

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-13>

УДК 004.9

БОДНАРУК ВАСИЛЬ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0009-0008-4418-2359>e-mail: vasylbodnaruk@gmail.com**МЕЛЬНИЧУК СТЕПАН**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-6973-4235>e-mail: stenni@ukr.net**ПОСЛАБЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ ЗУМОВЛЕНИХ ВІДХИЛЕННЯМИ ВІД ГОРИЗОНТАЛІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ГЕФОНОГО ТИПУ**

У статті розглянуто особливості формування вимірювальних сигналів у геофонних перетворювачах та вплив відхилення сенсора від горизонталі на їх енергетичні характеристики. Актуальність роботи зумовлена широким застатком перетворювачів у системах моніторингу низькочастотних вібрацій, де точність визначення параметрів сигналу значно залежить від правильності монтажу датчика. Дослідження проведені на основі сенсора SM-24, описано його механічні та електричні параметри. Проведено експерименти які передбачали реєстрацію та запис сигналів і шумів при різних кутах нахилу геофона.

На першому етапі опрацювання експериментальних сигналів проведено їх центрування та масштабування, вилучення постійної складової та переведення цифрових відліків у фізичні величини. Наведені статистичні характеристики сигналів - середнє, мода, медіана, дисперсія та СКВ, що дозволило встановити наявність тенденції до зростання нестабільності сигналу зі збільшенням кута нахилу. Це вказує на те, що положення сенсора суттєво впливає на якість вимірювання. Крім того за результатами дослідження показано, що при кутах $0 - 30^\circ$ енергетичні характеристики залишаються відносно стабільними, однак у діапазоні $60 - 90^\circ$ енергія сигналів різко зростає, що пов'язано зі зміною ефективної жорсткості та поведінки пружинно-маятникової системи самого сенсора. Для аналітичного опису залежності енергії від кута нахилу застосовано лінійну, експонентну та поліноміальну регресійні моделі. Порівняння точності моделей показало, що найкращу адекватність демонструє поліноміальна регресія третього порядку, яка характеризується найкращими значеннями коефіцієнта детермінації R^2 як для сигналів, так і для шумів. Також проаналізовано відношення E_s/E_n - критерій, що характеризує можливість виділення сигналу на фоні шумів. Незважаючи на нелінійний характер зміни цього параметра, встановлено, що для всіх кутів нахилу енергія сигналу суттєво перевищує енергію шумів, що забезпечує можливість надійного виділення корисної інформації. Отже, хоч геофон ний перетворювач зберігає здатність реєструвати корисний сигнал навіть при значних нахилах, оптимальна робота сенсора досягається за умов близьких до вертикального положення. Отримані результати мають практичне значення для розробки систем моніторингу, оскільки дозволяють моделювати вплив положення сенсора на точність вимірювань та оптимізувати процес інсталяції таких перетворювачів.

Ключові слова: цифрове опрацювання сигналів, геофон, спотворення сигналів

BODNARUK VASYL, MELNYCHUK STEPAN

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ATTENUATION OF THE ENERGY OF MEASUREMENT SIGNALS CAUSED BY DEVIATIONS FROM THE HORIZONTAL OF A GEOPHONE-TYPE TRANSDUCER

The article examines the features of measuring-signal formation in geophone transducers and the influence of sensor deviation from the horizontal position on their energy characteristics. The relevance of the study is driven by the wide use of such transducers in low-frequency vibration monitoring systems, where the accuracy of signal parameter estimation strongly depends on proper sensor installation. The research is based on the SM-24 sensor, whose mechanical and electrical parameters are described. Experiments were conducted involving the registration and recording of signals and noise at different geophone tilt angles.

At the first stage of processing the experimental signals, centering and scaling were performed, along with the removal of the DC component and the conversion of digital readings into physical quantities. Statistical characteristics of the signals - mean, mode, median, variance, and standard deviation - are presented, which made it possible to identify a clear tendency toward increasing signal instability with increasing tilt angle. This indicates that the sensor's orientation has a significant impact on measurement quality. Furthermore, the study shows that at tilt angles of $0 - 30^\circ$, the energy characteristics remain relatively stable, while in the range of $60 - 90^\circ$, the signal energy increases sharply. This effect is associated with changes in the effective stiffness and the behavior of the sensor's spring-mass system. To analytically describe the dependence of signal energy on the tilt angle, linear, exponential, and polynomial regression models were applied. A comparison of the model accuracies revealed that third-order polynomial regression provides the best fit, showing the highest coefficient of determination (R^2) for both signals and noise. The ratio E_s/E_n - a criterion reflecting the ability to distinguish the signal from background noise - was also analyzed. Despite the nonlinear behavior of this parameter, it was established that for all tilt angles, signal energy significantly exceeds noise energy, ensuring reliable extraction of useful information. Therefore, although the geophone transducer retains its ability to register meaningful signals even at considerable tilt angles, optimal sensor performance is achieved when it is positioned as close to the vertical orientation as possible. The obtained results have practical significance for the development of monitoring systems, as they allow modeling the influence of sensor orientation on measurement accuracy and optimizing installation procedures for such transducers.

Keywords: digital signal processing, geophone, signal distortion, attenuation

Стаття надійшла до редакції / Received 14.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Боднарук Василь, Мельничук Степан

Вступ

При вирішенні практичних задач у сфері комп'ютерних систем моніторингу, контролю, вимірювання, а також керування одним із ключових етапів є аналіз і опрацювання сигналів, фізична природа яких зводиться

до електричної після ряду перетворень. Первинні перетворювачі неелектричних (зокрема механічних, теплових, акустичних тощо) величин реалізують формування електричних сигналів, параметри яких (амплітуда, частота, спектр, імовірнісні оцінки тощо) є пропорційні до відповідних змін вимірюваної величини. Як частковий випадок, досліджувались первинні перетворювачі, у яких первинним вимірюваним параметром є зміна стану механічних коливань тіла або системи тіл, так звані вібраційні сенсори. Такі датчики є ключовими інструментами при реалізації інформаційно-вимірвальних каналів комп'ютерних систем моніторингу та дослідженні коливальних процесів у різних середовищах. Геофони перетворюють механічні коливання на електричні сигнали, що дозволяє отримувати інформацію про амплітуду, частоту і напрямок вібрацій, що поширюються контрольованим середовищем.

Залежно від застосованого механізму перетворення виділяють кілька типів вібраційних датчиків, серед яких найбільш поширені п'єзоелектричні, оптичні та вихрострумові. Кожен із цих типів характеризується своїми перевагами та обмеженнями щодо точності, чутливості та придатності до експлуатації в певних умовах.

Геофони, що є окремим типом вібраційних датчиків, відзначаються особливою ефективністю у виявленні сейсмічних хвиль і вібрацій поверхонь. На відміну від п'єзоелектричних та оптичних перетворювачів, геофони використовують електромагнітний принцип перетворення. Типовий геофон складається з нерухокої котушки індуктивності (намотка тонким мідним дротом) і підвішеним на пружинах магніту (мірний елемент), який може переміщуватися під впливом коливань.

