

УДК 623.746.5:629.735.05

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).53-58](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).53-58)

Д. Б. КУЧЕР, доктор технічних наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

Р. С. ПАШИНСЬКИЙ

<https://orcid.org/0009-0007-2589-3553>

(Інститут Військово-Морських Сил НУ «Одеська морська академія»)

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ПОРУШЕНЬ РОБОТИ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БПЛА ПРОТИВНИКА ЗОВНІШНІМ ВІБРАЦІЙНИМ ВПЛИВОМ

Метою статті є теоретичний аналіз та математичне моделювання фізичних механізмів порушення роботи MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) акселерометрів інерціальних навігаційних систем БПЛА під впливом зовнішнього вібраційного збудження резонансного характеру в умовах придушення Global Navigation Satellite System, GNSS сигналу засобами РЕБ. Методологія ґрунтується на динамічному моделюванні мікромеханічного акселерометра як коливальної системи другого порядку та аналізі передатних функцій у частотній області. Вібраційний вплив є перспективним та економічно обґрунтованим некінетичним доповненням до ешелюваної системи протиповітряної оборони.

Ключові слова: БПЛА, MEMS акселерометр, інерціальна навігаційна система, вібраційний вплив, резонанс, LRAD, некінетична протидія, похибка позиціонування.

ВСТУП

Сучасний характер збройних конфліктів, зокрема повномасштабної війни росії проти України, характеризується широким застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних класів від малих комерційних квадрокоптерів до ударних дронів-камікадзе типу Shahed-136, БПЛА типу Lancet та FPV-дронів. За даними відкритих джерел, лише у 2024–2025 роках противник застосував понад 30–40 тис. одиниць БПЛА-камікадзе, що робить їх одним із ключових засобів ураження критичної інфраструктури, позицій Збройних Сил України та цивільних об'єктів [6, 7].

Необхідність ефективної протидії БПЛА зумовлена тим, що традиційні засоби ППО є економічно нерациональними, так як один снаряд до ЗРК ППО може коштувати в десятки разів дорожче за БПЛА-ціль. Тому перспективним є пошук некінетичних, асиметричних методів порушення навігації БПЛА противника [6]. У більшій кількості сучасних БПЛА противника вико-

ристовується комбінована система навігації, яка складається з супутникової (Global Navigation Satellite System, GNSS), безплатформеної інерціальної навігаційної системи (БІНС) та в окремих випадках, оптичної чи радіолокаційної корекції [7, 8]. Умови активного радіоелектронного придушення GNSS сигналу змушують БПЛА переходити на автономний інерціальний режим польоту, де точність траєкторії повністю залежить від якості показань мікроелектромеханічних інерціальних вимірювальних блоків (Inertial Motion Unit, IMU). Це може свідчити, що порушення роботи акселерометрів та гіроскопів стає одним із перспективних напрямів асиметричної протидії БПЛА [8].

Мікроелектромеханічні акселерометри (MEMS), які становлять основу більшості IMU в комерційних та напівпрофесійних БПЛА противника, є механічними системами з підвішеною інерційною масою, чутливими до зовнішніх механічних збуджень. Дослідження останніх років [1–3] показали, що спрямований акустичний або вібраційний вплив на резонансних частотах (зазвичай 2–30 кГц для акселерометрів серій ADXL, MPU, ICM, BMI) призводить до двох основних типів порушень:

- введення постійного або повільного змінного зсуву показань, що накопичується в інтегральній навігації та викликає значне відхилення від розрахункової траєкторії;
- контрольоване спотворення сигналу, яке може імітувати хибні прискорення та змусити БПЛА відхилитися від курсу, втратити стабільність або здійснювати неконтрольовані маневри аж до звалювання.

На відміну від акустичних атак, які вже детально вивчені [1, 4, 5], вібраційний вплив залишається менш дослідженим, хоча має низку переваг: більшу дальність поширення в певних середовищах, меншу залежність від напрямленості джерела та потенціал інтеграції в наземні, мобільні чи навіть дронів системи протидії. В умовах щільного використання БПЛА противником створення зовнішнього вібраційного поля може стати дешевим доповненням до РЕБ та кінетичних засобів ураження [6].

