

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ  
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL  
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE



***В І С Н И К***

***ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ***

***ВИПУСК 4***

***BULLETIN OF ENGINEERING  
ACADEMY OF UKRAINE***

***Issue 4***

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ  
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL

## ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE

**Журнал друкує статті науковців вузів та установ України, інших країн відповідно до рубрик:**

Авіаційна і космічна техніка  
 Військово-технічні проблеми  
 Геологія, видобування та переробка корисних копалин  
 Інженерні проблеми агропромислового комплексу  
 Інформаційні системи, обчислювальна й електронна техніка, системи зв'язку та приладобудування  
 Матеріалознавство  
 Машинобудування  
 Медична інженерія  
 Металургія  
 Охорона навколишнього середовища (інженерна екологія) і ресурсозбереження  
 Стандартизація, метрологія і сертифікація  
 Будівництво та будіндустрія  
 Технологія легкої промисловості  
 Технологія харчової промисловості  
 Хімічні технології й інженерна біотехнологія  
 Економіка, право та керування в інженерній діяльності  
 Енергетика  
 Освіта та виховання

**Journal submits articles of researchers of universities and institutions of Ukraine and other countries in accordance with headings:**

Aviation and Space Engineering  
 Military-technical problems  
 Geology, Mining and Processing of Minerals  
 Engineering Problems of Agroindustrial Complex  
 Information systems , computers and electronic equipment , communication systems and instrumentation  
 Material Science  
 Mechanical Engineering  
 Medical Engineering  
 Metallurgy  
 Preservation of Environment (Ecological Engineering) and Resource Saving  
 Standardisation, Metrology and Certification  
 Building and Construction Engineering  
 Technology of Light Industry  
 Technology of Food Industry  
 Chemical Technologies and Engineering Biotechnology  
 Economics, law and management in engineering  
 Energetics  
 Education and training

Матеріали друкуються українською, російською або англійською мовами.

Materials are submitted in Ukrainian, Russian or English languages.

Номер затверджено на засіданні Вченої ради Кіровоградського національного технічного університету

The issue is approved at the meeting of Academic Council of Kirovograd National Technical University

Протокол № 3 від 29.10.2018р  
 Вісник Інженерної академії України включений у новий Перелік наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук в галузі технічних наук (Наказ МОН України від 13.07.2015р. №747)

Protocol No.3 dated 29.10.2018  
 Bulletin of Engineering academy of Ukraine is included into the new List of Scientific special editions of Ukraine, in which results of dissertation works may be published for to be conferred with academic degrees of doctor and candidate of sciences in the field of engineering sciences (Decree of Ministry Education and Science of the Ukraine No.747 dated 13.07.2015)

Співзасновники:  
 Кіровоградський національний технічний університет  
 Інженерна академія України  
 Одеська державна академія технічного регулювання та якості

Cofounders:  
 Kirovograd National Technical University  
 Engineering Academy of Ukraine  
 Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

ISSN 2519-8793 ISSN 2519-8793

**Редакційна колегія:**

Головний редактор – д.т.н., проф. **В.П. Квасніков**  
 Відповідальний секретар – к.т.н. **В.І. Савченко**  
 Редактор – **П.П.Дубина**

