

Оцінювання потенціалу мікробарометричного MEMS-датчика BMP388 як малобюджетного сенсора для моніторингу динаміки та швидких збурень атмосферного тиску

I.V. Kosyak, 2026

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна
Надійшла 9 грудня 2025 р.

Проаналізовано роботу мікробарометричного MEMS-датчика BMP388, який забезпечує вимірювання тиску і температури. Дослідження присвячене оцінюванню потенціалу цього сенсора як бюджетної альтернативи традиційним високоточним, але дорогим приладам, що використовуються у сфері динамічного геофізичного моніторингу та виявлення низькочастотних (інфразвукових) коливань атмосферного тиску. Актуальність роботи обумовлена необхідністю створення малобюджетних мереж для реєстрації швидких атмосферних збурень, включно з інфразвуком, який генерується широким спектром природних та антропогенних джерел. Для експериментального оцінювання можливостей датчика проведено серію випробувань із варіацією параметрів цифрової обробки (ступеня передискретизації та ПР-фільтрації), що дало змогу визначити умови для досягнення раціонального співвідношення сигнал/шум при реєстрації динамічних змін тиску. Протягом довготривалого (25 годин) моніторингу природних барографічних змін було зафіксовано характерну динаміку варіацій тиску — подвійну аномалію, яка корелює з проходженням грозового фронту. Експеримент також охопив аналіз реакції на імпульсний вплив тиску та визначення мікробарометричної роздільної здатності. Ключовий методологічний висновок ґрунтується на порівнянні конфігурацій з активованою та відключеною внутрішньою ПР-фільтрацією. Повне відключення ПР-фільтра призводить до домінування високочастотного шуму в спектрі та суттєвого зниження співвідношення сигнал/шум, навіть коли корисний низькочастотний сигнал залишається ідентифікованим. Це доводить, що активна ПР-фільтрація є ключовою умовою для досягнення високої якості даних під час динамічних спостережень. Результати дослідження обґрунтовують придатність BMP388 як бюджетного сенсора для оперативного моніторингу атмосферних збурень, а також відкривають перспективи для його інтеграції у більш складні геофізичні вимірювальні системи.

Ключові слова: BMP388, MEMS-датчик, інфразвук, динамічний моніторинг, атмосферний тиск, ПР-фільтрація.

Вступ. Відомо, що природні інфразвукові сигнали генеруються метеорами, виверженнями вулканів, землетрусами, зсувами, лавинами, відколюванням льодовиків, ураганами, торнадо, полярними штормами, грозами, літоральними проце-

сами та полями океанських хвиль. Безліч видів діяльності людини додають інфразвук у навколишнє середовище [Bass et al., 2003]. Інфразвук визначає коливання тиску в діапазоні між граничною акустичною частотою (0,0003—0,001 Гц) і нижнім

Citation: Kosyak, I.V., (2026). Assessment of the potential of the BMP388 microbarometric MEMS sensor as a low-cost sensor for dynamic atmospheric pressure monitoring and detection of rapid disturbances. *Geofizychnyi Zhurnal*, 48(2), 119—133. <https://doi.org/10.24028/gj.v48i2.345973>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

порогом сприйняття людського слуху (16—20 Гц) [Hure et al., 2022].

Гравітаційні хвилі в атмосфері, що мають швидкість, значно нижчу за швидкість звуку, зазвичай поширюються зі швидкостями, подібними до швидкості вітру (порядку 1—10 м/с) [Le Pichon et al., 2019]. Задачі виявлення та аналізу інфразвукових сигналів є критично важливими для широкого спектра наукових і прикладних галузей, включно з моніторингом атмосферних процесів, прогнозуванням сейсмічної активності, а також з оцінюванням їхнього впливу на радіоканали [Albert, 2022].

Датчики тиску на основі технології мікроелектронно-механічних систем (MEMS), розробка яких розпочалася у 1960-х роках, сьогодні є основою для широкого спектра застосувань, зокрема для автомобільної, аерокосмічної, медичної галузей та екологічного моніторингу [Eaton, Smith, 1997; Han et al., 2023]. Вони також використовуються для вимірювань, що потребують підвищеної точності, таких як спостереження за невеликими коливаннями атмосферного тиску (інфразвук) [Nishimura et al., 2019], системи вертикальної локації з використанням вимірювання тиску [NextNav ..., 2025] тощо.

На основі датчиків атмосферного тиску MEMS створено барометричні датчики тиску, які, крім вимірювання тиску повітря, також визначають висоту і температуру навколишнього середовища. Сучасні датчики барометричного тиску достатньо точні і можуть визначати висоту з точністю до кількох сантиметрів [Barometric ..., 2023].

Вибір мікробарометричних MEMS-датчиків як об'єкта дослідження обумовлений необхідністю створення децентралізованих мереж моніторингу. Традиційні прецизійні барометричні станції, незважаючи на високу точність, характеризуються високою вартістю, що обмежує щільність їхнього розміщення в межах конкретної території.

Використання MEMS-сенсорів дає змогу вирішити низку актуальних науково-

практичних завдань. Завдяки низькій вартості та низькому енергоспоживанню таких датчиків стає можливим розгортання щільних вимірювальних мереж. А це дає змогу фіксувати локальні градієнти тиску та динаміку атмосферних фронтів. Експериментальне оцінювання необхідне для встановлення фактичних метрологічних характеристик доступних сенсорів. Дослідження доводить, що за умови коректного програмного налаштування (цифрова фільтрація та оверсемплінг), малобюджетний MEMS-датчик здатний реєструвати мікробарометричні збурення, що відкриває шлях до його використання у геофізичних дослідженнях.

На відміну від статичних вимірювань, у цій статті оцінюється здатність датчиків працювати в режимі реального часу з частотою дискретизації на порядки більшою за 1 Гц. Це критично важливо для виявлення швидких збурень — від грозових розрядів до техногенних коливань тиску.

На сучасному ринку представлено широкий спектр MEMS-датчиків атмосферного тиску (зокрема BMP280, BMP388, BMP390, BMP580, BMP585), які різняться між собою роздільною здатністю, рівнем власного шуму та енергоспоживанням. Проте доступними у роздрібній торговельній мережі залишаються моделі BMP280 та BMP388. Незважаючи на широку розповсюдженість на ринку попередньої моделі BMP280, для даного дослідження було обрано датчик BMP388. Цей вибір обумовлений його суттєво покращеними метрологічними характеристиками, зокрема нижчим рівнем власного шуму та вищою роздільною здатністю, що є критично важливим для реєстрації слабких інфразвукових сигналів.

При цьому характеристики датчика забезпечують необхідну точність вимірювань для реєстрації мікробарометричних коливань, а можливість гнучкого програмного налаштування внутрішніх цифрових фільтрів забезпечує його адаптацію до спеціалізованих геофізичних завдань. Зокрема, це стосується моніторингу динаміки метеорологічних фронтів (реєстрації

характерних стрибків тиску та інфразвукових коливань), а також виявлення низькочастотних акустичних сигналів від віддалених техногенних джерел.