Коли поверхня чи об'єкт, до якого прикріплено геофон, починає вібрувати, магніт переміщується відносно котушки. Такі переміщення викликають зміну магнітного потоку в котушці, що, згідно з законом електромагнітної індукції, приводить до генерування електричного струму. Амплітуда і частота такого струму пропорційні до інтенсивності та частоті механічних коливань поверхні, що дозволяє визначати їх характеристики. Структура і принцип функціонування геофона подано на рис. 1.

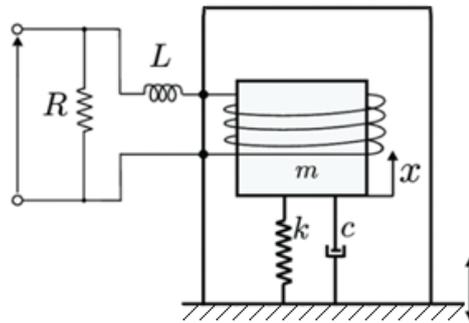


Рис. 1. Типова структура вібраційного сенсора низькочастотних коливань геофона

Мірний елемент – магніт (найчастіше неодимовий), виконує функцію сейсмічної маси m , навколо якої переміщується котушка (яка контактує з контрольованою поверхнею через корпус датчика), навантажена опором R . Незалежними змінними системи є x і q , а рівняння системи для механічної частини та електричної представлені у формулах відповідно:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{w}) + k(x - w) + T\dot{q} = 0$$

$$L\ddot{q} - T(\dot{x} - \dot{w}) + R\dot{q} = 0.$$

де L - це індуктивність котушки;

m - маса мірного елемента (сейсмічна маса);

x - переміщення мірного елемента в котушці (змінна координата сейсмічної маси);

\dot{x} - швидкість переміщення сейсмічної маси (перша похідна координати x за часом);

\ddot{x} - прискорення сейсмічної маси (друга похідна координати x за часом);

w - переміщення основи (наприклад, вібраційна основа або зовнішній вплив);

\dot{w} - швидкість переміщення основи;

c - коефіцієнт демпфування системи (в'язке тертя між масою і основою);

k - коефіцієнт жорсткості пружини, що з'єднує масу із основою;

q - заряд у котушці, створений під час руху сейсмічної маси;

\dot{q} - швидкість зміни заряду (тобто електричний струм);

$(\dot{x} - \dot{w})$ - відносна швидкість переміщення маси щодо основи (вібраційного середовища);

R - опір електричної котушки;

$T = 2\pi n\mu_0 B$ - константа котушки, що виражається в Тесла-метрах (Тл·м) або вольтгах на метр за секунду (В/(м/с)) (визначає чутливість котушки до зміни магнітного потоку і залежить від таких параметрів, як кількість витків n , радіус котушки r і магнітна індукція B) [1].

Важливою особливістю згаданих первинних перетворювачів те, що вони можуть контролювати лише частоти, що перевищують їх власну частоту (в залежності від моделі може бути 2,4...10 Гц. тощо), аж до заданої "spurious" – частоти (орієнтовно це частоти порядку 250 Гц). Геофони є одними з найпоширеніших перетворювачів, які використовуються для моніторингу низькочастотних вібрацій спричинених рухом транспорту, будівельних робіт, в геофізиці для виявлення рухів поверхні та сейсмічних хвиль.

Інформаційно-вимірювальний канал, що використано для експериментального дослідження вібраційних сигналів і впливу нахилу на якість та інформативність таких сигналів реалізовано на основі геофону SM-24/H-B 10 Hz 375Ω, що має такі технічні характеристики:

- власна частота (f_n): 10 Гц;
- допустиме відхилення: $\pm 2,5\%$;
- типова "sprigious" – частота: понад 240 Гц;
- спотворення при швидкості руху від котушки до корпусу $0,7$ дюйма/с $< 0,15\%$;
- частота вимірювання спотворень: 12 Гц;
- типове демпфірування в розімкненому контурі: 0,25;
- демпферний калібрувальний-шунтовий опір: $1,339\Omega$;
- демпфірування з калібрувальним шунтом: 0,6;
- допустиме відхилення з калібрувальним шунтом $+5\%$, -0% ;
- опір котушки індуктивності: 375Ω та допустиме відхилення опору: $\pm 2,5\%$;
- чутливість: $28,8$ В/м/с з відхиленням $\pm 2,5\%$;
- рухома маса: 11 г;
- $R_c B_c f_n$: $6000 \Omega\text{Hz}$;
- максимальний хід котушки: 2 мм.

Щодо фізичних характеристик, то слід зазначити, що діаметр геофону 25,4 мм, висота - 32 мм, вага складає 74 г, робоча температура від -40°C до $+100^\circ\text{C}$. Конструкція SM-24 забезпечує низький рівень власних шумів та високу чутливість до низькочастотних коливань, що дозволяє реєструвати навіть слабкі геосигнали. Завдяки своїм технічним характеристикам, SM-24 широко використовується в дослідженнях поверхневих хвиль, моніторингу сейсмічної активності тощо.

Доцільно зазначити, що конструктивно сенсори типу SM-24 реалізуються на основі пружинно-маятникової схеми (див.рис.1, у якій котушка рухається відносно магніту під дією коливань контрольованої поверхні, що зумовлює суттєву залежність чутливості такого пристрою до рухів уздовж своєї осі чутливості (зазвичай вертикальної). Фактично перетворювач геоколивань реєструє проекцію руху контрольованої поверхні саме на цю вісь. Тобто, якщо хвиля переміщується вертикально вгору-вниз, амплітуда сигналу буде максимальною за умов ідеально вертикального монтажу перетворювача. Якщо ж вертикальність монтажу не забезпечується то сенсор починає частково реагувати на горизонтальні коливання, що зумовлює послаблення амплітуди, а також спотворення форми сигналу. Також, слід зазначити, наявність власних шумів, які виникають через фізичні обмеження їхньої конструкції: теплові флуктуації в котушці, механічні резонанси рухомої маси (пружини та маса мірного елемента мають власні резонансні частоти, що проявляється як низькочастотний фон у сигналі) та електронні шуми підсилювачів.

Крім того, власна частота геофону розрахована для роботи у вертикальному положенні, за наявності нахилу буде змінюватись ефективна жорсткість пружинно-маятникової схеми, що може привести до зміщення робочої частоти. Узагальнюючи технічні характеристики доступних геосенсорів із супровідної документації, зокрема SM-6, SM-24, SG10, SG20DX, PS-4.5B1 тощо, можна зробити висновок, що при відхиленні від вертикалі на кут α амплітуда сигналу буде зменшуватись пропорційно до $\cos(\alpha)$, зокрема при $\alpha \approx 10^\circ$ амплітуда зменшиться на $\approx 1.5\%$. З врахуванням того, що чутливість геофонних перетворювачів подається із похибкою $\pm 2,5\%$, можна припустити, що зменшення амплітуди сигналу за незначних відхилень від вертикалі ($\alpha < 10^\circ$) залишатиметься в межах означеної похибки пристрою.