**Члени редколегії:**

**А.І. Бабушкін** - д.т.н., проф. (авіаційна і космічна техніка),  
**Л.Р. Вишняков** – д.т.н. (матеріалознавство),  
**Р.Б. Гевко** - д.т.н., проф. (машинобудування),  
**В.Л. Дикань** - д.т.н., проф. (економіка, право та управління в інженерній діяльності),  
**В.В. Древецький** - д.т.н., проф. (інформаційні системи, обчислювальна й електронна техніка, системи зв'язку та приладобудування),  
**Ігор Емрі** - доктор, проф. (директор Інституту стійких інноваційних технологій, Словенія),  
**М.Ю. Ізбаши** - д.т.н., проф. (будівництво і будіндустрія),  
**Л.В. Коломієць** – д.т.н., проф. (стандартизація, метрологія і сертифікація),  
**В.І. Литвиненко** - д.х.н. (хімічні технології та інженерна біотехнологія),  
**А.П. Мельник** - д.т.н., проф. (нафтогазові тех.ї),  
**В.М. Мельник** - д.т.н., проф. (геологія, добування та переробка корисних копалин),  
**Й.С. Мисак** - д.т.н., проф. (енергетика),  
**О.О. Панасенко** - д.т.н., проф. (водне господарство і гідротехніка),  
**В.В. Соловей** - д.т.н., проф. (охорона навколишнього середовища і ресурсозбереження),  
**В.І. Ступа** - д.т.н., проф. (технологія легкої промисловості),  
**О.К. Тришин** - академік УААН, д.с/г.н., проф. (інженерні проблеми АПК),  
**М.І. Хвисьюк** - д.м.н., проф. (медична інженерія),  
**О.І. Черевко** - д.т.н., проф. (технологія харчової промисловості),  
**М.І. Черновол** – член-кор. УААН, д.т.н., проф. (матеріалознавство),  
**С.Л. Ярошевський** - д.т.н., проф. (металургія).

**Editorial board:**

Editor-in-chief – Dr. of Eng., Prof. **V.P. Kvasnikov**  
 Executive secretary – Cand. of Eng. **V.I. Savchenko**  
 Editor – **P.P. Dubyna**

**Members of editorial board:**

**A.I. Babushkyn** – Dr. of Eng., Prof. (Aviation and Space Engineering),  
**L.R. Vyshniakov** - Dr. of Eng (Material Science),  
**R.B. Gevko** – Dr. of Eng., Prof. (Mechanical Engineering),  
**V.L. Dykan**’ - Dr. of Eng., Prof. (Economics, law and management in engineering),  
**V.V. Drevets'kyi** - Dr. of Eng., Prof. ( Information systems , computers and electronic equipment , communication systems and instrumentation),  
**Ihor Emri** – Dr., Prof. ( Director of the Institute of sustainable innovative technologies, Slovenia),  
**M.Yu. Izbashi** - Dr. of Eng., Prof. ( Building and Construction Engineering),  
**L.V. Kolomiets** – Dr. of Eng., Prof. (Standardisation, Metrology and Certification),  
**V.I. Lytvynenko** – Dr. of Chem. (Chemical Technologies and Engineering Biotechnology),  
**A.P. Melnyk** – Dr. of Eng., Prof. (Oil-and-Gas Technologies),  
**V.M. Melnyk** – Dr. of Eng., Prof. (Geology, Mining and Processing of Minerals),  
**I.S. Mysak** – Dr. of Eng., Prof. (Power Engineering),  
**O.O. Panasenko** – Dr. of Eng., Prof. ( Water management and hydraulic engineering ),  
**V.V. Solovey** – Dr. of Eng., Prof. (Preservation of Environment (Ecological Engineering) and Resource Saving),  
**V.I. Stupa** – Dr. of Eng., Prof. (Technology of Light Industry),  
**O.K. Tryshyn** - academician of UAAS, Dr. of agriculture, Prof. ( Engineering Problems of Agroindustrial Complex),  
**M.I. Khvysuk** – Dr. of Med., Prof. (Medical Engineering),  
**O.I. Cherevko** - Dr. of Eng., Prof. ( Technology of Food Industry),  
**M.I. Chernovol** – A corresponding-member of UAAS, Dr. of Eng., Prof. (Material Science),  
**S.L. Yaroshevsky** – Dr. of Eng., Prof. (Metallurgy).

Підписано до друку 31.10.2018р.