Мета цієї роботи полягає в експериментальному оцінюванні метрологічних характеристик мікроелектронно-механічного барометричного датчика BMP388 для його застосування в геофізичному моніторингу, зокрема для динамічного моніторингу атмосферного тиску та інфразвукових коливань.

Обґрунтування вибору датчика й аналіз існуючих рішень. Для порівняльного аналізу характеристик MEMS-датчика BMP388 із наявними рішеннями було обрано як прототипи два типи цифрових барометрів, що є референтними у своїх галузях: прецизійний барометр *Paroscientific Digiquartz Series 6000* та промисловий барометр *Vaisala BAROCAP PTB330*. У табл. 1 наведено зведені технічні характеристики досліджуваного сенсора BMP388 порівняно із зазначеними прототипами. Порівняльну вартість BMP388 наведено з урахуванням повного комплексу (мікроконтролер, система автономного живлення та накопичувач мікроСД).

Paroscientific Digiquartz Series 6000 вважається «золотим стандартом» у геофізиці. Завдяки використанню кварцового резонатора як чутливого елемента прилад забезпечує високу точність ($\pm 0,01$ % від повної шкали, яких налічується 40). Його застосовують для реєстрації глобальних інфразвукових подій (цунамі, техногенні вибухи), управління процесами та в аерокосмічних дослідженнях [Digiquartz..., 2026]. Проте висока вартість (понад \$ 9000) робить цей прилад непридатним для створення щіль-

них територіально-розподілених мереж.

Vaisala BAROCAP PTB330 є стандартом для професійної метеорології та авіації (зокрема, для оснащення аеродромів). В основі приладу лежить фірмовий кремнієвий ємнісний датчик BAROCAP, що забезпечує стабільність і високу абсолютну точність. [Digital Barometer..., 2026]. Недоліком цього класу пристроїв у контексті динамічних досліджень є обмежена частота дискретизації (зазвичай до 1 Гц), що унеможливорює детальний аналіз швидкоплинних барометричних процесів.

Запропоноване рішення на базі датчика BMP388 займає специфічну нішу між згаданими класами обладнання. За відносною точністю (± 8 Па) він наближається до промислових зразків *Vaisala*, суттєво переважаючи їх за частотою оновлення даних (149 Гц проти 1 Гц). Це дає змогу використовувати BMP388 як інструмент для реєстрації динамічних збурень з високою часовою деталізацією та робить його привабливим для децентралізованих мереж з огляду на його низьку собівартість.

Цифровий датчик тиску BMP388 (Bosch) — це цифровий пристрій для прецизійного вимірювання тиску та температури, що базується на п'єзорезистивній MEMS-технології (рис. 1). BMP388 — це компактний, малопотужний та малOSHумний 24-бітний датчик абсолютного тиску, який забезпечує точне відстеження висоти та оптимізований для застосування в безпілотних літальних апаратах [BMP388..., 2018].

Аналіз технічних характеристик BMP388 (табл. 2) свідчить про його придатність для високоточного моніторингу атмосфери. Зокрема, низьке значення

Т а б л и ц я 1. Технічне порівняння датчика BMP388 з професійними аналогами

Тип приладу	Точність, Па	Роздільна здатність, Па	Частота дискретизації	Вартість, \$
Paroscientific 6000	$\pm (1-10)$	$0,00000001 (10^{-8})$	до 100 Гц	> 9000
Vaisala PTB330	$\pm (10-20)$	0,1	1 Гц	1000—1500
Запропонований (BMP388)	± 8 (відн.), ± 50 (абс.)	0,085—2,64	149 Гц	< 50

температурного коефіцієнта зміщення ($\pm 0,75$ Па/К) мінімізує вплив добових коливань температури на результати, а частота дискретизації (200 Гц) і висока роздільна здатність дає змогу реєструвати динамічні мікробарометричні збурення. Низьке енергоспоживання забезпечує тривалу роботу в автономному режимі.

У ході експериментальних досліджень було виявлено певні невідповідності між фактичними експлуатаційними параметрами датчика BMP388 і характеристика-



Рис. 1. Барометричний датчик BMP388.

Fig. 1. BMP388 barometric sensor.

ми, заявленими виробником у технічній документації:

1) частота дискретизації: аналіз часових інтервалів між послідовними відліками показав, що мінімально досяжний інтервал становить 6,71 мс, що відповідає реальній частоті дискретизації ≈ 149 Гц. Це суттєво відрізняється від теоретично задекларованого значення у 200 Гц;

2) обмеження передискретизації: попри заявлену виробником можливість 128-кратного оверсемплінгу (128X) у ході програмної реалізації було встановлено, що максимально доступним параметром передискретизації є 32X.

Функціональний опис датчика тиску BMP388. Складається з п'єзорезистивного датчика тиску та інтегральної схеми спеціального призначення ASIC, яка виконує аналого-цифрові перетворення і надає результати перетворення та дані компенсації, специфічні для датчика, через цифровий інтерфейс. BMP388 забезпечує найвищу гнучкість для розробника та може бути адаптований до вимог щодо точності, часу вимірювання та споживання енергії шляхом вибору з великої кількості можливих комбінацій налаштувань датчика.

Т а б л и ц я 2. Паспортні технічні параметри барометричного датчика BMP388

Корпус	2,0 мм×2,0 мм×0,75 мм LGA
Цифровий інтерфейс	I2C (до 3,4 МГц) та SPI (до 10 МГц)
Напруга живлення	Основна напруга VDD: 1,71—3,6 В Напруга цифрових інтерфейсів VDDIO: 1,2—3,6 В
Відносна точність	± 8 Па, що еквівалентно $\pm 0,50$ м (700—900 гПа, 25—40 °С)
Абсолютна точність	± 50 Па (300—1100 гПа, 0—65 °С)
Температурний коефіцієнт зміщення	$\pm 0,75$ Па/К (від -20 до 65 °С при 700—1100 гПа)
Струм споживання	3,4 мкА при 1 Гц (вимірювання тиску і температури) 2,0 мкА у режимі сну
Робочий діапазон	від -40 до +85 °С, 300—1250 гПа
Частота дискретизації	200 Гц
Роздільна здатність	2,64 Па при передискретизації 1X 1,32 Па при передискретизації 2X 0,66 Па при передискретизації 4X 0,33 Па при передискретизації 8X 0,17 Па при передискретизації 16X 0,085 Па при передискретизації 32X

Доступний набір налаштувань передискретизації (oversampling), що варіюється від режиму наднизького енергоспоживання (ultra-low power) до режиму найвищої роздільної здатності (highest resolution), щоб адаптувати датчик до цільового застосування.

Ці налаштування є заздалегідь визначеними комбінаціями передискретизації вимірювань тиску та передискретизації вимірювань температури. Передискретизацію тиску та температури можна обирати незалежно від 0 до 128-кратного рівня передискретизації.