Однак, наявність індуктивного елемента L з паралельно підключеним опором R в конструкції геофонного перетворювача фактично створює коливальний контур і, як наслідок, зумовлює нелінійні спотворення вихідного сигналу. В такій ситуації актуальним завданням є проведення досліджень особливостей формування геосигналів в таких сенсорах, зокрема при аналізі хвильових полів (які поширюються контрольованими поверхнями), де важлива роздільність як по-вертикальних так і по-горизонталі.

Вплив відхилення від вертикалі перетворювача геофонного типу на статистичні та енергетичні характеристики вихідних сигналів

Проведені натурні експерименти спрямовані на дослідження залежності енергетичних та статистичних характеристик сигналів інформаційно-вимірювального каналу (реалізованого на базі геофону SM-24) зумовлених відхиленням від горизонталі чутливого елемента перетворювача. При проведенні експериментів використано систему кріплення для фіксації датчика до вертикальної опори, а також розроблено відповідні програмні рішення, що дозволяють зчитувати, оцифровувати та передавати амплітуду сигналу з геосенсора для подальшого опрацювання через UART. Вимірювання проводились для відхилень первинного перетворювача від горизонталі з фіксованим кроком 15° , для діапазону від 0° до 90° , окремі приклади подано на рис.1.

Наступним етапом дослідження є опрацювання отриманих експериментальних даних. Оскільки АЦП перетворює амплітуду сигналу в діапазоні від 0 до 5 В, в той час як апертура сигналу складає від $-2,5$ до $2,5$ В, то для узгодження рівнів перед АЦП до сигналу додається постійна складова (напруга $2,5$ В, яка дає зміщення на половину шкали АЦП). В такій ситуації виникає необхідність вилучення постійної складової дискретизованого сигналу як неінформативної, що здійснюється через операцію центрування. Центрування сигналу передбачає, що від кожного значення його амплітуди віднімається значення постійної складової, що може бути розраховане як середнє на інтервалі спостереження.



Рис. 1. Інформаційно-вимірвальний канал на основі сенсора SM-24 при різних величинах відхилу від горизонталі

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i - A_0$$

де A_0 – постійна складова сигналу, може розраховуватись як середнє на інтервалі спостереження,
 s_i – значення амплітуд сигналу (у відліках АЦП - smpl),
 n – кількість відліків на інтервалі спостереження.

Для виділення основної закономірності з експериментальних даних було проведено усереднення сигналів, використовуючи такі підходи як арифметичного усереднення для згладжування випадкових шумів і медіанного усереднення для зменшення впливу одиничних аномальних значень.

Усереднені результати постійної складової сигналів сенсора SM-24 (за наявності та відсутності коливань поверхні, які формують досліджувані сигнали), отриманих на основі проведених експериментальних досліджень подано в табл.1.

Таблиця 1

Значення постійної складової A_0 оцифрованих сигналів сенсора у відліках АЦП (smpl) при різних величинах кута відхилу

Кут, °	0	15	30	45	60	75	90
A_0 середнє	125,25	123,5	123,75	126,25	127,25	126,5	127,5
A_0 округлене	125	124	124	126	127	127	128

Як можна побачити, отримані значення постійної складової коливаються в околі середнього значення 126, що фактично відповідає зміщенню на половину шкали АЦП. Флуктуація, в межах ± 2 відліки, що складає $\approx 0,002\%$, є незначним відхиленням, яке можна пояснити нестабільністю функціональних характеристик використаного го сенсора.

Для подальшого дослідження, після проведення процедури центрування сигналів, створити набори вхідних даних у вигляді файлів-контейнерів, які забезпечують впорядковану структуру для зберігання та аналізу отриманих результатів. Кожен файл "Signal" містить фрагменти сигналу, що відповідають коливанням досліджуваної поверхні (як результат механічного впливу з фіксованими параметрами) у межах одного експерименту. Крім того, для порівняльного аналізу, сформовано файли шумів "Noise" (за відсутності механічного впливу на досліджувану поверхню) розмір яких відповідає розміру відповідних файлу "Signal" для відповідного положення перетворювача.

Така структура забезпечує можливість зручного аналізу сигналів залежно від кута нахилу датчика та окремих експериментальних серій.

Формування файл-контейнерів здійснено для кожного вище згаданих положення датчика, зокрема для кутів нахилу 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° та 90°, і кожного проведеного експерименту. Амплітудні реалізації сигналів у відліках АЦП (smpl), зумовлених коливаннями контрольованої поверхні (як результат механічного впливу з фіксованими параметрами) для відповідних відхилень геофонного перетворювача від горизонталі подано на рис.2. Як можна побачити, за однотипних коливань поверхні, зі збільшенням величини відхилення амплітуда сигналів змінюється нелінійно.

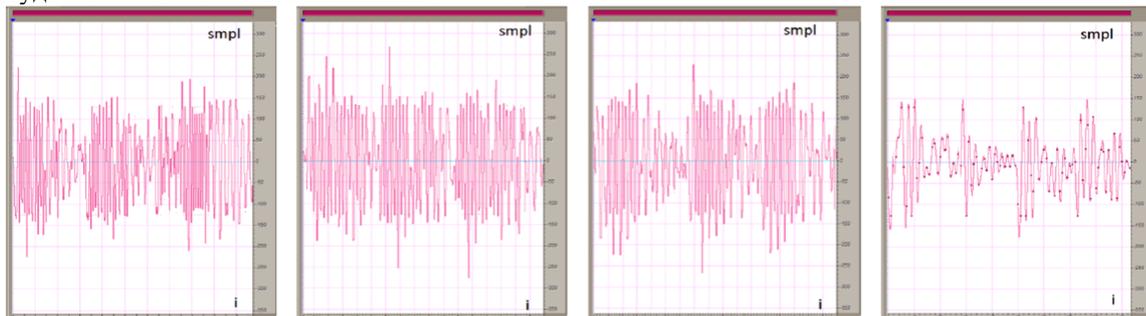


Рис. 2. Амплітудні реалізації сигналів smpl (відліки АЦП) інформаційно-вимірвального каналу на основі сенсора SM-24 при різних величинах відхилу від горизонталі

Оскільки вихідні дані представлені у вигляді цифрових відліків (smpl), які відповідають відносним рівням напруги в межах заданого діапазону, то для розрахунку статистичних характеристик здійснено масштабування smpl у фізичні одиниці напруги вольти (з врахуванням розрядності АЦП і апертури напруг сигналів).