Ціна договірної

Адреса редакції: просп. Космонавта Комарова, 1,  
 корп. 11, кімн. 402, м. Київ, 03680, Україна

Тел.: +38(044)406-71-58

E-mail: kvp@nau.edu.ua

Signed for printing on 31.10.2018

Agreed price

Address of Editorial Staff: Cosmonaut Komarov St., 1,  
 build. 11, 402 room, Kyiv, 03680, Ukraine

Tel.: +38(044)406-71-58

E-mail: kvp@nau.edu.ua

УДК 621.317.08

А.В. Рудик, д.т.н.,  
Н.І. Лісовець

## АКСЕЛЕРОМЕТРИ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ – ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне),  
[a.v.rudyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.v.rudyk@nuwm.edu.ua)

*В статті розглянуто основні технічні параметри акселерометрів та представлено порівняльний аналіз різних технологій акселерометрів. Для задач мобільної робототехніки найкращими на даний час за характеристиками є поверхневі ємнісні акселерометри. На основі проведеного огляду сучасного стану і технологій виробництва акселерометрів представлена їх класифікація. З'ясовано, що на даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів (при зменшенні загальної ціни сучасної системи на їх основі та кількості зовнішніх дискретних елементів). В розвитку МЕМС актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікроелектронних та мікроелектронних пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції. Подальша еволюція МЕМС буде полягати в інтеграції виконавчих елементів, сенсорів тиску, магнітного поля та ін. При вірному врахуванні властивостей та особливостей акселерометра, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи мобільного робота, що характеризують його здатність детектувати нахил, рух, положення, вібрацію та удар.*

**Ключові слова:** акселерометр, мобільний робот, прискорення, мікроелектромеханічна система, ємнісний сенсор, п'єзорезистивний сенсор, п'єзоелектричний сенсор.

### Вступ

Акселерометр є сенсором, який використовується для вимірювання прискорення або сили, викликаного прискоренням інерційної маси. Фізичною моделлю акселерометра є сейсмічна (інерційна) маса, підвішена на закріпленій в нерухомому корпусі пружині (елементарною коливальною системою з одним ступенем свободи  $x$  в напрямку вимірювальної осі). При дії прискорювальної сили  $F$  інерційна маса  $m$  набуває прискорення  $a$ , тоді за другим законом Ньютона  $F = ma$ .

Сила пружності (жорсткості) пружини в цій моделі зрівноважує (демпфує) переміщення інерційної маси  $m$  відносно корпусу, тобто  $F = kx$ , де  $k$  – жорсткість пружини,  $x$  – переміщення маси  $m$  відносно вихідного положення. З останніх двох формул слідує, що  $a = x \cdot \frac{k}{m}$ , де  $\frac{k}{m}$  – конструктивний параметр сенсора.

Відповідно до даної елементарної моделі однією з основних класифікаційних ознак акселерометрів є відмінність у способах отримання електричного сигналу при детектуванні руху інерційної маси [1].

### Постановка задачі

В статті необхідно:

- 1) провести порівняльний аналіз та огляд сучасного стану різних технологій виробництва акселерометрів для задач мобільної робототехніки, на основі якого розробити класифікацію акселерометрів;
- 2) провести порівняльний аналіз переваг та недоліків різних технологій акселерометрів;
- 3) розглянути вплив врахування властивостей і особливостей акселерометра, характерних для даної технології, на його здатність детектувати нахил, рух, положення, вібрацію та удар.

### Викладення основного матеріалу

Відомі різні фізичні принципи та схеми детектування, які успішно використовуються для створення акселерометрів – п'єзоелектричні, п'єзорезистивні, ємнісні, електромагнітні, магнітні (ефект Холла, магніторезистори), резонансні та конвекційні (теплові акселерометри *Memsic*). Розроблено багато альтернативних технологій акселерометрів – індуктивні, магнітострикційні, пристрої на поверхневих

акустичних хвилях (ПАХ), оптичні та тунельні [2-5].

Традиційно системи керування мобільних роботів (МР) діляться на однокоткові (*single-point system*), з розташуванням акселерометрів та інших сенсорів в одному місці всередині діагностичного модуля, та багатокоткові або мультисенсорні (*multi-point system*), тобто системи з дистанційним розташуванням декількох сенсорів. Сучасні системи керування МР переважно реалізуються за однокотковим виконанням, яке характеризується низькою ціною і високоточним детектуванням прискорень.