BMP388 оснащений вбудованим фільтром з нескінченною імпульсною характеристикою (IIR-фільтром) для мінімізації короткочасних збурень у вихідних даних, спричинених, наприклад, зачиненням дверей чи вікна. Коефіцієнт фільтра варіюється від 0 (вимкнено) до 63.

Період вимірювання BMP388 складається з вимірювання температури та тиску з можливістю вибору передискретизації. Після періоду вимірювання дані пропускаються через додатковий IIR-фільтр, який усуває короткочасні коливання тиску (наприклад, спричинені відкриванням дверей). При вимірюваннях тиску та температури існує кілька опцій передискретизації. Кожен крок передискретизації зменшує шум і збільшує роздільну здатність виходу на один біт, що зберігається в регістрі даних. У датчику BMP388 передбачено режими передискретизації (oversampling) із кратністю від 2 до 128, а також режим її повного відключення. Передискретизація полягає у кратному збільшенні кількості вимірів на один відлік, що дає змогу шляхом статистичної обробки зменшити похибку, знизити рівень випадкового шуму та підвищити розрядність сигналу. Як було зазначено вище, максимально доступним параметром передискретизації є 32X.

Тиск навколишнього середовища піддається багатьом короткочасним змінам, спричиненим, наприклад, різким відкриванням дверей або вікна, або вітром, що дме в датчик. Щоб придушити ці пе-

решкоди у вихідних даних, не спричиняючи додаткового трафіку інтерфейсу та навантаження на процесор, BMP388 оснащений внутрішнім IIR-фільтром. Він ефективно зменшує смугу пропускання вихідних сигналів. Величина шуму залежить від вибраних налаштувань передискретизації та фільтра [BMP388 ..., 2018].

Результати експериментальних досліджень динамічних характеристик системи реєстрації мікробарометричних коливань на основі датчика BMP388. Метою серії експериментів є визначення впливу параметрів передискретизації та IIR-фільтрації (внутрішньої цифрової обробки сигналу) на здатність датчика BMP388 реєструвати динамічні зміни тиску.

Для проведення досліджень за допомогою датчика було розроблено апаратно-програмний комплекс (систему) для моніторингу та реєстрації мікробарометричних коливань на основі компактного цифрового барометричного датчика Bosch BMP388. Система працює у реальному часі та забезпечує тривалий автономний запис (протягом декількох діб) на карту micro SD.

Об'єкт дослідження — апаратно-програмний комплекс на базі BMP388, розміщений у кабіні ліфта для моделювання зміни атмосферного тиску як функції зміни висоти. Критерії оцінювання:

- роздільна здатність за висотою: можливість ідентифікації статичних положень датчика на проміжних рівнях (поверхах);

- рівень амплітудного шуму: амплітуда випадкових коливань тиску у стані спокою;

- затримка відгуку вимірювальної системи: часовий інтервал між фізичною зміною стану руху (початком підйому або зупинкою) і моментом відображення цієї події в обробленому сигналі, що обумовлено алгоритмами цифрової фільтрації.

Експеримент включав контрольне переміщення: спуск з 9-го на 1-й поверх, коротку зупинку та подальший підйом на 9-й поверх. У процесі руху реєструвалися нетривалі зупинки на проміжних по-

верхах, що дало змогу адекватно оцінити показання як висоти, так і атмосферного тиску. Для порівняльного аналізу впливу різних параметрів передискретизації (Oversampling) і цифрового фільтра IIR (Infinite Impulse Response) датчика BMP388 на результати вимірювання відносної висоти та тиску було проведено серію з трьох експериментів.

У першому експерименті застосовано помірні параметри (збалансований режим) передискретизації та фільтрації (конфігурація А):

- передискретизація вимірювань температури 8X;
- передискретизація вимірювань тиску 4X;
- коефіцієнт фільтра 3.

Результати експерименту представлені на рис. 2, а, в. Графіки демонструють зареєстровані системою зміни атмосферного тиску та відносної висоти під час контрольного переміщення: спуск з 9-го поверху на 1-й, коротка зупинка та подальший підйом на 9-й поверх. Як видно

з графіків, система чітко реєструє зміну тиску під час встановленого руху (лінійне зростання при спуску та падіння при підйомі), а також постійний рівень сигналу під час нетривалих зупинок на проміжних поверхах.

Отримані результати підтверджують високу динамічну чутливість датчика BMP388 та адекватність розробленого апаратно-програмного комплексу для реєстрації швидких мікробарометричних коливань.

Кількісний аналіз даних показав, що в цьому режимі система зафіксувала зміну відносної висоти на 31,7 м. Враховуючи конструктивні особливості будівлі, де висота одного міжповерхового прольоту становить 4,0 м, загальна розрахункова висота для дев'яти поверхів становить 32,0 м. Швидкість руху ліфта (1 м/с) зумовлює зміну тиску на рівні ≈ 12 Па/с. Враховуючи частоту дискретизації датчика 149 Гц, система забезпечує щільність вимірювань понад 12 відліків на кожен паскаль зміни тиску. Це підтверджує

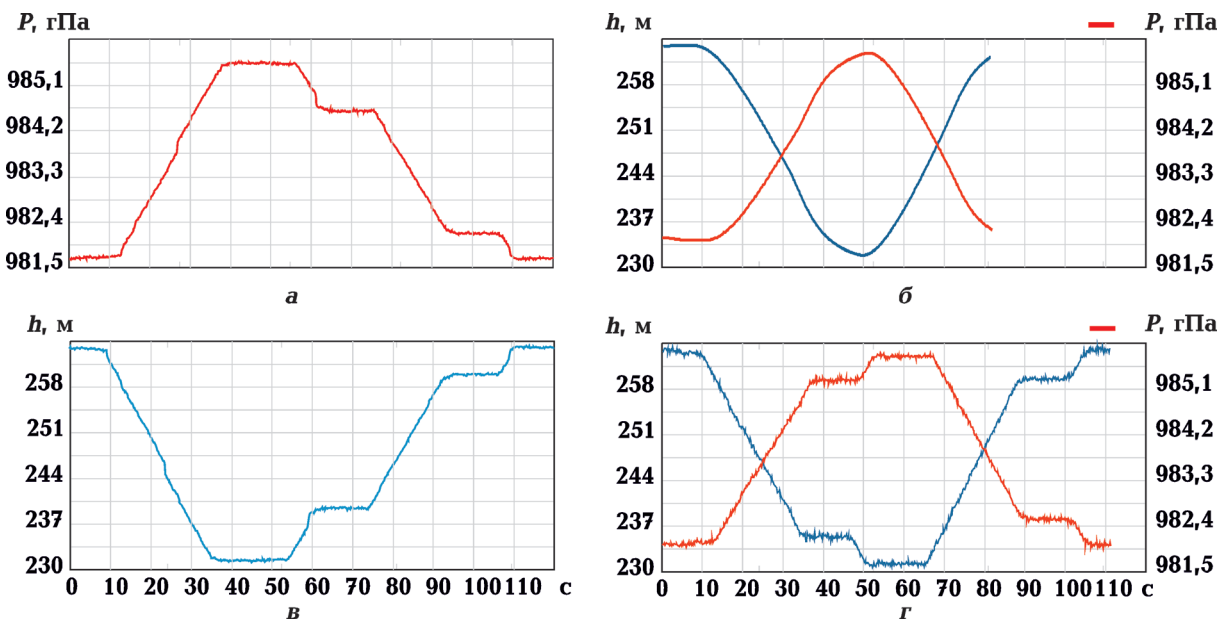


Рис. 2. Результати вимірювання відносної висоти та тиску датчиком BMP388 під час вертикального переміщення в ліфті: а — тиску (конфігурація А); б — тиску та висоти (конфігурація В); в — висоти (конфігурація А); г — тиску та висоти (конфігурація С).

