

# ВІДГУК

офіційного опонента

професора кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування  
доктора технічних наук, доцента **Рудика Андрія Вікторовича**  
на дисертаційну роботу **Передерка Анатолія Леонтійовича** „Розвиток методології вібровипробувань та удосконалення засобів вимірювань вібрації об'єктів складної техніки”, яку подано на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

## ***1. Актуальність теми дисертаційної роботи***

Сучасними напрямками теоретичних та експериментальних досліджень в галузі віброметрії є вимірювання та аналіз вібраційних параметрів, вібраційні випробування, зниження рівня динамічних впливів на елементи машин при ударах, забезпечення надійної роботи при комплексних динамічних навантаженнях на робочі органи машин і обладнання та ін.

Вдосконалення методів та засобів вимірювання і реєстрації параметрів механічної вібрації, вібродіагностування та вібровипробувань в технічних системах є важливою проблемою, розв'язання якої забезпечує покращення якості та підвищення надійності продукції галузі приладобудування.

Актуальністю дисертаційної роботи є подальший розвиток теорії методів та принципів побудови засобів вимірювання, аналізу та вібраційної діагностики і відтворення параметрів вібраційних сигналів при вібраційних випробуваннях на базі останніх досягнень електронної та обчислювальної техніки і впровадження нових методів й алгоритмів оброблення вимірювальної інформації.

## ***2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень дисертаційної роботи.***

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки та рекомендації ґрунтуються на результатах моделювання реальних фізичних процесів, які відбуваються при взаємодії засобу вимірювання з об'єктом контролю. Ці положення, висновки та рекомендації є новими і достатньо обґрунтованими.

Дисертація Передерка А.Л. має логічну структуру та зміст. Задачі досліджень, методи розв'язання цих задач, наукові положення дисертації,

висновки та рекомендації чітко та послідовно сформульовані.

Достовірність результатів досліджень:

– забезпечується строгістю постановки задачі досліджень, коректністю використаних методів і підходів при доведенні основних наукових положень і результатів;

– підтверджена використанням математичного апарату, який відповідає змісту та задачам дисертаційної роботи;

– ґрунтується на фундаментальних положеннях теорії вимірювань, теорії ймовірностей та математичної статистики, методах оброблення і фільтрації сигналів, а також методах аналізу результатів експерименту.

Оброблення результатів експериментальних досліджень проведено з використанням сучасного програмного забезпечення.

Аналіз висновків по розділах і загальних висновків до роботи показав, що вони в цілому відповідають отриманим науковим і практичним результатам.

Достовірність результатів дисертаційної роботи також підтверджується малими значеннями розбіжностей між результатами теоретичних розрахунків, чисельного моделювання та експериментальних досліджень.

### ***3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами***

Дисертаційна робота виконана на кафедрі стандартизації, оцінки відповідності та освітніх вимірювань Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку, відповідно до Закону України № 3715-VI "Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні", зокрема, за напрямом "Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки", а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі Одеської державної академії технічного регулювання та якості за темою: «Біомеханіка зубощелепної системи, верхніх та нижніх кінцівок: математичне моделювання та практичні рекомендації» (№ держреєстрації 0119U002007).

### ***4. Аналіз публікацій за темою дисертації***

За результатами дисертаційної роботи опубліковано 29 друкованих праць, в тому числі одна монографія, одна колективна монографія, 20 статей у наукових фахових виданнях, а також 7 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

В цих публікаціях з достатньою повнотою викладені матеріали усіх розділів дисертаційної роботи, а самі публікації відомі фахівцям галузі.

В авторефераті стисло викладена сутність усіх розділів дисертаційної роботи. Його зміст дає можливість простежити за ходом досліджень, встановити суть використаних методів і значення отриманих результатів.

