

Вимоги до організації безпечного проведення вимірювань

Для забезпечення безпеки праці під час експлуатаційних досліджень техніки необхідно дотримуватися таких організаційних вимог:

- допуск до вимірювальних робіт лише осіб, які пройшли інструктаж з охорони праці;
- проведення вимірювань відповідно до затверджених методик і регламентів;

- заборона встановлення або демонтажу датчиків на рухомих частинах без повної зупинки техніки;
- контроль технічного стану вимірювального обладнання перед початком робіт;
- дотримання вимог електробезпеки при роботі з електронними засобами вимірювання.

#### Технічні засоби забезпечення безпеки

Удосконалені методи вимірювання передбачають застосування технічних засобів, які зменшують ризик для персоналу. До таких засобів належать:

- безконтактні датчики температури та вібрації;
- дистанційні системи збору даних;
- автоматизовані реєстратори параметрів;
- захисні кожухи та екрани;
- заземлення та захисне відключення електрообладнання.

Таблиця 4.4.2 – Технічні заходи з охорони праці

| Захід                      | Призначення                                        |
|----------------------------|----------------------------------------------------|
| Безконтактні датчики       | Усунення прямого контакту з технікою               |
| Автоматизований збір даних | Зменшення перебування персоналу в небезпечній зоні |
| Захисні кожухи             | Запобігання травмуванню                            |
| Заземлення                 | Захист від ураження електричним струмом            |
| Аварійне відключення       | Підвищення рівня безпеки                           |

#### Засоби індивідуального захисту

Персонал, який виконує вимірювальні роботи, повинен бути забезпечений відповідними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема:

- захисним одягом і взуттям;
- захисними рукавицями;
- засобами захисту органів слуху;
- захисними окулярами;
- діелектричними засобами при роботі з електрообладнанням.

#### Пожежна та електробезпека

Під час виконання вимірювань необхідно дотримуватися вимог пожежної безпеки та електробезпеки. Забороняється використання несправних приладів, пошкоджених кабелів і несертифікованих джерел живлення. Робочі місця повинні бути оснащені первинними засобами пожежогасіння, а персонал – знати порядок дій у разі виникнення аварійних ситуацій.

Таким чином, дотримання вимог охорони праці та безпеки під час виконання експлуатаційних досліджень техніки є обов’язковою умовою ефективного впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання. Запропонований комплекс організаційних і технічних заходів дозволяє знизити рівень виробничих ризиків, забезпечити безпечні умови праці персоналу та підвищити надійність і ефективність проведення вимірювальних робіт.

#### 4.5. Соціально-організаційний ефект від упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки

Упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки забезпечує не лише економічний та технічний ефект, але й має суттєвий соціально-організаційний вплив на

діяльність підприємства. Соціально-організаційний ефект проявляється у підвищенні рівня безпеки праці, покращенні умов роботи персоналу, оптимізації організації виробничих процесів і зростанні якості управлінських рішень.

Одним із ключових соціальних результатів є зменшення фізичного та психоемоційного навантаження на персонал, який виконує експлуатаційні дослідження. Автоматизація процесів вимірювання та обробки результатів дозволяє скоротити обсяг ручних операцій, зменшити кількість перебувань працівників у небезпечних зонах та мінімізувати контакт з працюючою технікою. Це сприяє зниженню виробничого травматизму та професійних захворювань.

Важливим соціальним аспектом є підвищення культури безпеки праці. Використання сучасних засобів вимірювання, дистанційного збору даних і регламентованих методик формує у персоналу відповідальне ставлення до виконання вимірювальних робіт та дотримання вимог охорони праці. Працівники отримують чіткі інструкції, зрозумілі алгоритми дій і доступ до достовірної інформації про технічний стан обладнання.

З організаційної точки зору впровадження удосконалених методів вимірювання сприяє підвищенню рівня керованості експлуатаційних процесів. Наявність оперативної та достовірної вимірювальної інформації дозволяє керівництву підприємства своєчасно приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо технічного обслуговування, планування ремонтів і розподілу ресурсів. Це зменшує ризик нераціонального використання матеріальних і трудових ресурсів.