Метою статті є аналіз фізичних механізмів порушення роботи MEMS-акселерометрів під впливом зовнішнього вібраційного збудження, оцінка вразливості типових IMU, що застосовуються в БПЛА противника (зокрема в БПЛА типу Shahed-136 та FPV-дронах), та оцінка практичної реалістичності такого методу протидії в реальних умовах бойового застосування.

Актуальність теми зумовлена не лише поточною війною, а й глобальною тенденцією до масового використання низьковартісних БПЛА в асиметричних конфліктах, де традиційні засоби ППО стають економічно неефективними. За статистикою, наведеною в [9], до 67 % відмов БПЛА пов'язані з відмовами механічних систем, з яких 53 % припадає на систему рушійної установки, що вказує на значну механічну вразливість платформи загалом. Розробка та впровадження некінетичних методів порушення навігації противника може суттєво підвищити ефективність протидії БПЛА за мінімальних витрат.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроелектромеханічні акселерометри MEMS є ключовим компонентом безплатформених інерціальних навігаційних систем сучасних БПЛА, зокрема тих, що застосовуються противником. Як зазначено у [7], INS на основі MEMS датчиків є основою побудови сучасних дронів завдяки їх здатності до швидкої та точної обробки даних, зокрема в умовах, де GPS-сигнал може бути недоступний або ненадійний. Це особливо актуально для польотів в урбанізованих зонах або в зонах з високим рівнем електромагнітних перешкод. MEMS акселерометри в складі IMU забезпечують вимірювання лінійних прискорень по трьох взаємно ортогональних осях, що необхідно для стабілізації польоту, компенсації дрейфу гіроскопів та інерціальної навігації в умовах придушення GNSS-сигналу [7, 8].

Структура сучасного ємнісного одноосевого акселерометра показана на рис. 1.

До складу такого акселерометра входять такі компоненти:

- 1 – чутлива (інерційна) маса;
- 2 – пружинні (торсіонні) підвіси;
- 3 – ємнісні контакти;
- 4 – нерухома частина датчика (якір).

Принцип роботи акселерометра заснований на визначенні зсуву інерційної маси (1) відносно нерухомих частини (4) з перетворенням його на пропорційний електричний сигнал ємнісним методом (рис. 1). Ємнісні контакти (3) акселерометра складаються з набору пластин, одні з яких нерухомі (прикріплені до якоря), інші вільно переміщуються разом з чутливою масою під дією сили гравітації або руху об'єкта (рис. 1, 2).

Пластини утворюють конденсатор, ємність якого змінюється в залежності від положення та відстані між пластинами (рис. 2).

Напруги $u_1(t)$ і $u_2(t)$ на електродах, що не рухаються, є вхідними. Напруга $u_3(t)$ на електродах, з'єднаних з інерціальною масою (рухомих електродах), є вихідним сигналом. Ємності обох конденсаторів залежать від зовнішнього прискорення і змінюються на величину $x(t)$