Слід зазначити, що статистичне дослідження, дозволяє виявляти закономірності та структурні зв'язки у даних, забезпечує отримання числових характеристик вибірки. Такі показники поділяються на характеристики центральної тенденції, зокрема: середнє арифметичне, медіана, мода, які відображають типове значення параметру, а також величину розсіяння, зокрема: дисперсія, стандартне відхилення (СКВ), що характеризують ступінь варіативності даних в околі центральної тенденції. Результати статистичного дослідження, попередньо збережених у файлах-контейнерах "Signal" та "Noise" з фрагментами сигналів та шумів відповідно, експериментальних сигналів сенсора подано в табл.2.

Таблиця 2

Усереднені значення статистичних характеристик сигналів та шумів сенсора SM-24 при різних величинах кута відхилення

Стат. х-ка \ Кут, °		0	15	30	45	60	75	90
Середнє	сигнал	-0,1858	-0,4321	-0,2720	-0,0541	-0,0008	0,0058	-0,0119
	шум	0,0026	0,0657	0,0402	-0,0093	-0,0066	0,0128	0,0074
Медіана	сигнал	-0,1842	-0,5118	-0,2353	-0,0902	0,0177	0,0196	-0,0353
	шум	0,0020	0,0765	0,0392	0,0000	-0,0020	0,0000	0,0157
Мода	сигнал	-0,4745	-0,4902	-0,0510	-0,4941	0,1412	0,3529	-0,0980
	шум	-0,0078	-0,0196	0,0392	-0,0864	0,0941	0,0000	-0,0392
Дисперсія	сигнал	0,2608	0,6064	0,3356	0,6014	0,6843	0,9425	0,8553
	шум	0,0007	0,0082	0,0012	0,0062	0,0978	0,1228	0,1978
СКВ	сигнал	0,5107	0,7787	0,5793	0,7755	0,8272	0,9708	0,9248
	шум	0,0265	0,0906	0,0346	0,0787	0,3127	0,3127	0,4447

З огляду на отримані результати можна зробити висновок, що оцінки дисперсії та середньоквадратичного відхилення сигналів мають однозначну тенденцію до збільшення зі зростанням кута нахилу датчика від горизонталі. Тобто, при більших кутах значення сигналу варіюються в ширшому діапазоні, що вказує на зростання його нестабільності. Хоча між експериментами спостерігаються певні відмінності, загальні тенденції залишаються незмінними: дисперсія та СКВ сигналу є найменшими при малих кутах нахилу і суттєво зростає при великих. Таким чином, найбільша чутливість спостерігається при вертикальному положенні сенсора, однак відхилення в межах $90 \pm 15^\circ$ не приводять до суттєвих змін характеристик сигналу.

Така динаміка підтверджує, що і дисперсія, і середньоквадратичне відхилення є показниками, чутливими до змін кута нахилу, та можуть ефективно використовуватися для оцінки функціональних параметрів сенсора.

На наступному етапі дослідження розглянуто вплив величини кута відхилення перетворювача від горизонталі на кількісну характеристику сигналу E_s – енергію, яку розраховано на інтервалі спостереження за попередньо масштабованими відліками (smpl) у одиниці напруги вольти (з врахуванням розрядності АЦП і апертури напруг сигналів), згідно формули:

$$E_s = \sum_{i=1}^n s_i^2$$

де s_i – значення амплітуд сигналу,
 i – номер відріку,
 n – кількість відліків на інтервалі спостереження.

Характерні результати проведених експериментальних досліджень, зміни енергії сигналів E_s та шумів E_n сенсора SM-24 розглянутого інформаційно-вимірювального каналу для діапазону від 0° до 90° , з фіксованим кроком 15° , подано на рис.3.

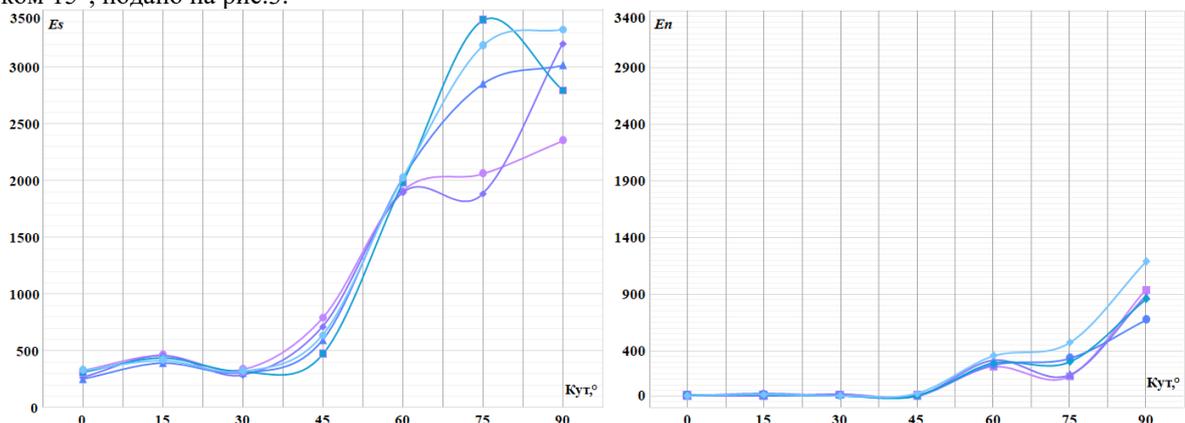


Рис. 3. Характерні зміни енергії сигналів E_s та шумів E_n для діапазону кута відхилення гесенсора від горизонталі від 0° до 90° .

Як можна побачити, при початкових кутах нахилу (0°–30°) енергія як сигналів так і шумів є відносно малою та демонструє незначні коливання між експериментами. При кутах у 45° відзначається помірне зростання, що вказує на зростання чутливості датчика. Найбільше зростання енергії сигналів фіксується в діапазоні 60°–90°, де спостерігається різке зростання енергії для всіх експериментів.

Вході дослідження шумів геоперетворювача встановлено, що при величині кута нахилу до 45° їх енергія є нестабільною, демонструючи низькі величини та значну варіативність між різними вимірюваннями, що очевидно пояснюється конструктивними особливостями сенсора, що передбачають вертикальний підвіс чутливого елемента. Тобто, в таких умовах шум є менш помітним або його енергетичні характеристики залишаються на низькому рівні. Проте, починаючи з кута 60°, енергія шумів зростає, одна залишається в рази меншою порівняно з енергією сигналів.

Доцільно зазначити, що використання згладжування методом середнього арифметичного показує загальну тенденцію до зростання енергії, але на проміжних кутах, зокрема 30° значення середнього менші через суттєві відмінності результатів в окремих вимірюваннях.

Використання медіанного згладжування, у свою чергу, більш стійке до аномальних значень і демонструє дещо плавніший перехід між фазами зростання, зокрема у діапазоні 15°–75°, що свідчить про те, що медіанне значення краще відображає типову зміну енергії сигналів, мінімізуючи вплив окремих відхилень.