Fig. 2. Results of measuring relative altitude and pressure with the BMP388 sensor during vertical movement in an elevator: а — pressure (configuration A); б — pressure and altitude (configuration B); в — altitude (configuration A); г — pressure and altitude (configuration C).

можливість детального аналізу динаміки процесу навіть при помірних швидкостях вертикального переміщення.

Таким чином, відхилення результатів вимірювання під час руху становило 0,3 м (0,94 %), що узгоджується із заявленим виробником значенням відносної точності $\pm 0,5$ м (табл. 2). Це підтверджує стабільність роботи сенсора при вертикальному переміщенні зі швидкістю до 1 м/с.

Завдяки застосуванню ІІР-фільтра з коефіцієнтом 3 спостерігається достатнє згладжування апаратного шуму при збереженні високої швидкості реакції на динамічні зміни тиску. Це доводить, що обрана конфігурація системи забезпечує належну точність та надійність отриманих даних навіть при вертикальному русі об'єкта. Це дає змогу ідентифікувати короточасні зупинки та аналізувати мікробарометричні зміни тиску. Затримка сигналу через фільтрацію, як видно із графіка, практично відсутня.

Варто зазначити, що отримані під час експерименту показання висоти мають відносний характер, що цілком достатньо для аналізу динаміки вертикального руху та оцінювання амплітуди барометричних коливань. Використання відносних величин дає змогу нівелювати вплив поточних метеорологічних умов на результати порівняльного аналізу конфігурацій датчика. Водночас для обчислення абсолютних значень висоти над рівнем моря розроблений алгоритм передбачає можливість корекції даних шляхом введення референтного значення атмосферного тиску (QNH), зафіксованого на рівні моря в момент проведення вимірювань.

У другому експерименті для оцінювання інерційності датчика при екстремальних налаштуваннях фільтрації було застосовано максимально можливі значення передискретизації та фільтрації (конфігурація В):

- передискретизація вимірювань температури 32X;
- передискретизація вимірювань тиску 32X;
- коефіцієнт фільтра 63.

На рис. 2, б представлено результати цього експерименту. Висока передискретизація 32X і максимальний коефіцієнт фільтра 63 призвели до значного згладжування ряду вимірюваних значень. Видно повну відсутність високочастотного шуму, проте виявлено згладжування сигналу та затримку його відгуку, що є наслідком застосованих алгоритмів цифрової фільтрації. Застосування коефіцієнта фільтра 63 призвело до трансформації графіка у плавну апроксимовану криву через нездатність фільтра «встигнути» за швидкою зміною тиску. Це демонструє велику інерційність вимірювання.

У третьому експерименті для визначення власного апаратного шуму датчика та його граничної швидкодії використовувалася комбінація параметрів з відключеною фільтрацією (конфігурація С):

- передискретизація вимірювань температури 16X;
- передискретизація вимірювань тиску 4X;
- коефіцієнт фільтра 0 (вимкнено).

На рис. 2, г представлено результати третього експерименту. Аналіз даних показує, що повна відсутність фільтрації дає змогу спостерігати миттєву реакцію датчика BMP388 на найменші зміни тиску. Графік відображає реєстрацію постійних незначних варіацій значень тиску та висоти, що зумовлені впливом власного шуму датчика. Це забезпечує мінімальну затримку в реакції, але збільшує дисперсію результатів вимірювань.

Оцінювання апаратного шуму системи проводилося шляхом реєстрації сигналу в ізолюваному приміщенні за відсутності механічних збурень та інтенсивних повітряних потоків (рис. 3). Експериментально встановлено, що рівень власного шуму датчика BMP388 залежить від обраного коефіцієнта ІІР-фільтрації.

Статистичний аналіз отриманих вибірок дав змогу встановити максимальний розмах (Peak-to-Peak) коливань тиску в стані спокою:

- для конфігурації А (коефіцієнт 3) $\approx 6,1$ Па;

- для конфігурації В (коефіцієнт 16) $\approx 1,5$ Па;
- для конфігурації С (фільтр вимкнено) ≈ 17 Па.

Результати проведених експериментів чітко ілюструють вплив параметрів конфігурації датчика BMP388 на характеристики вимірювання.

- Помірне фільтрування з коефіцієнтом фільтра 3 (конфігурація А) у першому експерименті забезпечує найкращий

компроміс між придушенням шуму та швидкістю реакції. Рівень шуму на плато (зупинках) становив $\approx 7,9$ Па. Графік на рис. 2, а демонструє чіткі сходинки на кожному поверсі.

- У другому експерименті застосування фільтру з коефіцієнтом 63 (конфігурація В) значно зменшує шум, але критично уповільнює реакцію датчика, що неприпустимо для завдань, які вимагають швидкого відстеження вертикального переміщення. Рівень шуму становив $\approx 1,5$ Па. Висновок — режим непридатний для відстеження швидких переміщень, проте він забезпечує максимальну роздільну здатність при вимірюванні незначних градієнтів тиску.

- Відключення ІІR-фільтра у третьому експерименті забезпечує миттєву реакцію, але призводить до збільшеного рівня шуму ≈ 25 Па та великої варіативності даних, що ускладнює точну інтерпретацію при значній дисперсії значень.

Слід зазначити, що під час експериментів із вертикальним переміщенням (ліфт) спостерігалось зростання амплітуди шумів. Це пояснюється не зміною апаратних властивостей датчика, а реєстрацією реальних мікрофлуктуацій тиску, спричинених турбулентними потоками повітря в замкненому просторі шахти ліфта.

Таким чином, вибір параметрів передискретизації та фільтрації датчика BMP388 визначається динамікою досліджуваного явища:

- для вимірювань, що потребують максимальної точності (наприклад, моніторинг погодних змін), доцільно використовувати високі коефіцієнти фільтрації та передискретизації (конфігурація В);

- для відстеження швидкоплинних метеорологічних процесів (наприклад, поривів вітру або різких фронтальних змін тиску), що вимагають мінімальної часової затримки, необхідно використовувати низьку фільтрацію (конфігурація А) або її відсутність (конфігурація С).