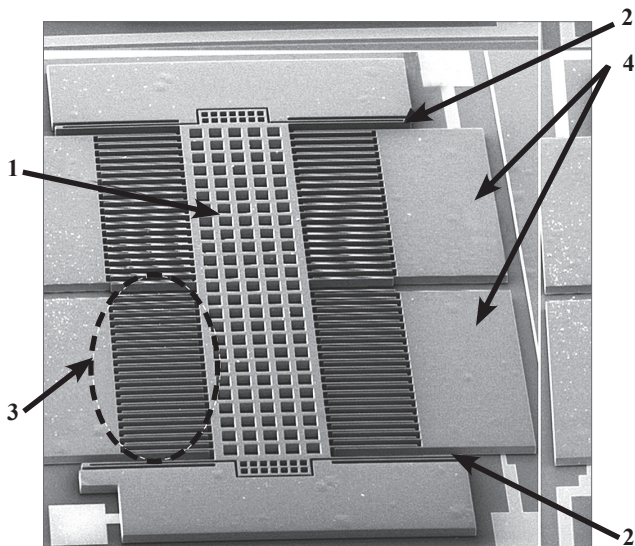


Рис. 1. Мікροфотографія одноосевого MEMS акселерометра

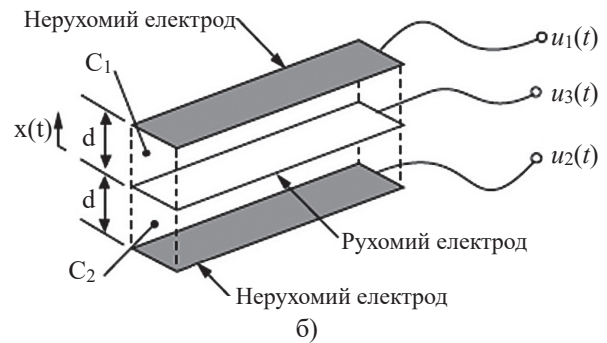
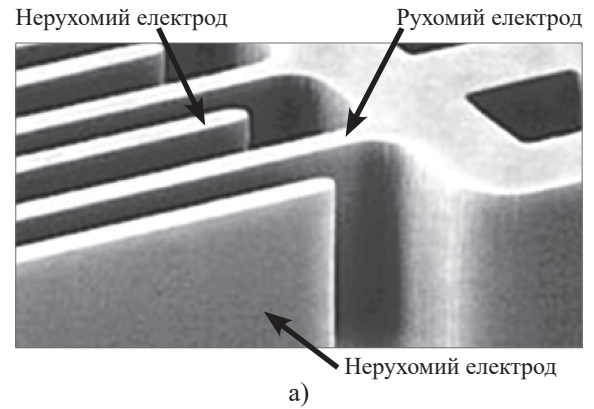


Рис. 2. Ємнісні контакти акселерометра: а) мікροфотографія; б) з'єднання електричних ємностей у контактах

(рис. 2б). Враховуючи, що відстань між пластинами d набагато більша за можливі переміщення інерційної маси $x(t)$ вздовж осі, можна зробити висновок, що отримана геометрія контактів являє собою ємнісний напівміст (так званий напівміст Шерінга), схема якого представлена на рис. 3.

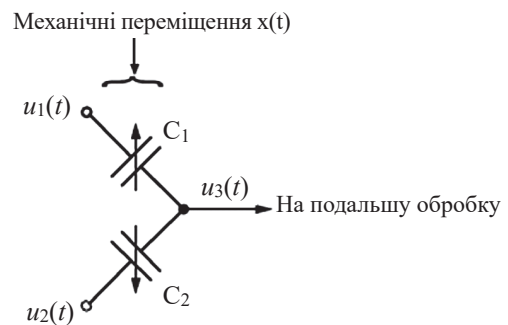


Рис. 3. Ємнісний напівміст, що формується геометрією пластин електродів акселерометра

Ємності двох конденсаторів, утворених рухомими та нерухомими пластинами акселерометра, визначаються зміщенням $x(t)$ інерційної маси:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d - x(t)}; \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{d + x(t)}, \quad (1)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала; ϵ – відносна діелектрична проникність між пластинами; A – ефективна площа пластини; d – номінальний зазор у стані спокою.

При умові $|x(t)| \ll d$ вихідна напруга ємнісного напівмосту лінійна [8]:

$$U_{\text{вих}} \approx U_{\text{ref}} \cdot \frac{x(t)}{d}. \quad (2)$$

Лінійна залежність означає, що будь-яке вібраційне збудження, яке модулює зміщення $x(t)$, безпосередньо потрапляє у вимірювальний канал як хибне прискорення.

З динамічної точки зору MEMS-акселерометр є коливальною системою другого порядку: підвищена інерційна маса m на пружинних підвісах жорсткістю k з в'язким демпфуванням. Власна резонансна частота [1–3]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3)$$

де k [Н/м] – ефективна жорсткість підвісів; m [кг] – маса. Для типових MEMS-акселерометрів, таких як: ADXL345, MPU-6050, ICM-42688, тощо, де $f_0 = 1\text{--}40$ кГц.