Одним з простіших і доступних способів отримання аналітичного опису впливу величини кута нахилу a (відхилення перетворювача від горизонталі) на енергію сигналів Es^* , яка розраховувалась за значеннями їх амплітуд на інтервалі спостереження, може бути регресійний аналіз. Таким чином, за результатами опрацювання наборів експериментальних даних реалізовано моделі на основі лінійної, експонентної та поліномної регресії.

Крім того, в ході моделювання розглянуто різні варіанти попереднього згладжування експериментальних наборів вимірювальних сигналів геосенсора, з метою видалення грубих помилок і промахів, зокрема використано усереднені Es_a^* та медіанні Es_m^* значенням.

Емпіричні моделі, отримані на основі лінійної регресії, що описують залежність енергії сигналів перетворювача Es^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$Es_a^* = 8.0161a - 36.8731 \quad Es_m^* = 22.7460a - 198.0901$$

де a – значення кута нахилу в градусах.

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі лінійної регресії для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію сигналів геосенсора, подано в табл.3.

Таблиця 3

Оцінка похибок лінійного моделювання енергій сигналів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	-36,8730 / -198,0900	58,3916 / 110,8743	95,2646 / 308,9643	1,6315 / 2,7866
15	83,3670 / 143,1000	157,0360 / 270,4710	73,6690 / 127,3710	0,4691 / 0,4709
30	203,6070 / 484,2900	82,9238 / 146,9346	120,6832 / 337,3554	1,4554 / 2,2960
45	323,8470 / 825,4800	171,0003 / 293,3767	152,8467 / 532,1033	0,8938 / 1,8137
60	444,0870 / 1166,6700	392,7888 / 1100,1355	51,2982 / 66,5345	0,1306 / 0,0605
75	564,3270 / 1507,8600	668,2757 / 2096,3133	103,9487 / 588,4533	0,1555 / 0,2807
90	684,5670 / 1849,0500	736,5193 / 1760,4043	51,9523 / 88,6457	0,0705 / 0,0504

Емпіричні моделі, отримані на основі експонентної регресії, що описують залежність енергії сигналів перетворювача Es^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$Es_a^* = 60.5520 \cdot e^{0.0287a} \quad Es_m^* = 100.9401 \cdot e^{0.0343a}$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі експонентної регресії для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію сигналів геосенсора, подано в табл.4.

Таблиця 4

Оцінка похибок експонентного моделювання енергій сигналів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	60,5220 / 100,9400	58,3916 / 110,8743	2,1304 / 9,9343	0,0365 / 0,0896
15	93,0844 / 168,8526	157,0360 / 270,4710	63,9515 / 101,6183	0,4072 / 0,3757
30	143,1663 / 282,4570	82,9238 / 146,9346	60,2425 / 135,5223	0,7265 / 0,9223
45	220,1936 / 472,4946	171,0003 / 293,3767	49,1932 / 179,1179	0,2877 / 0,6105
60	338,6635 / 790,3898	392,7888 / 1100,1355	54,1253 / 309,7457	0,1378 / 0,2816
75	520,8734 / 1322,1656	668,2757 / 2096,3133	147,4023 / 774,1477	0,2206 / 0,3693
90	801,1169 / 2211,7211	736,5193 / 1760,4043	64,5976 / 451,3169	0,0877 / 0,2564

Отримані результати моделювання енергії сигналів перетворювача Es^* від кута нахилу a по на основі лінійної та експонентної регресії дозволяють зробити висновок, що використання усереднення порівняно з медіанним значенням, при згладжування вихідних даних, забезпечує менші похибки. Однак, кривизна модельованої характеристики не дозволяє отримати прийнятні результати адекватності згаданих моделей.

Емпіричні моделі, отримані на основі поліномної регресії 2-го порядку, що описують залежність енергії сигналів перетворювача Es^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$Es_a^* = 0,0986a^2 - 8.574a + 74.0450 \quad Es_m^* = 0.2350a^2 + 1.5955a + 66.3001$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі поліномної регресії 2-го порядку для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію сигналів геосенсора, подано в табл.5.

Таблиця 5

Оцінка похибок поліномного (2-го порядку) моделювання енергій сигналів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	74,0450 / 66,3000	58,3916 / 110,8743	15,6534 / 44,5743	0,2681 / 0,4020
15	83,3690 / 143,1075	157,0360 / 270,4710	73,6670 / 127,3635	0,4691 / 0,4709
30	137,0630 / 325,6650	82,9238 / 146,9346	54,1392 / 178,7304	0,6529 / 1,2164
45	235,1270 / 613,9725	171,0003 / 293,3767	64,1267 / 320,5958	0,3750 / 1,0928
60	377,5610 / 1008,0300	392,7888 / 1100,1355	15,2278 / 92,1055	0,0388 / 0,0837
75	564,3650 / 1507,8375	668,2757 / 2096,3133	103,9107 / 588,4758	0,1555 / 0,2807
90	795,5390 / 2113,3950	736,5193 / 1760,4043	59,0197 / 352,9907	0,0801 / 0,2005

Емпіричні моделі, отримані на основі поліномної регресії 3-го порядку, що описують залежність енергії сигналів перетворювача Es^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$Es_a^* = 0,0012a^3 + 0,2575a^2 - 6.1528a + 97.874 \quad Es_m^* = -0.0093a^3 + 1.49a^2 - 40.238a + 254.55$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі поліномної регресії 3-го порядку для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію сигналів геосенсора, подано в табл.6.

Таблиця 6

Оцінка похибок поліномного (3-го порядку) моделювання енергій сигналів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	97,8740 / 254,5500	58,3916 / 110,8743	39,4824 / 143,6757	0,6762 / 1,2958
15	59,4695 / -41,7825	157,0360 / 270,4710	97,5665 / 312,2535	0,6213 / 1,1545
30	112,6400 / 164,3100	82,9238 / 146,9346	29,7162 / 17,3754	0,3584 / 0,1183
45	233,0855 / 704,7525	171,0003 / 293,3767	62,0852 / 411,3758	0,3631 / 1,4022
60	396,5060 / 1411,4700	392,7888 / 1100,1355	3,7172 / 311,3345	0,0095 / 0,2830
75	578,6015 / 2116,3875	668,2757 / 2096,3133	89,6742 / 20,0742	0,1342 / 0,0096
90	755,0720 / 2651,4300	736,5193 / 1760,4043	18,5527 / 891,0257	0,0252 / 0,5061

Отримані результати моделювання енергії сигналів Es^* від кута нахилу a по на основі поліномної регресії 2-го та 3-го порядків дозволяють зробити висновок, що використання усереднення порівняно з медіанним значенням, при згладжування вихідних даних, як і у випадку моделювання лінійною та експонентною регресіями забезпечує менші похибки. Доцільно зазначити, що адекватність реалізованих поліномних моделей 2-го та 3-го порядку, яку визначають величини абсолютних та відносних похибок, є сумірною, тобто можна зробити висновок щодо недоцільності подальшого збільшення порядку поліному, достатньо використовувати поліном 2-го порядку. Подальшого зменшення похибок розглянутих регресійних моделей можна отримати шляхом фрагментації досліджуваної характеристики. При такому підході результуюча модель реалізується як агрегація моделей отриманих для кожного фрагменту окремо, що зумовлює додаткові ускладнення аналітичного опису.