### ***5. Наукова новизна положень, сформульованих у дисертаційній роботі***

5.1. Встановлені математичні залежності параметрів та характеристик п'єзоелектричних акселерометрів від впливу ударних імпульсів при проведенні динамічних випробувань:

- обґрунтовано необхідність застосування фільтрів нижніх частот для придушення спектральних складових з частотного діапазону резонансу;
- за результатами моделювання отримано математичні залежності параметрів вихідного сигналу п'єзоакселерометра при дії ударного прискорення та його встановленні на в'язкопружну прокладку.

5.2. Проведено математичне моделювання датчиків з п'єзоелектричними перетворювачами для вимірювання вібраційних параметрів:

- розроблено математичну модель фазових спотворень при вимірюванні вібраційного прискорення датчиками з п'єзоелектричними перетворювачами;
- розроблено математичну модель складових похибки п'єзоелектричного акселерометра та проведено їх аналіз;
- визначено залежність генерованого п'єзоелементом заряду від зовнішнього температурного впливу.

5.3. Розроблено методику розрахунку та відтворення ударного спектру при дії на обладнання імпульсних вібраційних прискорень, в основі якої лежать співвідношення для обчислення ударного спектру осцилятора.

5.4. Проведено моделювання фільтрації вібраційного сигналу від шумових завад за допомогою вейвлет перетворення, проведено дослідження розподілу піків вібраційного сигналу як критерія аналізу випадкового вібраційного сигналу для підвищення достовірності та глибини діагностування.

5.5. Розроблені методика розрахунку гідравлічної системи, схема побудови та макет гідравлічного вібраційного стенду з покращеними метрологічними характеристиками.

### ***6. Мета досліджень відповідає актуальності.***

Метою дисертаційної роботи є розв'язання важливої науково-технічної проблеми створення наукових основ розроблення та вдосконалення методів і засобів з покращеними метрологічними характеристиками для вимірювання, реєстрації та аналізу вібраційних параметрів при проведенні вібраційного

діагностування та вібраційних випробувань.

## **7. Практичне значення результатів дисертації**

7.1. Отримано рекомендації щодо будови структури вимірювального тракту систем вібраційного діагностування, забезпечення його захищеності від завад та умови коректного аналізу спектру при проведенні вібраційного діагностування.

7.2. Сформульовано рекомендації щодо оцінки параметрів сигналу вібраційного прискорення, вибору частоти дискретизації і розрядності АЦП, а також практичної реалізації АЦП з передискретизацією.

7.3. Розроблено новий метод забезпечення надійності та точності динамічних вимірювань, який використовується при розробленні вимірювальних перетворювачів та систем для проведення ударних випробувань.

7.4. Розроблено структурну схему автономного реєстратора ударних сигналів, що забезпечує підвищену надійність реєстрації в широкому діапазоні температур і жорстких механічних впливів в процесі проведення вібраційних випробувань.

7.5. Запропоновано при створенні реєстраторів вібраційних сигналів використовувати АЦП сигма-дельта перетворення для розширення динамічного діапазону за рахунок зменшення впливу шуму квантування.

7.6. Розроблена обчислювальна методика для розв'язання завдання фільтрації за допомогою вейвлет перетворення (зменшення рівня шумів) стосовно просторово-часових даних при обробленні вібраційного сигналу.

7.7. Розроблені схема та макет гідравлічного вібростенду з системою керування, в якому використовуються п'єзоелектричні клапани, що дозволяє розробляти приводи для адаптивних оптичних систем, прецизійних систем управління і віброзахисту, а також в інших мехатронних системах.

Теоретичні та експериментальні дослідження, проведені автором роботи, впроваджено на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» (акт впровадження від 07.04.2021 р.), на підприємстві ТОВ «АРАМІС» (акт впровадження від 10.12.2020 р.) та у навчальний процес в Одеській державній академії технічного регулювання та якості (акт впровадження від 06.10.2020 р.).