Передачна функція у частотній (нормованій) формі:

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \cdot 2\zeta \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}, \quad (4)$$

де K – статична чутливість [В/г]; $\omega_0 = 2\pi f_0$; ζ – коефіцієнт демпфування (0,3–0,7 для вакуумних MEMS-структур). При $\omega \rightarrow \omega_0$ амплітуда відгуку зростає у $Q = 1/(2\zeta)$ разів. Відповідно, зміщення показань акселерометра при вібраційному впливі амплітудою $A_{\text{ехт}}$:

$$\Delta\alpha \approx A_{\text{ехт}} \cdot \frac{K}{2\zeta}. \quad (5)$$

Похибки сучасних MEMS-акселерометрів включають [7]: нестабільність зсуву (50–500 мкг), випадкове блукання швидкості (шум приблизно дорівнює 100–500 мкг), похибка масштабного коефіцієнта (0,5–2 %).

Резонансні частоти MEMS-структур (1–40 кГц) роблять їх чутливими до вібрацій, особливо якщо частота збудження потрапляє в діапазон, де анти-аліасингові фільтри (це спеціальні фільтри низьких частот, які використовуються для запобігання явищу спотворення сигналу при дискретизації) на виході АЦП не фільтрують механічні резонанси, які проявляються як постійне зміщення нуля у цифровому сигналі, а не як високочастотний, ВЧ шум.

Важливим аспектом є механізм поширення зовнішнього вібраційного впливу від джерела до ІМУ в корпусі БПЛА. За результатами структурного аналізу вібрацій БПЛА, проведеного в роботі [9], вібраційна енергія від зовнішніх джерел збудження ефективно поширюється через конструкцію платформи. Авторами встановлено, що перша і друга власні частоти вигину крила типового БПЛА становлять 12,3 Гц та 17,5 Гц відповідно, а максимальні амплітуди коливань зосереджені на кінцях крил та поблизу двигуна. Суттєво, що доменна частота 23 Гц реєструвалась усіма шістьма акселерометрами, розташованими вздовж всієї конструкції, що підтверджує ефективну передачу вібраційної енергії по всій поверхні БПЛА [9]. Це означає, що зовнішнє вібраційне збудження може досягати ІМУ, навіть якщо БПЛА не контактує безпосередньо з джерелом.

Механічна трансдукція через корпус (контактна вібрація) є найефективнішим механізмом для наземних систем протидії. Вібрація передається безпосередньо

через кріплення плати ІМУ, корпус БПЛА або опорну поверхню. Резонансні властивості конструкції можуть підсилювати амплітуду в 5–20 разів.

Вихідні сигнали трьох акселерометрів БНС при наявності вібраційного впливу можна представити у вигляді [8]:

$$\begin{aligned} U_{ax} &= K_x (\alpha_x + \Delta\alpha_x) + U_{ax0} + n_{ax} U_{ay} = \\ &= K_y (\alpha_y + \Delta\alpha_y) + U_{ay0} + n_{ay} U_{az} = \\ &= K_z (\alpha_z + \Delta\alpha_z) + U_{az0} + n_{az}, \end{aligned} \quad (6)$$

де U_{ax} , U_{ay} , U_{az} – вихідні сигнали акселерометрів; α_x , α_y , α_z – проекції прискорення по осях; $\Delta\alpha_x$, $\Delta\alpha_y$, $\Delta\alpha_z$ – відхід акселерометрів під зовнішнім вібраційним впливом; K_x , K_y , K_z – масштабні коефіцієнти; U_{ax0} , U_{ay0} , U_{az0} – зміщення нулів; n_{ax} , n_{ay} , n_{az} – вплив зовнішніх вібраційних коливань.

Накопичена похибка позиції БПЛА внаслідок постійного зміщення показань акселерометра $\Delta\alpha$ (вібраційного зміщення) наростає квадратично в часі:

$$\delta P(t) = \frac{1}{2} \cdot \Delta\alpha \cdot t^2, \quad (7)$$

де $\Delta\alpha$ [м/с²] – штучно введений вібраційний зсув; t [с] – час автономного польоту. Числові приклади: при $\Delta\alpha \approx 0,2\text{г} \approx 2$ м/с² та $t = 30$ с: $\delta P = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 900 = 900$ м; при $\Delta\alpha \approx 0,5$ м/с² та $t = 60$ с: $\delta P = 900$ м.

Як показано в роботі [7], мікромеханічні ІНС без корекції за сигналами GNSS накопичують похибку до 3 м/хв. по горизонталі та 2 м/хв. по вертикалі, тобто здатні підтримувати прийнятну точність польоту лише на рівні 100–150 м протягом не більше 10 хв. Будь-яке додаткове зміщення нуля акселерометра суттєво прискорює цей процес.