Для оцінки ефективності регресійних моделей у числовому вигляді найчастіше послуговуються коефіцієнтом детермінації R^2 , значення якого рівне квадрату коефіцієнту взаємкореляції r_{xy} . Модельованих та експериментальних даних. Чим ближче R^2 до 1, тим точніше рівняння регресії пояснює фактор, який досліджується. Діаграма для візуального порівняння коефіцієнтів детермінації R^2 для розглянутих моделей (лінійна, експонентна, поліноми 2-го та 3-го порядку), що описують залежність сигналу геосенсора від кута його нахилу подано на рис.4.

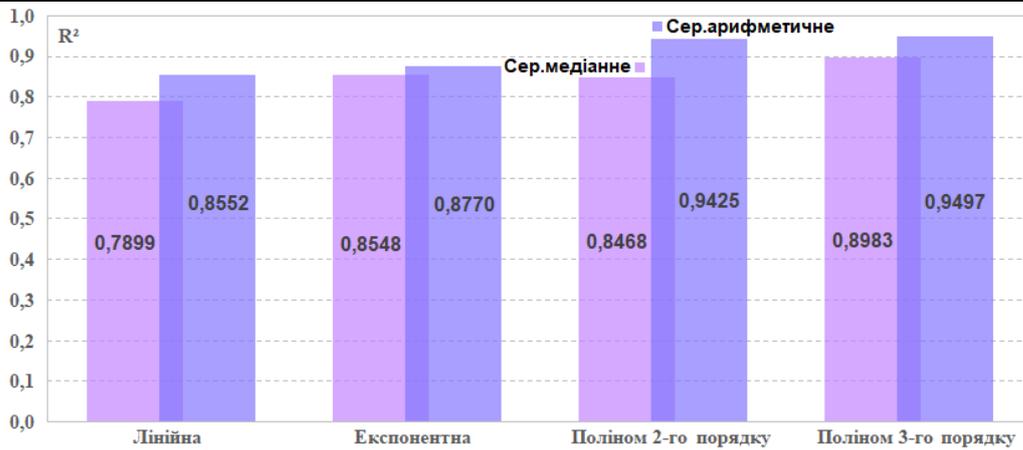


Рис. 4. Коефіцієнт детермінації R^2 моделей (лінійна, експонентна, поліноми 2-го та 3-го порядку), які описують залежність сигналу геосенсора від кута його нахилу

Як можна побачити, серед побудованих регресійних моделей найбільш адекватною для опису залежності енергій сигналів від кута нахилу геоперетворювача є поліноміальна модель третього порядку, побудована на даних, усереднених за допомогою арифметичного середнього. Така модель демонструє найвищий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9497$. Для медіанного усереднення також найкращою виявилася поліноміальна модель 3-го порядку з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,8983$.

Іншим чинником, що потребує окремого дослідження є шуми перетворювача SM-24, як власні (зумовлені особливостями конструкції, температурним дрейфом тощо), так і сторонні (зумовлені впливом електромагнітних полів на котушку), оскільки їх рівень фактично визначає мінімальну амплітуду сигналу, яку можна зареєструвати.

Як і в попередньому проведеному дослідженні, отримання аналітичного опису впливу величини кута нахилу a (відхилення перетворювача від горизонталі) на енергію шумів En^* геосенсора, яка розраховувалась за значеннями їх амплітуд на інтервалі спостереження, використано регресійний аналіз. В результаті, за результатами опрацювання експериментально отриманих шумів геосенсора реалізовано моделі на основі лінійної, експонентної та поліномної регресії.

Емпіричні моделі, отримані на основі лінійної регресії, що описують залежність енергії шумів перетворювача En^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$En_a^* = 1.7514a - 33.2470 \quad En_m^* = 2.5285a - 50.5450$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі лінійної регресії для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію шумів геосенсора, подано в табл.7.

Таблиця 7

Оцінка похибок лінійного моделювання енергій шумів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	-33,2470 / -50,5450	0,1356 / 0,9562	33,3826 / 51,5012	246,2549 / 53,8619
15	-6,9760 / -12,6175	2,5247 / 1,5094	9,5007 / 14,1269	3,7630 / 9,3592
30	19,2950 / 25,3100	0,7419 / 1,3699	18,5531 / 23,9401	25,0089 / 17,4764
45	45,5660 / 63,2375	1,7783 / 1,4267	43,7877 / 61,8108	24,6234 / 43,3255
60	71,8370 / 101,1650	56,1608 / 80,1151	15,6762 / 21,0499	0,2791 / 0,2627
75	98,1080 / 139,0925	87,2558 / 82,7624	10,8522 / 56,3301	0,1244 / 0,6806
90	124,3790 / 177,0200	170,3751 / 274,5316	45,9961 / 97,5116	0,2700 / 0,3552

Емпіричні моделі, отримані на основі експонентної регресії, що описують залежність енергії шумів перетворювача En^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$En_a^* = 0.1859 \cdot e^{0.0781a} \quad En_m^* = 0.4042 \cdot e^{0.0692a}$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі експонентної регресії для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію шумів геосенсора, подано в табл.8.

Отримані результати моделювання енергії шумів перетворювача En^* від кута нахилу a по на основі лінійної та експонентної регресії дозволяють зробити висновок, що використання усереднення порівняно з медіанним значенням, при згладжування вихідних даних, не забезпечує суттєвих переваг, як це спостерігалось при моделюванні енергії сигналів.

Таблиця 8

Оцінка похибок експонентного моделювання енергій шумів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	0,1859 / 0,4042	0,1356 / 0,9562	0,0503 / 0,5520	0,3713 / 0,5773
15	0,5999 / 1,1413	2,5247 / 1,5094	1,9249 / 0,3681	0,7624 / 0,2439
30	1,9357 / 3,2225	0,7419 / 1,3699	1,1938 / 1,8526	1,6092 / 1,3524
45	6,2461 / 9,0989	1,7783 / 1,4267	4,4678 / 7,6722	2,5124 / 5,3778
60	20,1550 / 25,6914	56,1608 / 80,1151	36,0058 / 54,4237	0,6411 / 0,6793
75	65,0368 / 72,5412	87,2558 / 82,7624	22,2190 / 10,2212	0,2546 / 0,1235
90	209,8627 / 204,8247	170,3751 / 274,5316	39,4877 / 69,7069	0,2318 / 0,2539

Характеристика зміни енергії шумів En^* геоперетворювача від кута нахилу відчутно пологіша, див.рис.3, проте як і для сигналів має не лінійність у верхній частині діапазону, що практично не дозволяє отримати прийнятні результати адекватності згаданих моделей.