## **8. Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку літературних джерел та додатків.

У вступі до дисертації відповідно до вимог МОН України обґрунтовано

актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи, головні завдання дослідження та основні положення, що виносяться на захист, наукову новизну та практичне значення результатів дисертації. Наведено основні наукові та практичні результати, отримані у дисертації, зв'язок роботи з науковими програмами. Визначено структуру та обсяг дисертації. Для досягнення поставленої мети здобувачем визначено конкретні задачі, розв'язок яких послідовно викладено у відповідних розділах дисертаційної роботи. Також представлено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію, публікації за темою роботи та впровадження результатів дослідження.

*У першому розділі* дисертаційної роботи наведено аналіз сучасних методів і засобів для забезпечення динамічних випробувань і вібродіагностування машин і устаткування. Розглянуто спектральні методи аналізу вібраційних коливань і апаратні засоби для проведення вимірювань при вібродіагностуванні машин і устаткування. Виконано огляд та аналіз різних за фізичними принципами роботи первинних вимірювальних перетворювачів для забезпечення оцінки параметрів вібрації і проведений аналіз перспектив їх подальшого розвитку.

*У другому розділі* здійснено математичне моделювання датчиків з п'єзоелектричними перетворювачами для вимірювання вібраційних параметрів в пакеті MathCad. Проведено дослідження їх амплітудно-частотних, фазочастотних та часових характеристик.

Отримана математична модель фазових спотворень при вимірюванні вібраційного прискорення датчиками з п'єзоелектричними перетворювачами.

Розглянута модель складових похибки п'єзоелектричного акселерометра, проведено їх аналіз, визначені їх склад і структура, проаналізовано похибки, викликані неортогональністю осей чутливості і температурним впливом на чутливий елемент. Доведено, що на величину заряду, який виникає на електродах п'єзоелемента, може впливати температурна зміна п'єзомодуля, яка виникає під дією зовнішнього температурного впливу.

*У третьому розділі* розглянуто та проаналізовано вплив ударних імпульсів на п'єзоелектричні акселерометри як найбільш вразливе коло у вимірювальному каналі при проведенні динамічних випробувань. Обґрунтовано необхідність застосування фільтрів нижніх частот для виключення частотного діапазону резонансу з області вимірювання, а також необхідність застосовувати механічні низькочастотні фільтри (в'язкопружні елементи), розташовані між об'єктом контролю і датчиком при розв'язанні питання збереження цілісності останнього. Отримано математичну модель вихідного сигналу п'єзоакселерометра при дії

ударного прискорення та його установці на в'язкопружну прокладку.

Запропоновано алгоритми для забезпечення динамічного діапазону автономних реєстраторів при вимірюванні ударних сигналів. Доведено, що застосування алгоритмів високочастотної фільтрації і подальшого відновлення сигналу дозволяє зменшити ймовірність перевантаження вимірювального каналу автономного реєстратора, що приводить до збільшення його практичного динамічного діапазону.

У *четвертому розділі* розроблено методику розрахунку та відтворення ударного спектру при дії на обладнання імпульсного вібраційного прискорення, в основі чого лежать співвідношення для обчислення ударного спектру осцилятора. Процедура розрахунку ударного спектру осцилятора при визначених добротності і вібраційному прискоренню представлена алгоритмом. Проведено моделювання відгуку системи на ударний імпульс в пакетах MathCad та MatLab.

Проведено моделювання фільтрації вібраційного сигналу від шумових завад за допомогою вейвлет перетворення та моделювання і симуляцію роботи ланок вимірювального каналу автономного реєстратора вібраційних сигналів.

У *п'ятому розділі* дисертаційної роботи проведено теоретичні розрахунки та розроблено схему і макет гідравлічного вібростенду з системою керування, в якій застосовані п'єзоелектричні приводи, що дало змогу підняти верхню межу відтворюваного частотного діапазону вібраційних коливань.

Проведено теоретичні розрахунки гідравлічної системи, розроблено схему побудови та макет електрогідравлічного вібраційного стенду, отримані експериментальні дані, які підтверджують перспективність даного напрямку досліджень.