Проведені вимірювання кількісно підтверджують, що для задач реєстрації швидких барометричних варіацій та збу-

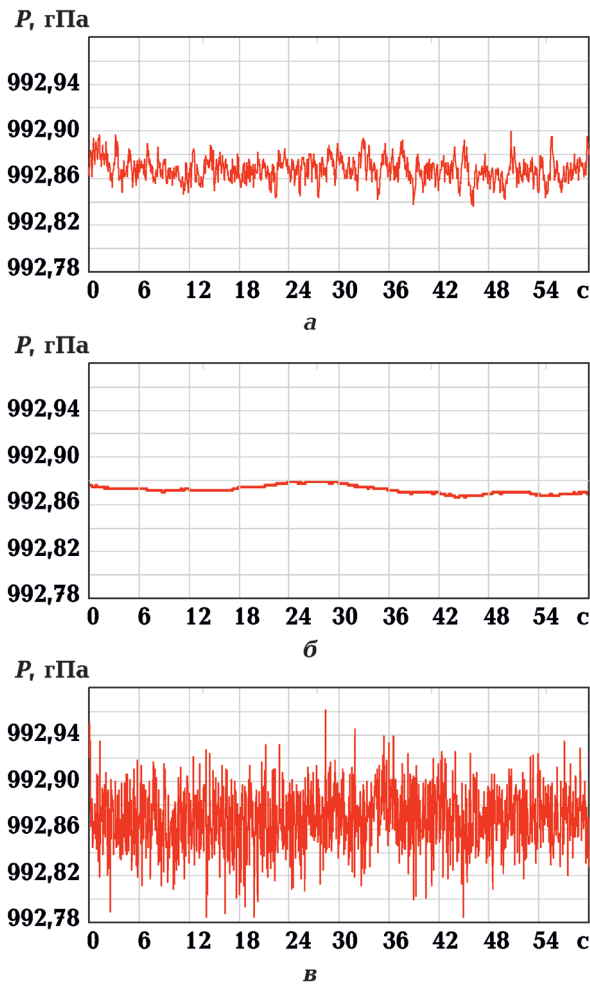


Рис. 3. Фрагменти часових записів власного шуму датчика BMP388 у стані спокою для різних параметрів передискретизації та фільтрації: а — для конфігурації А, б — для конфігурації В, в — для конфігурації С.

Fig. 3. Fragments of time records of the intrinsic noise of the BMP388 sensor in the quiescent state for different oversampling and filtering parameters: а — for configuration А, б — for configuration В, в — for configuration С.

рень найбільш ефективною є конфігурація А, оскільки вона мінімізує динамічну похибку при збереженні стабільності сигналу.

Результати спостережень природних джерел інфразвукових коливань. Для оцінювання здатності мікробарометричного датчика BMP388 реєструвати інфразвукові сигнали та атмосферні збурення було проведено тривалий моніторинг атмосферного тиску. Запис даних тривав понад 25 годин, розпочавшись о 20:00 (11 серпня 2025 р.) і завершившись о 21:00 наступного дня.

Для цього моніторингу датчик BMP388 було розміщено на відкритому балконі та налаштовано на помірні параметри передискретизації та фільтрації (конфігурація А) з урахуванням мінімізації шуму.

Аналіз даних часового ряду атмосферного тиску за весь період моніторингу (понад 25 годин) виявив значні барографічні варіації, що відповідають змінам погодних умов. На рис. 4 зображено зміни атмосферного тиску протягом 25 годин, які демонструють довготривалі зміни тиску, характерні для проходження атмосферних фронтів.

За період моніторингу, зокрема в нічний час, було зафіксовано атмосферне явище — дощ із грозами. На графіку тиску цій події відповідають дві помітні позитивні аномалії (підйоми тиску), що нагадують форму подвійного піку. Ці аномалії спостерігаються в інтервалі відліків 00:55—3:46 годин і можуть бути інтерпретовані як характерна зміна тиску грозового фронту. Відомо, що грози є потужними джерелами інфразвукових сигналів і барографічних імпульсів (атмосферних хвиль тиску, що поширюються від їхнього центру).

Проведений спектральний аналіз часового ряду атмосферного тиску для виявлення періодичних коливань у діапазоні інфразвукових частот (зазвичай від 0,01 до 20 Гц) і мікробарометричних варіацій (періоди від 1 хв до кількох годин) показав відсутність особливостей на спектрі. Аналіз отриманих даних свідчить, що під час

спостереження грозового фронту система реєструвала переважно низькочастотні зміни фонового атмосферного тиску. Відсутність виражених високочастотних коливань у межах роздільної здатності датчика унеможливорює однозначну ідентифікацію хвильових процесів (інфразвук), що може бути обумовлено апаратною чутливістю датчика.

Таким чином, проведене спостереження підтвердило здатність датчика BMP388 ефективно реєструвати тривалі барографічні зміни атмосферного тиску (як-от проходження грозового фронту). Водночас, датчик BMP388 не виявив чітких спектральних особливостей інфразвукових сигналів, що свідчить про необ-

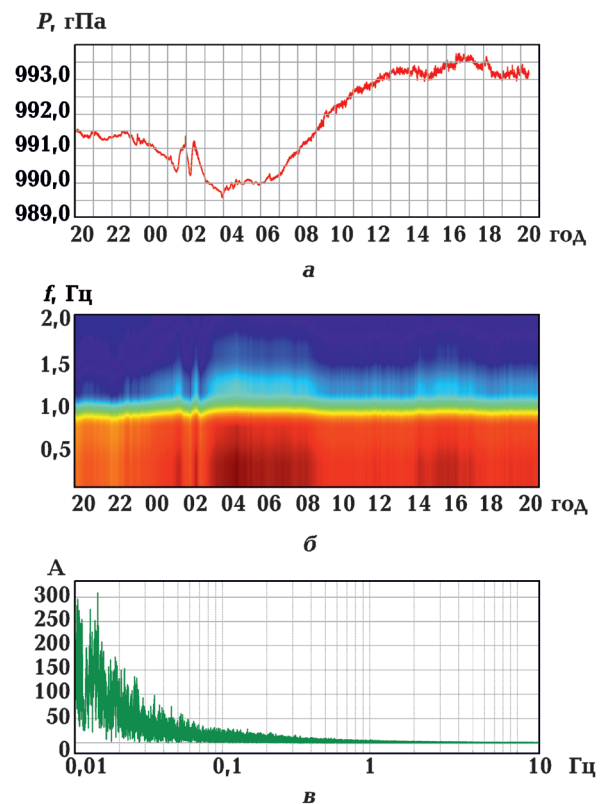


Рис. 4. Результати інфразвукових спостережень моніторингу атмосферного тиску: а — часові залежності атмосферного тиску; б — спектрограма часового ряду атмосферного тиску; в — спектр часового ряду атмосферного тиску.

Fig. 4. Infrasound observations of atmospheric pressure: а — time dependences of atmospheric pressure; б — spectrogram of the atmospheric pressure time series; в — spectrum of the atmospheric pressure time series.

хідність подальших досліджень для підвищення його чутливості до низькочастотних акустичних коливань.

Дослідження реакції датчика BMP388 на імпульсний вплив тиску. Для верифікації часової та амплітудної чутливості датчика BMP388 до швидких динамічних змін тиску, що імітують акустичні або інфразвукові імпульси, було проведено лабораторний експеримент із застосуванням невеликої медичної гумової груші, що імітувала акустичне збурення.