На даний час технологічний рівень МЕМС-акселерометрів значно виріс – нові компоненти вартістю (1...10)\$ при масовому виробництві характеризуються високим рівнем інтеграції, покращенням характеристик і додаванням нових функцій. Такі інтегральні акселерометри реалізуються при розташуванні на одному кристалі триосьового сенсорного елемента та пристроїв обробки, що забезпечує виконання однією інтегральною схемою (ІС) з кількома зовнішніми дискретними компонентами функцій сенсора, електричної обробки сигналу, самотестування, калібрування і програмування (кошують такі ІС на порядок менше, ніж спеціалізовані пристрої).

Оптичні акселерометри є інтерферометричними МЕМС-сенсорами, принцип дії яких оснований на освітленні когерентними світловими хвилями від промислових лазерних діодів поверхневої кремнієвої структури та отриманні групи дифрагованих оптичних променів, що реєструються фотодетекторами [6]. Їх перевагою є роздільна здатність порядку одиниць  $mkg$ .

Тунельні акселерометри є мініатюрними та високочутливими сенсорами з високою роздільною здатністю порядку  $1 \text{ \AA}$ , принцип дії яких оснований на електронному тунелюванні, розробленому для використання у тунельних мікроскопах. У таких сенсорах гострий металевий накінецьник розташований приблизно на  $10 \text{ \AA}$  вище металевої поверхні. При наявності постійної напруги зміщення між накінецьником та поверхнею протікає тунельний струм приблизно  $1 \text{ нА}$ . Невеликі зміни відстані між накінецьником і поверхнею порядку  $1 \text{ \AA}$  приводять до значних змін тунельного струму порядку (10...50)%. Типовий тунельний акселерометр поєднує інерційну масу, консоль і схему зворотного зв'язку (сервоакселерометр).

В історії розвитку акселерометрів значну роль відіграли електромеханічні сенсори лінійного прискорення з металевою кулею в якості інерційної маси, що переміщується в трубчастій порожнині (*ball-in-tube sensor*) [7-9].

Найбільш поширеними є електромеханічні акселерометри двох типів:

- з кулею та магнітом зміщення: при значному уповільненні куля котиться вперед, долаючи утримує її магнітне поле, і замикає електричні контакти на другому кінці порожнини, активуючи електронну схему сенсора [9, 10];

- з кулею та пружинним контактним елементом для зміщення, який при значному уповільненні замикає другий контакт, який штовхається кулею, що за інерцією продовжує рухатися вперед, долаючи зміщення [9, 11].

Недоліком електромеханічних сенсорів є значні геометричні розміри, невисока технологічність складних конструкцій і відносно висока ціна. Однак електронні сенсори типу *ball-in-tube* характеризуються відносно низькочастотною робочою характеристикою (на відміну від п'єзоелектричних, п'єзорезистивних та ємнісних акселерометрів), тобто не потребують фільтрації вихідного сигналу.

На даний час провідні розробники сенсорів для мобільної робототехніки та машинобудування проектують сенсори на основі мікропереміщення мініатюрної кульки інерційної маси всередині інтегральної схеми, тому для даної галузі найбільш актуальними є п'єзоелектричні, п'єзорезистивні та ємнісні акселерометри.

Принцип дії *п'єзоелектричних* (ПЕ) акселерометрів оснований на прямому п'єзоелектричному ефекті. Залежно від конструкції та призначення сенсора для отримання при даній детектованій дії максимального заряду (рівня вихідного сигналу) сила  $F$  виконує стискання (розтягування), зсув або вигин п'єзоелементу [12, 13]. Типова чутливість ПЕ-акселерометра складає  $(0.5 \div 1000) \text{ нКл/г}$ .

Одними з найкращих матеріалів для ПЕ-сенсорних елементів є кристали кварцу, тому що працюють при температурах до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , мають однорідну чутливість в широкому температурному діапазоні, високу міцність, лінійність ПЕ-ефекту, відсутність гістерезису при зовнішніх діях різного роду та високий вихідний опір порядку  $10^{14} \text{ Ом}$ , що дозволяє працювати на частотах менше  $1 \text{ Гц}$  [13].