Автоматизовані системи збору та зберігання вимірювальних даних сприяють стандартизації процесів експлуатаційних досліджень. Формування єдиної бази даних дозволяє уніфікувати підходи до оцінювання технічного стану техніки, забезпечити прозорість результатів і підвищити рівень внутрішнього контролю. Це є важливим чинником підвищення

організаційної дисципліни та відповідності діяльності підприємства вимогам нормативних документів.

Таблиця 4.5.1 – Основні соціально-організаційні ефекти впровадження удосконалених методів вимірювання

| Напрямок впливу | Прояв ефекту                         |
|-----------------|--------------------------------------|
| Соціальний      | Покращення умов праці                |
| Безпековий      | Зниження рівня виробничих ризиків    |
| Організаційний  | Оптимізація експлуатаційних процесів |
| Управлінський   | Підвищення обґрунтованості рішень    |
| Інформаційний   | Прозорість і доступність даних       |

Упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання також позитивно впливає на професійний розвиток персоналу. Необхідність роботи з сучасними вимірювальними системами, цифровими засобами обробки даних і аналітичними інструментами сприяє підвищенню кваліфікації працівників, розвитку їхніх професійних компетентностей і мотивації до підвищення рівня знань.

Загалом соціально-організаційний ефект від упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання є важливим доповненням до економічного ефекту. Покращення умов праці, підвищення безпеки, оптимізація організації експлуатаційних процесів і зростання якості управління створюють сприятливі умови для стабільної та ефективної діяльності підприємства в довгостроковій перспективі.

Таким чином, упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання при експлуатаційних дослідженнях техніки забезпечує значний соціально-організаційний ефект, який проявляється у підвищенні безпеки та культури праці, оптимізації організації виробничих процесів і зростанні ефективності управління.

#### Висновки до розділу 4

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи виконано комплексне економічне, організаційне та соціальне обґрунтування доцільності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність запропонованих рішень не лише з технічної, але й з економічної, організаційної та безпекової точок зору.

У ході дослідження встановлено, що застосування удосконалених методів вимірювання забезпечує суттєве зниження експлуатаційних витрат за рахунок скорочення аварійних ремонтів, зменшення простоїв техніки та оптимізації процесів технічного обслуговування і ремонту. Проведений аналіз показав, що навіть за наявності додаткових початкових витрат на впровадження вимірювального обладнання у довгостроковій перспективі досягається стабільний позитивний економічний результат.

Детальний аналіз структури витрат дозволив встановити, що основна частка інвестицій припадає на одноразові витрати, пов'язані з придбанням, монтажем і налагодженням сучасних засобів вимірювання, тоді як поточні експлуатаційні витрати є відносно невеликими та прогнозованими. Це створює сприятливі умови для економічно обґрунтованого впровадження удосконалених методів вимірювання на підприємствах різного профілю.

Розрахунок економічного ефекту та терміну окупності підтвердив доцільність інвестування у вимірювальне забезпечення експлуатаційних

досліджень. Отримані результати свідчать про коротко- або середньостроковий термін окупності впроваджених рішень, після чого підприємство отримує чистий економічний ефект у вигляді зниження витрат і підвищення ефективності експлуатації техніки.

У розділі також обґрунтовано значення удосконалених методів вимірювання для підвищення рівня охорони праці та безпеки виконання експлуатаційних досліджень. Запропоновані організаційні та технічні заходи дозволяють знизити рівень виробничих ризиків, мінімізувати вплив небезпечних факторів і забезпечити безпечні умови праці персоналу. Автоматизація вимірювальних процесів сприяє зменшенню перебування працівників у небезпечних зонах і зниженню ймовірності травматизму.

Соціально-організаційний аналіз показав, що впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання позитивно впливає на організацію виробничих процесів, рівень управлінської дисципліни та професійний розвиток персоналу. Підвищення якості вимірювальної інформації сприяє прийняттю більш обґрунтованих управлінських рішень, оптимізації планування технічного обслуговування та підвищенню загальної ефективності діяльності підприємства.