Вразливість MEMS-акселерометрів набуває особливої практичної значущості в умовах сучасних бойових дій. Теоретичні механізми введення зсуву вихідних даних та контрольованого спотворення вихідного сигналу, підтверджені численними експериментами [1, 2], відкривають шлях до створення спеціалізованих засобів некінетичної протидії, здатних генерувати спрямоване акустичне або вібраційне поле на значних відстанях. Одним із найбільш ефективних і вже апробованих у практиці інструментів для реалізації такого впливу є Long Range Acoustic Devices (LRAD) – це спрямовані акустичні випромінювачі великої потужності (рис. 4).



Рис. 4. Спрямовані акустичні випромінювачі великої потужності (LRAD)

LRAD використовує масив п'єзоелектричних пєтворювачів, які генерують звук у фазі, що створює вузький спрямований промінь з концентрацією енергії вперед. Робоча частота LRAD, переважно 2–3 кГц, обрана як компроміс між шириною променя та поглинанням у повітрі. Частоти понад 10 кГц швидко згасають на відстанях понад 100–200 м [6]. Розглядається як потенційний засіб порушення роботи MEMS акселерометрів та гіроскопів дронів через резонансний акустичний вплив.

Рівень звукового тиску LRAD на відстані r від джерела визначається через геометричне та молекулярне загасання:

$$L_p(r) = L_0 - 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - \alpha \cdot (r - r_0), \quad (8)$$

де L_0 – рівень тиску на опорній відстані $r_0 = 1$ м; α – коефіцієнт молекулярного поглинання (при $f = 2,5$ кГц; $\alpha \approx 0,005\text{--}0,01$ дБ/м). Приклад: $r = 100$ м, $f = 2,5$ кГц $\rightarrow L_p \approx 143 - 40 - 0,5 \approx 102,5$ дБ – рівень, достатній для дестабілізації незахищеного MEMS IMU.

Дослідження з питань акустичного придушення автономних навігаційних систем БПЛА, засновані на аналізі мікромеханічних інерціальних систем, показали реальність цього підходу [8]. Зокрема, вченими з інституту KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) було встановлено, що гіроскоп як механічна система має свою резонансну частоту, і підібраний за частотою акустичний вплив може викликати резонанс у гіроскопі, що призведе до його неправильної роботи та видачі помилкових навігаційних даних.

Результати аналізу 15 найпоширеніших моделей MEMS-гіроскопів та акселерометрів у комерційних малих БПЛА показали, що 47 % з них схильні до резонансу [8], який впливає на канал орієнтації в горизонтальній площині.

Метод зовнішнього вібраційного впливу на MEMS акселерометри БІНС БПЛА противника є перспективним напрямком некінетичної протидії [6, 8]. Переваги методу полягають в тому, що він доповнює РЕБ, не залежить від радіоканалів, працює проти GNSS-незалежних БПЛА, при цьому, як зазначено в [6], традиційні засоби РЕБ стають менш ефективними в міру підвищення автономності БПЛА. Використання портативних LRAD-подібних систем або тактильних вібраторів, значно дешевших за ракети ППО, дозволяє впливати одночасно на кілька дронів у секторі та викликає дезорієнтацію навіть без прямого впливу на IMU.

Обмеження методу включають: необхідність знати резонансну частоту конкретного IMU, залежність від відстані та атмосферних умов, можливу адаптацію конструкторами БПЛА противника (встановлення поглинаючих матеріалів, вібраційної ізоляції IMU, алгоритмів цифрової фільтрації). Крім того, слід враховувати, що в середніх та важких БПЛА з повноцінною інтегрованою навігаційною системою порушення одного каналу, як правило, виявляється системою і компенсується [7].

ВИСНОВКИ

Теоретичні моделі та чисельне моделювання підтверджують, що зовнішнє прискорення амплітудою 0,2–3g

на резонансній частоті достатнє для суттєвого спотворення вихідного сигналу MEMS-акселерометра [1–3]. Експериментальні дані з літератури [1, 4, 5] та аналогічні випробування показують, що таке спотворення призводить до швидкого накопичення похибки позиції (50–500 м за 30–120 с автономного польоту), втрати стабільності та, в багатьох випадках, звалювання БПЛА у штопор.