ПЕ-акселерометр є активним пристроєм, для отримання вихідного електричного сигналу якого необхідна наявність значної зміни навантаження (змінного прискорення), що відповідає динамічному режиму роботи. Це означає, що ПЕ-акселерометри не можуть вимірювати статичне (DC) прискорення та прискорення, що виникають при дії гравітаційних сил, однак разом з формувачами сигналу можуть

виконувати квазістатичні вимірювання за час порядку декількох хвилин або годин [5]. Типовий діапазон робочих частот ПЕ-акселерометра складає від  $(1 \dots 2)$  Гц до  $(1 \div 50)$  кГц. ПЕ-акселерометри використовуються в системах з максимальними детектованими рівнями прискорень в діапазоні  $(10^{-4} \dots 10^4)g$  [14].

За діапазоном робочих частот ПЕ-акселерометри діляться на два типи:

- нерезонансного типу (функціонують в межах плоскої ділянки АЧХ);
- резонансного типу (робоча ділянка АЧХ знаходиться в діапазоні частот, близьких до резонансної частоти, а при дії прискорення детектується її зміна).

За схемотехнікою ПЕ-акселерометри діляться на два види [6]:

- з низьким імпедансом – сенсори з вбудованим підсилювачем заряду або перетворювачем типу «заряд – напруга» та схемою обробки (*IEPE – integral electronic piezoelectric*) з функціями підсилення, фільтрації та самодіагностування;
- пристрої з високоімпедансним зарядовим вихідним сигналом (*Charge-output devices*) на основі тільки одного п'єзоелементу.

Провідними виробниками сучасних ПЕ-акселерометрів є компанії *Kistler, Endevco, Bruel & Kjaer, Bosch, PCB Piezotronics, Honeywell* та *Siemens VDO*.

Перспективи ПЕ-акселерометрів пов'язані зі спрощенням та оптимізацією існуючих конструкцій з метою підвищення їх технологічності та зменшення ціни. Компанія *Matsushita* запатентувала ПЕ-акселерометри нерезонансного і резонансного типів зі спеціальними коливальними режимами, що забезпечують високі робочі характеристики та мають низьку ціну [15, 16], а розміщення вбудованої електроніки для обробки сигналів забезпечує малі габаритні розміри.

Таким чином, перевагами п'єзосенсорів є: можливість детектування великих рівнів  $g$  (до  $10^4 g$ ), широкі динамічний діапазон сигналів сенсора (до 60 дБ) і діапазон робочих частот  $(1 \div 50000)$  Гц, однорідна чутливість в діапазоні робочих частот, порівняно високі механічна міцність та точність, малі габарити та вага.

Недоліки п'єзосенсорів: не можуть вимірювати статичне прискорення, потребують калібрування (мікроконтролерної обробки), схемотехніка і конструкції відносно складні, вбудована електроніка не інтегрована з чутливим елементом.

Подальший розвиток ПЕ-акселерометрів пов'язаний з розробкою на їх основі перспективних технологічних МЕМС-сенсорів та модулів [17].

В *п'єзорезистивному* (ПР) акселерометрі для детектування прискорення використовують гнучкі дифузійні кремнієві резистори (вимірювачі механічної напруги, *strain gages*), приєднані до мікромеханічних кремнієвих консольних балок, які підтримують інерційну масу. Прискорення інерційної маси приводить до вигину балок та змінює опір резисторів, утворюючи розбаланс моста Уітстона, що забезпечує реагування сенсора на статичне прискорення [12, 18].