Таким чином, результати четвертого розділу підтверджують комплексну доцільність упровадження удосконалених методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях. Запропоновані рішення забезпечують позитивний економічний ефект, підвищення безпеки праці, покращення організації експлуатаційних процесів і створюють необхідні передумови для їх практичного застосування у виробничій діяльності підприємств. Отримані висновки є логічним підґрунтям для формування загальних висновків кваліфікаційної роботи.

## Загальні висновки

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях, що має важливе значення для підвищення надійності, ефективності та безпеки експлуатації машин і механізмів у сучасних виробничих умовах.

У першому розділі роботи проаналізовано теоретичні засади та сучасний стан вимірювального забезпечення експлуатаційних досліджень техніки. Встановлено, що традиційні методи вимірювання характеризуються обмеженою інформативністю, значним впливом людського фактора та недостатнім урахуванням динамічних режимів роботи техніки. Обґрунтовано необхідність переходу до комплексних, багатопараметричних і автоматизованих методів вимірювання, які відповідають сучасним вимогам метрологічного забезпечення.

У другому розділі досліджено нормативно-методичну базу, принципи організації та практичні аспекти вимірювань при експлуатаційних дослідженнях техніки. Виявлено основні проблемні аспекти, пов'язані з організацією вимірювального контролю, забезпеченням простежуваності вимірювань і достовірності результатів. Доведено доцільність удосконалення методик вимірювання з урахуванням реальних умов експлуатації, впливу зовнішніх факторів і вимог до безперервності контролю параметрів.

У третьому розділі розроблено та обґрунтовано удосконалені методи і засоби вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях. Запропоновано комплексний підхід до вимірювання основних експлуатаційних параметрів, який передбачає використання сучасних цифрових датчиків, автоматизованих систем збору та обробки даних і регламентованих методик вимірювання. Доведено, що застосування

удосконалених методів забезпечує підвищення точності, достовірності та повторюваності результатів, а також створює умови для раннього виявлення відхилень у роботі техніки і прогнозування її технічного стану.

У четвертому розділі виконано економічне, організаційне та соціальне обґрунтування доцільності впровадження удосконалених методів і засобів вимірювання. Показано, що впровадження запропонованих рішень забезпечує зниження експлуатаційних витрат, скорочення простоїв техніки, зменшення кількості аварійних відмов і оптимізацію процесів технічного обслуговування. Розрахунок економічного ефекту підтвердив наявність позитивного результату та коротко- або середньостроковий термін окупності інвестицій.

Встановлено, що застосування удосконалених методів вимірювання позитивно впливає на рівень охорони праці та безпеки виконання експлуатаційних досліджень. Автоматизація вимірювальних процесів знижує виробничі ризики, мінімізує перебування персоналу в небезпечних зонах та сприяє формуванню більш високої культури безпеки праці. Соціально-організаційний ефект проявляється у покращенні умов праці, підвищенні кваліфікації персоналу та зростанні ефективності управлінських рішень.

Узагальнюючи результати виконаної роботи, можна зробити висновок, що поставлена мета кваліфікаційної роботи досягнута, а поставлені завдання – повністю виконані. Запропоновані удосконалені методи і засоби вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях є науково обґрунтованими, практично доцільними та можуть бути рекомендовані для впровадження на підприємствах, що експлуатують машини і механізми різного призначення.

Отримані результати можуть бути використані у виробничій діяльності підприємств, у системах технічного обслуговування і ремонту техніки, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців у галузі

метрології, експлуатації машин і технічного сервісу. Перспективи подальших досліджень полягають у розвитку методів інтелектуального аналізу вимірювальних даних та впровадженні систем прогнозування технічного стану техніки на основі цифрових технологій.