Датчик BMP388 було піддано серії контрольованих імпульсних впливів, які створювалися ручним стисканням гумової груші. Стиснене повітря спрямовувалося безпосередньо на сенсорний елемент датчика. Частота натискань підтримувалася відносно постійною для отримання чіткого спектрального піку. Для експерименту застосовано конфігурацію, оптимізовану для динамічних вимірювань (конфігурація С) з повною відсутністю фільтрації.

На рис. 5 представлено часовий ряд сигналів тиску, зареєстрованих датчиком BMP388 у відповідь на зовнішній імпульсний вплив від акустичного збурення внаслідок натискання медичної гумової груші. Результати аналізу зареєстрованих сигналів показали, що початковий (фоновий) атмосферний тиск $\approx 993,70$ гПа, максимальний тиск, зафіксований під час імпульсу $\approx 995,75$ гПа. Амплітуда зміни

тиску $\Delta P=2,05$ гПа. Отриманий результат підтверджує високу чутливість датчика BMP388 до миттєвих і відносно невеликих змін тиску (близько ≈ 2 гПа).

Спектральний аналіз хвильової форми сигналів від акустичного збурення показав, що створений потік повітряних мас призвів до формування імпульсних піків на графіку тиску. На спектрі (рис. 5, б) чітко домінує пік, що відповідає основній частоті повторення ручних натискань на гумову грушу. Основна частота, виявлена на спектрі, становить приблизно 1,5 Гц. Цей показник відповідає інфразвуковому діапазону і підтверджує здатність датчика BMP388 виявляти інфразвукові хвилі, що супроводжують різкі зміни атмосферного тиску.

Проведений експеримент демонструє, що мала інерційність датчика дає змогу вимірювати швидкоплинні динамічні процеси, приміром імпульсні впливи змін тиску. Реєстрація зміни тиску на 2,05 гПа та підтвердження основної частоти натискань на рівні 1,5 Гц у спектральній області доводить потенційну придатність цього мікробарометричного сенсора для реєстрації та аналізу динамічних атмосферних збурень, зокрема інфразвукові явища, за умов належної програмної обробки та фільтрації даних.

Дослідження роздільної здатності та чутливості датчика BMP388 до мікробарометричних коливань. Для перевірки

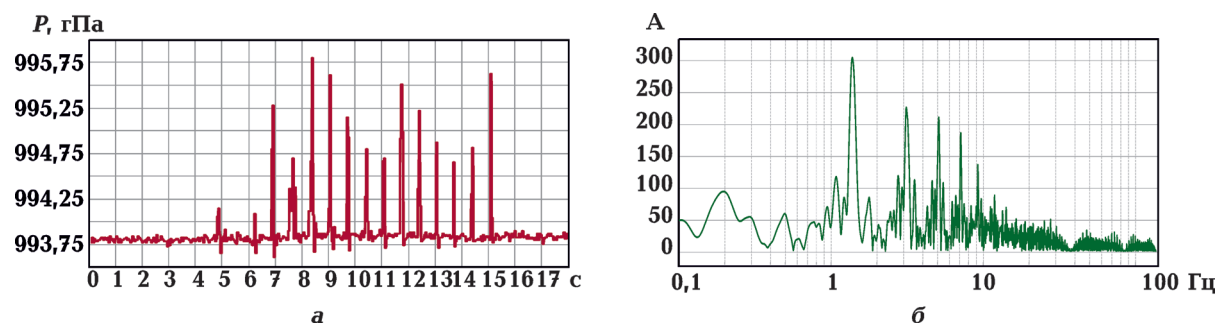


Рис. 5. Реакція датчика BMP388 на акустичне збурення внаслідок натискання медичної гумової груші: *a* — часові залежності хвильової форми сигналів від акустичного збурення; *б* — спектр хвильової форми сигналів від акустичного збурення.

Fig. 5. Response of the BMP388 sensor to acoustic disturbance due to pressing a medical rubber bulb: *a* — time dependences of the waveform of signals from acoustic disturbance; *б* — waveform spectrum of signals from acoustic disturbance.

роздільної здатності та чутливості мікробарометричного датчика BMP388 до мінімальних змін атмосферного тиску проведено лабораторний експеримент із контрольованим вертикальним переміщенням. Датчик було налаштовано на компромісні параметри (конфігурація А), що забезпечують баланс між шумозаглушенням та швидкістю реакції. Процедура: датчик BMP388 вручну піднімали та опускали на невелику фіксовану висоту, що становила $\Delta h \approx 0,8$ м, і реєстрували часовий ряд атмосферного тиску.

Аналіз часового ряду тиску, зареєстрованого під час циклічного вертикального переміщення, показав, що датчик BMP388 адекватно відреагував на зміну висоти, демонструючи чіткі періодичні коливання тиску (рис. 6). Середня амплітуда коливань тиску, зафіксована датчиком при переміщенні на 0,8 м, становила $\Delta P \approx 10$ Па.

Цей експеримент дає змогу кількіс-

но оцінити роздільну здатність датчика BMP388. Для порівняння, відомо, що зміна висоти на 1 м за наближеною барометричною формулою (за стандартних атмосферних умов на рівні моря та температури 15°C) відповідає зміні тиску $\approx 13,3$ Па. Відповідно, очікувана теоретична зміна тиску для $\Delta h \approx 0,8$ м становить $\Delta P \approx 10,6$ Па. Зареєстроване значення $\Delta P \approx 10$ Па виявилось близьким до теоретично очікуваного. Незначне відхилення у 0,6 Па знаходиться в межах відносної похибки вимірювання тиску датчиком (до 8 Па).

Для вивчення критичного впливу вбудованого цифрового фільтра на чутливість до мікробарометричних коливань експеримент із контрольованим вертикальним переміщенням на $\Delta h \approx 0,8$ м було повторено із використанням конфігурації С, що характеризується помірно передискретизацією та повністю відключеною ІІР-

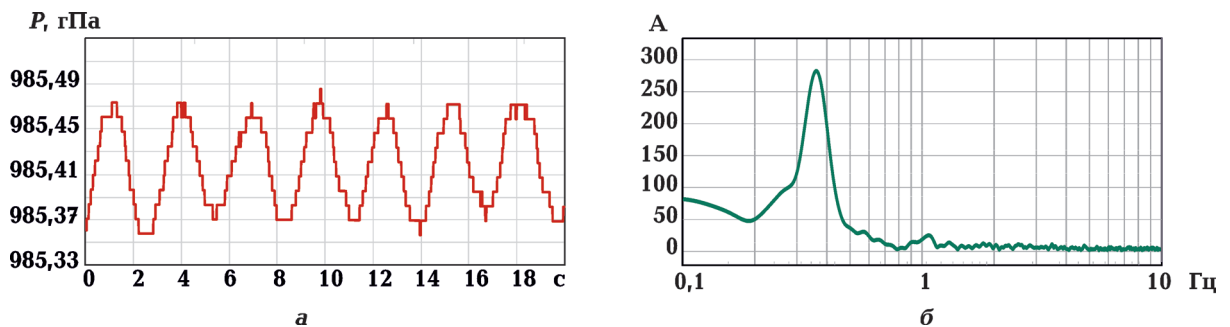


Рис. 6. Експеримент із контрольованим вертикальним переміщенням, конфігурація А: а — часові залежності хвильової форми сигналів; б — спектр хвильової форми сигналів.