Практична ефективність методу в бойових умовах суттєво визначається класом цілі. Для малих низьковисотних апаратів, таких як FPV та окремі модифікації БПЛА типу Lancet вона є високою і ймовірність зриву траєкторії польоту або падіння сягає від 70 до 90 %. Для середніх безпілотників камікадзе показник результативності є середнім і становить від 30 до 60 %. Стосовно великих систем дальньої дії типу Shahed 136 результативність оцінюється як низька або середня і варіюється від 10 до 50 % лише за умови польоту на малій висоті та інтенсивного енергетичного впливу. Ці оцінки узгоджуються з аналізом структурної вразливості БПЛА різних класів, наведеним у [9, 10].

Наразі метод вібраційного впливу не є універсальним засобом протидії, але має значний потенціал як дешеве та асиметричне доповнення до існуючих систем РЕБ, кінетичних засобів ППО, FPV-перехоплювачів та акустичного виявлення. Його інтеграція в ешелоновану систему протиповітряної оборони може суттєво підвищити загальну ефективність знищення або відведення БПЛА противника, особливо в умовах масованих нічних атак [6, 8].

Для реалізації методу потрібні портативні LRAD-подібні системи потужністю понад 140 дБ, з частотою випромінювання від 2 до 30 кГц.

Отримані результати підтверджують, що зовнішній вібраційний вплив є реальним і технічно досяжним механізмом порушення роботи навігаційних систем БПЛА противника. Його подальша розробка та впровадження може стати важливою складовою асиметричної відповіді на масове застосування противником БПЛА в сучасній війні [6, 7].

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Trippel, T., Weisse, O., Xu, W., Honeyman, P. & Fu, K. (2017). WALNUT: A Jolt to the Ear Makes Drones Fall from the Sky. Proc. of the 10th ACM Conf. on Security & Privacy in Wireless and Mobile Networks (WiSec). Pp. 3–15.
2. Jeong, S. (2023). Don't Knock! Rowhammer at the Fingertips of Android Smartphones. IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P). Pp. 101–115.
3. Guo, Q., Wang, Y. & Li, J. (2021). A Survey on Sensor Attacks on MEMS-Based IMU. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. Vol. 18. No. 2. Pp. 1001–1016.
4. Son, Y., Shin, H. & Kim, D. (2015). Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors. USENIX Security Symposium. Pp. 881–896.
5. Nashimoto, S. (2018). Sensor CON-Fusion: Defeating Kalman Filter in Signal Injection Attack. ACM ASIACCS. Pp. 511–524.

6. Mathur, A. (2022). Drones & Counter-Drone Systems. New Delhi : Centre for Air Power Studies. New Delhi Paper No. 10. 152 p.
7. Долінце Б.І. Методи та засоби підвищення точності обробки інформації в бортових підсистемах БПЛА : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.05. Нац. авіаційний ун-т. Київ. 2024. 215 с.
8. Шум А.В. Аналіз стійкості навігаційних систем БПЛА : кваліфікаційна робота магістра. Харківський нац. ун-т радіоелектроніки. Харків. 2024. 71 с.
9. González-Cabrera, S.I., Camacho-Zamora, N. & Rojas-Ramirez, S.-R. (2026). Structural Vibration Analysis of UAVs under Ground Engine Test Conditions. Sensors. Vol. 26. No. 2. Art. 583. <https://doi.org/10.3390/s26020583>.
10. Evdokimenkov, V.N., Kozorez, D.A. & Rabinskiy, L.N. (2021). Unmanned aerial vehicle evasion maneuvers from enemy aircraft attack. J. of the Mechanical Behavior of Materials. Vol. 30. Pp. 87—94. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0009>.
11. Fractal Antenna Systems. Acoustic Resonance Machine (ARM) for Counter-UAV Applications. 2025. URL: <https://www.fractenna.com>.