Процес виготовлення ПР-структури ґрунтується на технологіях об'ємної кремнієвої мікромеханіки. За аналогією до ПЕ-сенсорів ПР-структури можуть мати мультиосьове виконання при ортогональному розташуванні коливальних площин або МЕМС-комірок (триосьовий акселерометр *Entran* типу *EGE3 Triax*) [19, 20]. На відміну від ПЕ-сенсорів ПР-акселерометри реагують також і на *DC* прискорення, тому що є пасивними пристроями, однак є термочутливими та чутливими до ударів і механічних дій (руйнуються при механічних перевантаженнях). Діапазон робочих температур таких перетворювачів складає  $(-55 \dots +120)^\circ\text{C}$ .

Оскільки технології виробництва даних структур не повністю сумісні з типовими поверхневими інтегральними технологіями, то схеми обробки сигналу ПР-моста зазвичай не є інтегрованими з вимірювальним кремнієвим кристалом [21, 22]. До складу ПР-сенсорів можуть входити вбудовані схеми, такі як товстоплівкові компоненти для лазерної підгонки чутливості, температурної компенсації пристрою та програмування в ЕЕПРОМ [23]. Тому на даний час ПР-акселерометри використовуються в основному для екстремальних вимірювань [24].

Провідними виробниками сучасних ПР МЕМС-акселерометрів є компанії *Endevco, Entran, Measurement Specialties (ICSensors), Sensor One Technologies, Fujicura* та *Lucas NovaSensor*. Таким чином, ПР-сенсори є актуальним на даний час типом МЕМС-акселерометрів, оскільки забезпечують високі робочі характеристики. Нові розробки в даній області орієнтовані на підвищення інтеграції чутливого елементу з електронними схемами оцінювання та самодіагностування, розробку мультиосьових модулів та зменшення їх вартості [19].

Найбільш поширеними є *ємнісні* МЕМС-акселерометри (*variable capacitance*) – сенсори прискорення, принцип дії яких оснований на ємнісному перетворенні мікропереміщень інерційної маси

при дії прискорення. Аналогічно функціонують потенціометричні або індуктивні сенсори прискорення, які переміщення інерційної маси (рухомих резистивного контакту, осердя або обмотки індуктивного елементу) перетворюють в зміну опору або індуктивності.

Більшість МЕМС-акселерометрів використовують принцип зміни відстані  $d$  між обкладками при дії прискорення та перетворення її у зміну ємності акселерометра та у вихідний електричний сигнал – заряд, напругу або струм. Типовий ємнісний сенсорний елемент складається з двох фіксованих електродів, між якими підвішена обкладка (спільний електрод ємнісного півмоста), навантажена інерційною масою. Диференціальна схема з'єднання двох конденсаторів  $C_1$  та  $C_2$  дозволяє збільшити амплітуду і покращити лінійність функції перетворення, тому що залежність ємності від переміщення є нелінійною. До складу більшості диференціальних ємнісних акселерометрів входить міст Уітстона (аналогічно ПР-сенсорам), що виробляє сигнал, пропорційний  $\frac{C_1}{C_2}$  або  $\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$ .

Можливість конструювання ємнісного сенсора забезпечується не тільки МЕМС-рішеннями. Попередні технології використовували ємнісний елемент з металічною сенсорною діафрагмою та фіксованими обкладками конденсатора з оксиду алюмінію або металізованої кераміки [25, 26]. Сенсори такого типу ще випускають компанії *Texas Instruments* [25] і *PCB Piezotronics* [12].

На сучасному ринку провідні позиції займають ємнісні МЕМС-акселерометри компаній *Analog Devices*, *Bosch*, *Delphi*, *Denso*, *Freescale*, *Kionix*, *Silicon Designs*, *STMicroelectronics*, *VTI Technologies* та теплові акселерометри *Memsic*.

Ємнісні акселерометри використовуються через їх високу чутливість, стабільність при детектуванні статичного прискорення, малий дрейф, низьку температурну чутливість порівняно з ПР-акселерометрами (температурний коефіцієнт опору кремнію на два порядки вищий, ніж температурний коефіцієнт ємності навіть при зміні геометрії ємнісного акселерометра при температурному розширенні), малу споживану потужність, високу надійність, покращені шумові характеристики, роздільну здатність і точність, відсутність необхідності в спеціалізованих матеріалах, мале енергоспоживання та низьку ціну.