Fig. 6. Experiment with controlled vertical movement, configuration A: a — time dependences of the waveform; б — spectrum of the wave form.

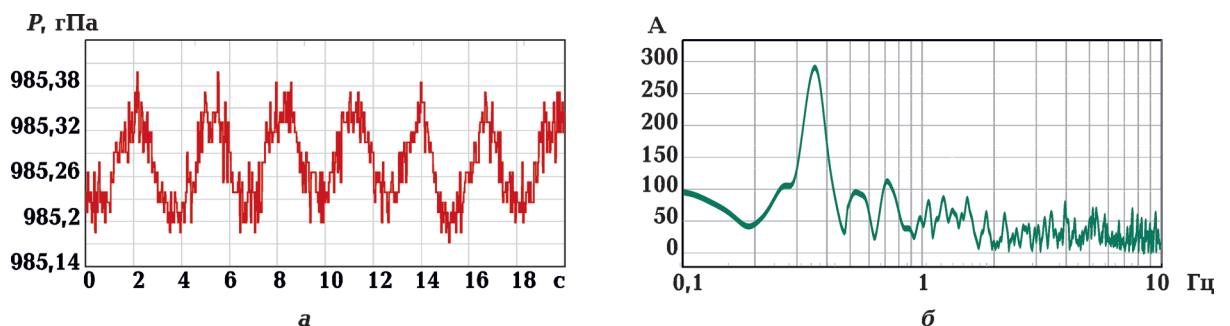


Рис. 7. Експеримент із контрольованим вертикальним переміщенням, конфігурація С: а — часові залежності хвильової форми сигналів, б — спектр хвильової форми сигналів.

Fig. 7. Experiment with controlled vertical movement, configuration C: a — time dependences of the waveform, б — spectrum of the wave form.

фільтрацією. Аналіз часового ряду тиску демонструє суттєве погіршення якості сигналу порівняно з конфігурацією А, де ІІР-фільтр був активний. На графіку тиску (рис. 7, а) спостерігається значний рівень шумових коливань сигналу. Це є наслідком відключення ІІР-фільтра, через що високочастотні складові власного електричного шуму вимірювального тракту не зазнають належного заглушення. За таких налаштувань розширена смуга пропускання дає змогу реєструвати повний спектр внутрішніх шумів датчика.

Через високий рівень шуму чітке виділення та кількісне оцінювання малої зміни тиску від вертикального руху (0,8 м) стає складною та ненадійною. Аналіз даних у конфігурації С показує, що амплітуда коливань, яка відповідає руху, є менш стабільною ($\Delta P \approx 10 \div 20$ Па), що свідчить про те, що власний апаратний шум маскує та спотворює корисний сигнал і перешкоджає проведенню прецизійних мікробарометричних вимірювань у цьому режимі.

Порівняльний спектральний аналіз (конфігурації А і С). Аналіз спектральних характеристик, отриманих для конфігурацій А (з ІІР-фільтром) і С (без ІІР-фільтра), підтвердив наявність корисного сигналу від механічного переміщення та чітко продемонстрував вплив ІІР-фільтра на співвідношення сигнал/шум. В обох випадках як з фільтром, так і без нього на спектральних характеристиках чітко виявлено пік на частоті $\approx 0,35$ Гц, який відповідає періоду ручного вертикального переміщення датчика (підняття—опускання). Період коливань становить $T = 1/0,35 \approx 2,85$ с.

Наявність піку на 0,35 Гц у конфігурації С свідчить, що корисний сигнал все ж таки був зареєстрований, проте має дещо вищий рівень шумів (див. рис. 7).

Порівняльний спектральний аналіз чітко демонструє, що ІІР-фільтрація не впливає на реєстрацію корисних низькочастотних сигналів (наприклад, 0,35 Гц), але є необхідною для придушення високочастотного шуму датчика, що безпосеред-

ньо призводить до суттєвого покращення співвідношення сигнал/шум у конфігурації А з ІІР-фільтром та дає змогу точніше кількісно оцінювати амплітуду мікробарометричних коливань.

Висновки. Результати експериментальних досліджень роботи мікробарометричного MEMS-датчика BMP388 дають можливість зробити такі висновки.

Встановлено, що датчик забезпечує стабільну реєстрацію барометричних сигналів амплітудою від 10 Па та є придатним для реєстрації як статичних, так і динамічних змін тиску. Барометричну роздільну здатність визначено шляхом успішної реєстрації мінімальних змін тиску ($\Delta P \approx 10$ Па або $\approx 0,08$ мм рт.ст.) при вертикальному переміщенні датчика лише на 80 см.

З'ясовано, що частота дискретизації 149 Гц (інтервал між відліками $\Delta t \approx 6,7$ мс) відрізняється від вказаного у технічній документації значення 200 Гц. Проте частота дискретизації 149 Гц забезпечує необхідну часову деталізацію для аналізу швидкоплинних атмосферних процесів. Зазначена частота дискретизації теоретично охоплює діапазон частот, характерний для швидких барометричних варіацій, і дає змогу досліджувати динаміку змін тиску без суттєвої втрати інформативності сигналу в обраному часовому масштабі.

Спектральний аналіз отриманих даних підтверджує здатність датчика BMP388 реєструвати динамічні зміни тиску, енергетичний спектр процесу яких зосереджений у низькочастотній області. Зафіксовані спектральні максимуми на частотах 1,5 Гц (під час імпульсного тесту) і 0,35 Гц (при циклічному вертикальному переміщенні) відповідають часовим характеристикам механічного впливу на датчик. Це доводить, що датчик BMP388 має достатню апаратну чутливість для реєстрації сигналів, спектральний склад яких охоплює діапазон від одиниць до десятків герц. Зазначені динамічні параметри дають можливість фіксувати швидкоплинні барометричні збурення.

Застосування вбудованої ІІР-фільтрації

є визначальним чинником для якісного динамічного моніторингу. Порівняльний аналіз конфігурацій А (фільтр активний) і С (фільтр вимкнений) показав, що відключення ІІР-фільтра призводить до зростання високочастотного шуму, що негативно впливає на співвідношення сигнал/шум навіть за умов високої передискретизації.

Показано, що оптимальне налаштування конфігурації (конфігурація А з коефіцієнтом фільтра 3) дає змогу ефективно пригнічувати шум сприяє ефективному пригніченню шуму, не впливаючи на реєстрацію корисного низькочастотного сигналу. Це забезпечує необхідну чистоту сигналу для коректної ідентифікації мікробарометричних подій.