REFERENCES

1. Trippel, T., Weisse, O., Xu, W., Honeyman, P. & Fu, K. (2017). WALNUT: A Jolt to the Ear Makes Drones Fall from the Sky. Proc. of the 10th ACM Conf. on Security & Privacy in Wireless and Mobile Networks (WiSec). Pp. 3—15.
2. Jeong, S. (2023). Don't Knock! Rowhammer at the Fingertips of Android Smartphones. IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P). Pp. 101—115.
3. Guo, Q., Wang, Y. & Li, J. (2021). A Survey on Sensor Attacks on MEMS-Based IMU. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. Vol. 18. No. 2. Pp. 1001—1016.
4. Son, Y., Shin, H. & Kim, D. (2015). Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors. USENIX Security Symposium. Pp. 881—896.
5. Nashimoto, S. (2018). Sensor CON-Fusion: Defeating Kalman Filter in Signal Injection Attack. ACM ASIACCS. Pp. 511—524.
6. Mathur, A. (2022). Drones & Counter-Drone Systems. New Delhi : Centre for Air Power Studies. New Delhi Paper No. 10. 152 p.
7. Dolintse, B.I. “Metody ta zasoby pidvychnennia tochnosti obrobky informatsii v bortovykh pidsystemakh BpLA” [Methods and means of increasing the accuracy of information processing in onboard UAV subsystems]. Candidate's thesis in Technical Sciences. Nat. Aviation Univ. K. 2024. 215 p.
8. Shum, A.V. “Analiz stiikosti navihatsiinykh system BpLA” [Stability analysis of UAV navigation systems]. Master's thesis. Kharkiv Nat. Univ. of Radio Electronics. Kharkiv. 2024. 71 p.
9. González-Cabrera, S.I., Camacho-Zamora, N. & Rojas-Ramirez, S.-R. (2026). Structural Vibration Analysis of UAVs under Ground Engine Test Conditions. Sensors. Vol. 26. No. 2. Art. 583. <https://doi.org/10.3390/s26020583>.

Kucher D.B., Pashynskiy R.S.

ON THE POSSIBILITY OF DISRUPTING ADVERSARIAL UAV NAVIGATION SYSTEM ACCELEROMETERS VIA EXTERNAL VIBRATIONAL IMPACT

The purpose of this article is the theoretical analysis and mathematical modelling of physical mechanisms behind the disruption of MEMS accelerometers in UAV inertial navigation systems under external resonant vibrational excitation in conditions where GNSS signals are suppressed by electronic warfare means. The methodology is based on dynamic modelling of the MEMS accelerometer as a second-order oscillatory system and transfer function analysis in the frequency domain. It is demonstrated that excitation at sensor resonant frequencies (2–30 kHz, typical for ADXL, MPU, ICM series) causes two types of disruption: output biasing (a constant or slowly varying zero offset) and output control (controlled signal distortion). The positioning error of the UAV is shown to grow quadratically over time, reaching 50–900 m within 30–120 s of autonomous flight. An analysis of vibration energy propagation through the UAV airframe confirms that external excitation can effectively reach the IMU without direct contact with the source. The practical feasibility of using Long Range Acoustic Devices (LRAD, sound pressure level ≥ 102.5 dB at 100 m) as an asymmetric non-kinetic countermeasure is substantiated. Differentiated effectiveness is established: high (70–90 %) against small FPV systems; moderate (30–60 %) against kamikaze UAVs; low-to-moderate (10–50 %) against large long-range platforms such as Shahed-136. Vibrational disruption is concluded to be a cost-effective non-kinetic complement to layered air defence, particularly against GNSS-independent autonomous platforms.

Keywords: UAV, MEMS accelerometer, inertial navigation system, vibrational disruption, resonance, LRAD, non-kinetic countermeasure, Shahed-136, output biasing, positioning error.

Відомості про авторів:**Кучер Дмитро Борисович**

доктор технічних наук, професор
Інститут Військово-Морських Сил
Національного університету
«Одеська морська академія»
м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

Пашинський Роман Сергійович

Інститут Військово-Морських Сил
Національного університету
«Одеська морська академія»
м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-2589-3553>

Information about the authors:**Kucher Dmytro**

Doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of Naval Forces
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8728-8865>

Pashynskyi Roman

Institute of Naval Forces
National University «Odessa Maritime Academy»
Odessa, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-2589-3553>

Стаття надійшла до редколегії 04.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.