Емпіричні моделі, отримані на основі поліномної регресії 2-го порядку, що описують залежність енергії шумів перетворювача En^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a геоперетворювача подано нижче:

$$En_a^* = 0,0357a^2 - 1.4616a + 6.9158 \quad En_m^* = 0.0596a^2 - 2.8395a + 16.5550$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі поліномної регресії 2-го порядку для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію шумів геосенсора, подано в табл.9.

Таблиця 9

Оцінка похибок поліномного (2-го порядку) моделювання енергій шумів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	6,9158 / 16,5550	0,1356 / 0,9562	6,7802 / 15,5988	50,0161 / 16,3139
15	-6,9757 / -12,6275	2,5247 / 1,5094	9,5004 / 14,1369	3,7629 / 9,3658
30	-4,8022 / -14,9900	0,7419 / 1,3699	5,5441 / 16,3599	7,4732 / 11,9427
45	13,4363 / 9,4675	1,7783 / 1,4267	11,6580 / 8,0408	6,5557 / 5,6361
60	47,7398 / 60,7450	56,1608 / 80,1151	8,4210 / 19,3701	0,1499 / 0,2418
75	98,1083 / 138,8425	87,2558 / 82,7624	10,8525 / 56,0801	0,1244 / 0,6776
90	164,5418 / 243,7600	170,3751 / 274,5316	5,8333 / 30,7716	0,0342 / 0,1121

Емпіричні моделі, отримані на основі поліномної регресії 3-го порядку, що описують залежність енергії шумів перетворювача En^* (відповідно для різних методів згладжування) від кута нахилу a подано нижче:

$$En_a^* = 0,0002 a^3 + 0,0023 a^2 - 0.3472 a + 1.9009$$

$$En_m^* = 0.0009 a^3 - 0.0666 a^2 + 1.3671 a - 2.3743$$

Результати оцінювання адекватності моделей отриманих на основі поліномної регресії 3-го порядку для різних методів згладжування вихідних даних, що представляють енергію шумів геосенсора, подано в табл.10.

Таблиця 10

Оцінка похибок поліномного (3-го порядку) моделювання енергій шумів, згладжених за середнім / медіанним значеннями, при різних величинах кута нахилу

Кут, °	Значення		Похибка	
	розраховане	фактичне	абсолютна	відносна
0	1,9009 / -2,3743	0,1356 / 0,9562	1,7653 / 3,3305	13,0225 / 3,4831
15	-2,1146 / 6,1847	2,5247 / 1,5094	4,6393 / 4,6753	1,8375 / 3,0974
30	-1,0451 / 2,9987	0,7419 / 1,3699	1,7870 / 1,6288	2,4088 / 1,1891
45	9,1594 / 6,2927	1,7783 / 1,4267	7,3811 / 4,8660	4,1507 / 3,4108
60	32,5489 / 34,2917	56,1608 / 80,1151	23,6119 / 45,8234	0,4204 / 0,5720
75	73,1734 / 105,2207	87,2558 / 82,7624	14,0824 / 22,4583	0,1614 / 0,2714
90	135,0829 / 237,3047	170,3751 / 274,5316	35,2922 / 37,2269	0,2071 / 0,1356

Як і в попередньо проведеному дослідженні, для оцінки ефективності регресійних моделей у числовому вигляді використано детермінації R^2 , що визначається через коефіцієнт взаємкореляції модельованих та експериментальних даних. Діаграма для візуального порівняння коефіцієнтів детермінації R^2 для розглянутих моделей (лінійна, експонентна, поліноми 2-го та 3-го порядку), що описують залежність шумів геосенсора від кута його нахилу подано на рис.5.

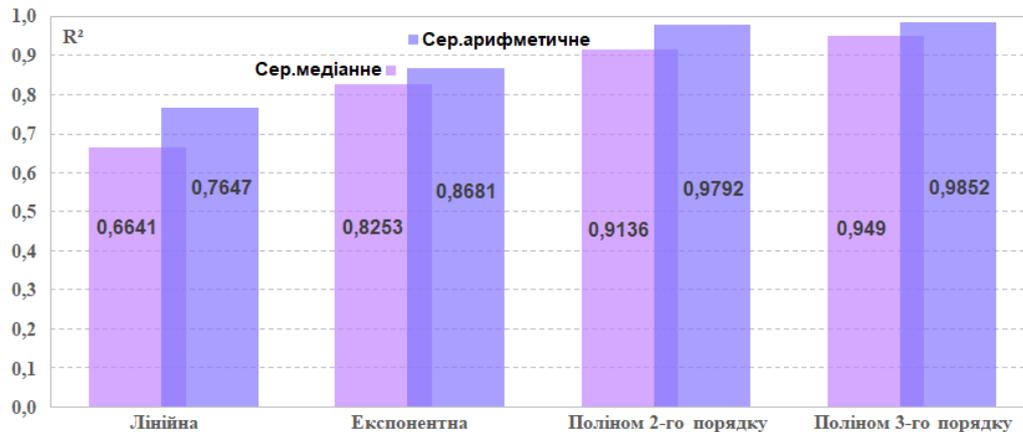


Рис. 5. Коефіцієнт детермінації R^2 моделей (лінійна, експонентна, поліноми 2-го та 3-го порядку), які описують залежність шумів геосенсора від кута його нахилу

Як можна побачити з поданої діаграми, поліноміальні моделі третього порядку ($R^2 = 0,9852$ при використанні арифметичного та $R^2 = 0,949$ для медіанного усереднення) найточніше описують залежності енергій шумів від кута нахилу геоперетворювача, як і в попередньому випадку.

Важливим параметром, що визначає можливість виділення сигналів в експлуатаційних умовах, є відношення E_s/E_n в точці прийому. Провівши порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень поданих в таблицях 3-10 встановлено, що відношення E_s/E_n зменшується зі зростанням кута нахилу, зокрема: $\{(0^\circ, \approx 430); (15^\circ, \approx 62); (30^\circ, \approx 111); (45^\circ, \approx 96); (60^\circ, \approx 7); (75^\circ, \approx 8); (90^\circ, \approx 4)\}$ завжди більше за одиницю хоч і має нелінійний характер. Тобто енергія сигналу E_s в рази а то і на порядки більша за енергію шумів E_n , що забезпечує їх ефективне виділення.

З огляду на отримані результати, можна зробити попередній висновок, що при куті нахилу в межах $90 \pm 15^\circ$ суттєвих змін характеристик енергій сигналу та шумів не спостерігаються. Крім того використання згладжування сигналів шляхом усереднення дозволяє забезпечити меншу, інколи сумірну, похибку відтворення, однак потребує менших обчислювальних затрат порівняно з пошуком медіанного значення, особливо за значних розмірів вибірки досліджуваного сигналу.