Мікробарометричний MEMS-датчик

BMP388 є функціональною та бюджетною альтернативою дорогим інфразвуковим сенсорам. BMP388 може бути придатним для використання у децентралізованих мережах для оперативного моніторингу атмосферних збурень, зокрема грозової діяльності та інших інфразвукових явищ.

Для побудови мереж моніторингу пропонується використання конфігурації А як базової. Вона забезпечує оптимальний баланс між заглушенням власного шуму датчика та збереженням динаміки атмосферних процесів. Однак архітектура системи дає змогу програмно перемикатися на конфігурацію С у випадках, коли пріоритетом є реєстрація швидкоплинних збурень з максимальною часовою деталізацією.

Список літератури

- Albert, S.A. (2022). Atmospheric structure prediction for infrasound propagation modeling using deep learning. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002233. <https://doi.org/10.1029/2022EA002233>.
- Bass, H., Garces, M., Hedlin, M., D'Spain, G., Olson, J.V., Wilson, C., Osborne, D., Herrin, E.T., Golden, P.W., Whitaker, R.W., Revelle, D.O., & Bhattacharyya, J. (2003). Infrasound monitoring of atmospheric events. *Proc. of the 25th Seismic Research Review — Nuclear Explosion Monitoring: Building the Knowledge Base. September 23—25, 2003. Tucson, Arizona* (pp. 577—586).
- Eaton, W.P., & Smith, J.H. (1997). Micromachined pressure sensors: review and recent developments. *Smart Materials and Structures*, 6, 530—539.
- Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023) Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>.
- Hupe, P., Ceranna, L., Le Pichon, A., Matozza, R.S., & Mialle, P. (2022). International Monitoring System infrasound data products for atmospheric studies and civilian applications. *Earth System Science Data Discussions*, 14(9), 4201—4230. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-441>.
- Le Pichon, A., Blanc, E., & Hauchecorne, A. (Eds.). (2019). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 1167 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5>.
- Nishimura, R., Cui, Z., & Suzuki, Y. (2019). Portable infrasound monitoring device with multiple MEMS pressure sensors. *Proc. of the 23rd International Congress on Acoustics* (pp. 1498—1505).
- NextNav. Pinnacle. (2025). Режим доступу: <https://nextnav.com/pinnacle/> (дата звернення: 09.10.2025).
- Barometric pressure sensors for consumer electronics. Bosch Sensortec GmbH. (2023). Режим доступу: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/white_papers/whitepaper_barometric_pressure_sensors_for_ce.pdf.
- BMP388 Digital pressure sensor. Bosch Sensortec GmbH. (2018). Режим доступу: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp388-ds001.pdf>

Digital Barometer PTB330. (2026). Режим доступу: <https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/digital-barometer-ptb330>. (дата звернення: 26.01.2026).

Digiqartz Broadband Barometers. (2026). Режим доступу: https://paroscientific.com/pdf/D30_Series_1000_6000_9000.pdf (дата звернення: 26.01.2026).

Assessment of the potential of the BMP388 microbarometric MEMS sensor as a low-cost sensor for dynamic atmospheric pressure monitoring and detection of rapid disturbances

I.V. Kosyak, 2026

Institute for Information Recording of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article analyzes the operation of the BMP388 microbarometric MEMS sensor, which records pressure and temperature measurements and provides accurate altitude tracking. The study assesses the potential of this sensor as a low-cost alternative to traditional high-precision expensive devices used for dynamic geophysical monitoring and detection of low-frequency (infrasound) atmospheric pressure fluctuations. The relevance of the work is determined by the need to create low-cost, scalable networks for registering fast atmospheric disturbances, including infrasound, which is generated by a wide range of natural and anthropogenic sources. To verify the capabilities of the sensor, a series of studies were conducted by changing its internal settings (oversampling and IIR filtering), which are key factors for achieving the optimal signal-to-noise ratio in the dynamic range. The studies encompassed both long-term monitoring of natural barographic changes over a 25-hour data recording, which captured the characteristic dynamics of pressure variations (a double anomaly correlating with the passage of a thunderstorm front) and an analysis of the response to pulse pressure impact and the determination of microbarometric resolution. The main methodological conclusion is based on a comparison of configurations with activated and deactivated internal IIR filtering. Complete deactivation of the IIR filter led to the dominance of high-frequency noise in the spectrum and a significant decrease in signal-to-noise ratio, even when the useful low-frequency signal remains registered. Thus, active IIR filtering is a critical prerequisite for achieving high data quality in dynamic mode. The results substantiate the suitability of the BMP388 as a low-cost sensor for operational monitoring of atmospheric disturbances and demonstrate its potential for integration into more complex geophysical measurement systems.

Key words: BMP388, MEMS sensor, infrasound, dynamic monitoring, atmospheric pressure, IIR filtering.

References

- Albert, S.A. (2022). Atmospheric structure prediction for infrasound propagation modeling using deep learning. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002233. <https://doi.org/10.1029/2022EA002233>.
- Bass, H., Garces, M., Hedlin, M., D'Spain, G., Olson, J.V., Wilson, C., Osborne, D., Herrin, E.T., Golden, P.W., Whitaker, R.W., Revelle, D.O., & Bhattacharyya, J. (2003). Infrasound monitoring of atmospheric events. *Proc. of the 25th Seismic Research Review — Nuclear Explosion Monitoring: Building the Knowledge Base. September 23—25, 2003. Tucson, Arizona* (pp. 577—586).

- Eaton, W.P., & Smith, J.H. (1997). Micromachined pressure sensors: review and recent developments. *Smart Materials and Structures*, 6, 530—539.
- Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023) Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9, 156. <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00620-1>.
- Hupe, P., Ceranna, L., Le Pichon, A., Matozza, R.S., & Mialle, P. (2022). International Monitoring System infrasound data products for atmospheric studies and civilian applications. *Earth System Science Data Discussions*, 14(9), 4201—4230. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-441>.
- Le Pichon, A., Blanc, E., & Hauchecorne, A. (ed.). (2019). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 1167 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5>.
- Nishimura, R., Cui, Z., & Suzuki, Y. (2019). Portable infrasound monitoring device with multiple MEMS pressure sensors. *Proc. of the 23rd International Congress on Acoustics* (pp. 1498—1505).
- NextNav. *Pinnacle*. (2025). Retrieved from <https://nextnav.com/pinnacle/> (accessed: 09.10.2025).
- Barometric pressure sensors for consumer electronics*. Bosch Sensortec GmbH. (2023). Retrieved from https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/white_papers/whitepaper_barometric_pressure_sensors_for_ce.pdf.
- BMP388 Digital pressure sensor*. Bosch Sensortec GmbH. (2018). Retrieved from <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp388-ds001.pdf>
- Digital Barometer PTB330*. (2026). Retrieved from <https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/digital-barometer-ptb330>. (дата звернення: 26.01.2026).
- Digiquartz Broadband Barometers*. (2026). Retrieved from https://paroscientific.com/pdf/D30_Series_1000_6000_9000.pdf (accessed: 26.01.2026).