В кінці кожного розділу наведений *список першоджерел*, на які є посилання в роботі, а завершують роботу *загальні висновки та додатки*.

Зміст дисертаційної роботи, стиль та мова викладення, а також якість тексту та ілюстрацій відповідають вимогам ДАК МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

### **9. Рекомендації щодо використання результатів роботи**

Напрями теоретичних і практичних досліджень дисертаційної роботи доцільно розвивати та використовувати у галузі автоматизації та приладобудування. Зокрема, ці результати будуть корисними при проектуванні і застосуванні приладових систем вимірювання параметрів вібрацій.

Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено у навчальний процес

в Одеській державній академії технічного регулювання та якості, що підтверджено відповідним актом про впровадження.

Отримані аналітичні залежності та схемотехнічні рішення можуть бути використані в навчальному процесі вищих навчальних закладів, які готують фахівців за спеціальностями 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

### ***10. Зауваження по дисертаційній роботі***

1. В огляді літературних джерел (розділ 1) тільки третина з 45 джерел опубліковані після 2000 року, а літературні джерела за останні 3 роки відсутні. Не виділена постановка наукової проблеми.

2. В розділі 2, присвяченому математичним моделям та аналізу похибок п'єзоелектричних акселерометрів, представлена загальновідома модель, що описується диференціальним рівнянням другого порядку, однак не наведена числова оцінка параметрів математичної моделі акселерометра та складових його похибки. Чи враховано ефект накопичення випадкової похибки акселерометра з часом при оцінці віброшвидкості та вібропереміщення?

3. Чому в п. 3.3.1 (стор. 126) випробування проводилися тільки на частотах до 5 кГц, де АЧХ є практично рівномірною?

4. При оцінці невизначеностей результату вимірювання (стор. 128) автор подає їх у відносних одиницях, хоча відповідно до представленого алгоритму їх оцінки вони мають бути розмірними величинами. Варто було б навести значення стандартного відхилення та кількість потраплянь результатів вимірювань в інтервали  $\bar{E} \pm k\sigma_E$ .

5. Не зрозуміло, як схема підсилювача заряду (рис. 3.23) забезпечує підсилення 5 дБ на частоті 10 МГц (рис. 3.24), на якій конденсатори 1100 пФ мають опори 14.5 Ом, що є практично коротким замиканням відносно резисторів з опорами більше 1 МОм.

6. З тексту дисертаційної роботи не зрозуміло, яку корисну практичну інформацію можна отримати з аналізу кількості екстремумів випадкового вібраційного сигналу (рис. 4.16).

7. Чому в підрозділі 5.2, присвяченому розрахунку гідравлічної системи вібростенду, не представлено оцінки або числового розрахунку жодного з геометричних, кінематичних або гідравлічних параметрів системи?

8. Чи проводилася оптимізація параметрів ПД-регулятора (рис. 5.8)? Якщо так, то за яким критерієм і з використанням якого математичного апарату або

програмного забезпечення?

Вказані зауваження суттєво не знижують загальної позитивної оцінки роботи. Зауважень до автореферату немає.

### **11. Висновок**

Дисертація Передерка Анатолія Леонтійовича «Розвиток методології вібровипробувань та удосконалення засобів вимірювань вібрації об'єктів складної техніки» є завершеною науковою роботою, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу проблему і мають суттєве значення для розв'язання широкого кола прикладних задач у виробництві та наукових дослідженнях.

Вважаю, що дисертаційна робота за своєю актуальністю, науковим рівнем, важливістю одержаних наукових результатів і за практичною цінністю відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р. «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів» та паспорту спеціальності 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин, а її автор, Передерко Анатолій Леонтійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин.

Офіційний опонент,  
професор кафедри автоматизації, електротехнічних  
та комп'ютерно-інтегрованих технологій  
Національного університету водного  
господарства та природокористування,  
доктор технічних наук, доцент

Рудик А.В.

Підпис Рудика А.В.  
Учений секретар



Поглебовський А.А.