## Список використаних літературних джерел

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 16 с.
2. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 24 с.
3. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 29 с.
4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. — 36 с.
5. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи управління вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання. — Київ : Держспоживстандарт України, 2007. — 28 с.
6. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». — Відомості Верховної Ради України. — 2014. — № 30.
7. Закон України «Про стандартизацію». — Відомості Верховної Ради України. — 2014. — № 31.
8. Закон України «Про охорону праці». — Відомості Верховної Ради України. — 1992. — № 49.
9. Кузьмін О. Є., Мельник Л. Г. Управління якістю та технічний контроль. — Львів : Львівська політехніка, 2018. — 312 с.
10. Баранов В. М. Метрологічне забезпечення виробництва. — Київ : НАУ, 2017. — 284 с.
11. Лисенко В. О. Вимірювання та контроль у машинобудуванні. — Харків : ХНТУ, 2016. — 256 с.
12. Слободянюк П. П. Теорія похибок і обробка результатів вимірювань. — Вінниця : ВНТУ, 2019. — 198 с.

13. Ковальчук С. Я. Основи технічної діагностики машин. — Львів : Світ, 2015. — 224 с.
14. Мельник В. М. Надійність і діагностика технічних систем. — Київ : КНУБА, 2018. — 276 с.
15. Кравченко О. П. Експлуатація машин і обладнання. — Харків : Факт, 2017. — 240 с.
16. ISO 14253-1:2017. Geometrical product specifications (GPS). — Geneva : ISO, 2017.
17. ISO 5725-1:1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. — Geneva : ISO.
18. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. — New York : Wiley, 2019. — 768 p.
19. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). — Geneva, 2008.
20. Bentley J. P. Principles of Measurement Systems. — London : Pearson, 2016. — 432 p.
21. Webster J. G. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. — Boca Raton : CRC Press, 2014. — 1752 p.
22. Figliola R., Beasley D. Theory and Design for Mechanical Measurements. — New York : Wiley, 2018. — 640 p.
23. Popovic D. Digital Measurement Systems. — London : Springer, 2015. — 356 p.
24. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. — New York : Springer, 2016. — 758 p.
25. Holman J. P. Experimental Methods for Engineers. — New York : McGraw-Hill, 2017. — 528 p.
26. Бондаренко В. О. Автоматизовані системи збору та обробки даних. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2019. — 212 с.

27. Пилипенко М. І. Інформаційні технології в метрології. — Харків : ХНЕУ, 2020. — 196 с.
28. Кравець О. В. Методи підвищення точності вимірювань. — Одеса : ОНПУ, 2018. — 184 с.
29. ISO 55000:2014. Asset management — Overview, principles and terminology. — Geneva : ISO.
30. ISO 13374:2012. Condition monitoring and diagnostics of machines. — Geneva : ISO.
31. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин. Електрообладнання машин. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
32. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
33. Куц В. І. Основи технічного сервісу. — Київ : Аграрна освіта, 2016. — 288 с.
34. Грабовський А. М. Організація технічного обслуговування машин. — Львів : Каменярь, 2017. — 240 с.
35. ДСТУ 3215-95. Метрологія. Терміни та визначення. — Київ : Держстандарт України, 1996.
36. ISO/TR 10017:2003. Guidance on statistical techniques. — Geneva : ISO.
37. IEC 61508:2010. Functional safety of electrical systems. — Geneva : IEC.
38. Скиба Ю. А. Експлуатаційна надійність машин. — Київ : НТУ, 2018. — 264 с.
39. Шаповалов В. В. Контроль технічного стану машин. — Харків : ХПІ, 2019. — 212 с.
40. Кулик О. С. Технічна експлуатація обладнання. — Київ : КНУТД, 2020. — 198 с.

41. ISO 25178:2012. Geometrical product specifications. — Geneva : ISO.
42. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною праці. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
43. Boyes W. Instrumentation Reference Book. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015.
44. Bosch R. Automotive Handbook. — Stuttgart : Bosch, 2018. — 1128 p.
45. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Processes for Engineering Materials. — London : Pearson, 2017.
46. ISO 9004:2018. Quality management — Quality of an organization. — Geneva : ISO.
47. Juran J. M. Juran's Quality Handbook. — New York : McGraw-Hill, 2016.
48. Pyzdek T. The Six Sigma Handbook. — New York : McGraw-Hill, 2018.
49. ДСТУ ISO/IEC 17020:2014. Вимоги до органів інспектування. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
50. ДСТУ ISO 31000:2018. Управління ризиками. Принципи та настанови. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.