Висновки

Результати проведених експериментальних досліджень показали закономірне зростання дисперсії та середньоквадратичного відхилення сигналів та шумів геосенсора зі збільшенням кута відхилення. Вищі значення цих характеристик відображають більшу нестабільність сигналу та більшу чутливість до зовнішніх та внутрішніх шумових факторів, що зумовлено зміною динаміки пружинно-маятникової системи геофона. Енергетичні характеристики сигналів та шумів виявили таку ж залежність від кута нахилу. Суттєві зміни спостерігаються у діапазоні 60° – 90° , де енергія сигналів та шумів різко зростає. Така поведінка сигналу свідчить про порушення оптимальних умов роботи геофона та потребу врахування можливих нелінійних ефектів при аналізі коливальних процесів.

Також в ході дослідження проведено регресійному моделюванню енергетичних залежностей як для сигналів так і для шумів геофонного перетворювача. Лінійні та експонентні моделі не забезпечили задовільної точності опису процесу через виражену нелінійність отриманих характеристик. Порівняння похибок показало, що ці моделі мають значні відхилення, особливо у верхній частині діапазону кутів, і не можуть коректно описати різке зростання енергії. Точніший опис залежності енергії сигналів та шумів від кута нахилу забезпечили поліномні моделі другого та третього порядків. Поліном третього порядку, отриманий на даних, згладжених методом середнього арифметичного, продемонстрував найвищий коефіцієнт детермінації ($R^2 \approx 0,95$ для сигналів та $R^2 \approx 0,98$ для шумів).

Порівняльний аналіз відношення енергії сигналу до енергії шумів E_s/E_n показав, що хоча цей параметр зменшується зі збільшенням кута нахилу, він у всіх випадках значно перевищує одиницю. Тобто, навіть при великих відхиленнях геофон зберігає здатність передавати корисний сигнал з прийнятним рівнем завадостійкості, що є важливим для практичних застосувань. Таким чином, коректна робота геофонного перетворювача забезпечується при кутах нахилу, близьких до вертикалі. Відхилення в межах $\pm 15^\circ$ не викликають критичних спотворень, однак значні кути нахилу потребують додаткової корекції сигналів або врахування регресійних моделей при інтерпретації результатів. Отримані поліномні моделі можуть бути використані як аналітичний інструмент для прогнозування зміни енергетичних параметрів при монтажі сенсора у експлуатаційних умовах.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути моделі з урахуванням частотної залежності сигналів, оскільки поведінка геофона може суттєво змінюватися для різних спектрів вібрацій. Також перспективним може бути вивчення впливу типу поверхні та способу кріплення сенсора на енергетичні параметри сигналів. Також варто приділити увагу розробці цифрових методів підсилення, фільтрування та адаптивної компенсації спотворень таких сигналів.

Література

1. Siafarikas P., Kourousis K., Karakostas V. Advances in low-frequency vibration sensing for seismic applications: A review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 12. P. 4028. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21124028>
2. Ebrahim A., Staneva V. Impact of sensor tilt on seismic signal interpretation in urban environments. *Journal of Applied Geophysics*. 2022. Vol. 198. P. 104573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104573>
3. Zhang T., Li Y. Geophone tilt correction using adaptive signal decomposition. *Seismological Research Letters*. 2023. Vol. 94, No. 1. P. 112–124. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220220081>
4. Qiao Y., Li X., Chen H. Mechanical modeling of moving-coil geophones under non-ideal mounting conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 161. P. 107948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.107948>
5. Bertram M. High-fidelity seismic sensing: Revisiting geophone performance in modern monitoring systems. *Geophysics*. 2020. Vol. 85, No. 4. P. V341–V352. DOI: <https://doi.org/10.1190/geo2019-0615.1>
6. Yu J., Wang L., Qian S. Nonlinear effects in vibration sensors: Experimental and analytical study. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. Vol. 345. P. 113762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113762>
7. Kohler M. D., Brooks B. A., Jones S. Performance assessment of compact geophones in structural monitoring. *Earthquake Spectra*. 2021. Vol. 37, No. 3. P. 1964–1984. DOI: <https://doi.org/10.1177/8755293020982219>
8. Lee S., Park J. Noise floor variation in coil-based vibration sensors under tilt and thermal drift. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, No. 5. P. 6781–6792. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3241234>
9. Міхно О. П., Стрілець В. Ю. Аналіз характеристик вібраційних перетворювачів у системах моніторингу критичної інфраструктури. *Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Геологія*. 2024. № 4(91). С. 22–31. ISSN: 1728-2713
10. Schneider F., Müller T., Bauer J. Polynomial and hybrid regression approaches for nonlinear sensor calibration. *Measurement*. 2022. Vol. 194. P. 111093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111093>

References

1. Siafarikas P., Kourousis K., Karakostas V. Advances in low-frequency vibration sensing for seismic applications: A review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 12. P. 4028. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21124028>
2. Ebrahim A., Staneva V. Impact of sensor tilt on seismic signal interpretation in urban environments. *Journal of Applied Geophysics*. 2022. Vol. 198. P. 104573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104573>
3. Zhang T., Li Y. Geophone tilt correction using adaptive signal decomposition. *Seismological Research Letters*. 2023. Vol. 94, No. 1. P. 112–124. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220220081>
4. Qiao Y., Li X., Chen H. Mechanical modeling of moving-coil geophones under non-ideal mounting conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 161. P. 107948. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.107948>
5. Bertram M. High-fidelity seismic sensing: Revisiting geophone performance in modern monitoring systems. *Geophysics*. 2020. Vol. 85, No. 4. P. V341–V352. DOI: <https://doi.org/10.1190/geo2019-0615.1>
6. Yu J., Wang L., Qian S. Nonlinear effects in vibration sensors: Experimental and analytical study. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. Vol. 345. P. 113762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113762>
7. Kohler M. D., Brooks B. A., Jones S. Performance assessment of compact geophones in structural monitoring. *Earthquake Spectra*. 2021. Vol. 37, No. 3. P. 1964–1984. DOI: <https://doi.org/10.1177/8755293020982219>
8. Lee S., Park J. Noise floor variation in coil-based vibration sensors under tilt and thermal drift. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, No. 5. P. 6781–6792. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3241234>
9. Mikhno O. P., Strilets V. Yu. Analiz kharakterystyk vibratsiynykh peretvoriuvachiv u systemakh monitorynhu krytychnoi infrastruktury. *Visnyk KNU im. T. Shevchenka. Heolohiia*. 2024. № 4(91). S. 22–31. ISSN: 1728-2713
10. Schneider F., Müller T., Bauer J. Polynomial and hybrid regression approaches for nonlinear sensor calibration. *Measurement*. 2022. Vol. 194. P. 111093. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111093>