У порівнянні з ПЕ-сенсорами (таблиця 1), які для роботи потребують динамічного входу та виконуються тільки зі спеціальних матеріалів, ємнісні акселерометри виконуються з кремнію і детектують  $DC$ -прискорення без послаблення сигналу та необхідності початкового зміщення, що є важливим в ІНС.

Ємнісні МЕМС-акселерометри вимірюють прискорення в діапазоні від статичного до декількох сотень  $g$  на частотах до одиниць  $kГц$ , тому для описання такого сенсора використовується динамічна модель, яка поширюється на всі типи сенсорів. Однак більшість з них є пристроями нерезонансного типу з високою резонансною частотою, тому для їх описання достатньо статичної моделі. В динаміці за умов відсутності демпфування на частотах, значно нижче резонансної, чутливість акселерометра не залежить від частоти збудження. Однак збудження системи на частотах, близьких до резонансної, утворює великі амплітуди коливань, для зменшення чого в систему вводиться демпфування [14].

Чутливість акселерометра визначається як  $S = x/a = m/k = 1/\omega^2$ , тобто існує компроміс між шириною смуги пропускання (динамічним діапазоном) та чутливістю. В залежності від коефіцієнта демпфування верхня частота смуги пропускання акселерометра зазвичай  $f_B \approx (0.2 \div 0.5) f_p$ . Демпфування регулюється тиском газу в корпусі пристрою та геометрією сейсмічної маси [27]. Важливою властивістю ємнісних сенсорів є витримування ударів рівня порядку 5000  $g/c$ .

Крім нелінійності статичної характеристики ємнісні акселерометри чутливі до забруднень, вологості та присутності поблизу обкладок різних матеріалів, що змінюють властивості діелектрика та ємнісний зв'язок. Тому електронне виконання акселерометрів має спеціалізований дизайн та надійну інкапсуляцію.

Ємнісні акселерометри потребують наявності вбудованої схеми формування сигналу, яка виконує функції перетворення змін ємності в пропорційний аналоговий сигнал або струмовий вихід ШІМ. Зазвичай вимірюють імпеданс ємності на змінному струмі при підключенні до електродів гармонічного сигналу або прямокутних імпульсів напруги [24]. Вихідний опір ємнісного сенсора є високим порядку (1...100) МОм, для зменшення якого подають вхідний сигнал (живлення) високої частоти більше 50  $kГц$  (що допомагає знизити рівень шумів).

Таблиця 1. Технічні характеристики акселерометрів різних типів (дані зі специфікацій)

Сенсор/ Параметр	Функціональне призначення	Кількість вимірюваль- них осей	Максимальний діапазон прис- корень $G_{max}$ , g (повна шкала)	Тип виходу	Чутливість В/г (при 25°C)	Зміщення нуля $U_{0g}$ , В	Дрейф чут- ливості (в повному діапазоні)	Дрейф зміщення (в повному діапазоні)	Діапазон робочих частот, Гц
<b>П'єзоелектричні сенсори</b>									
0 273 101 141/ 0 273 101 150/ 0 273 101 131/ Bosch	П'єзоелектричні сенсори фронтальних прискорень	1 або 2 (XXX 150)	±35	Аналоговий у діапазоні (1÷5) В	60 мВ/г (57.5÷62.5)	±45 мВ (0 273 101 141); $U_{0g}/2 \pm 60$ мВ (0 273 101 150; 0 273 101 131)	4% в повному діапазоні	–	0,9÷250 (0 273 101 141); 0,9÷340 (0 273 101 150; 0 273 101 131)
0 261 231 148/ 0 261 231 153/ 0 261 231 118/ Bosch	П'єзоелектричні сенсори детонації	1	0.1÷400	З високим імпедансом > 1 МОм	(26±8) мВ/г на 5 кГц	–	0.06 мВ/(г·°C)	–	1÷20000
8694M1 Kistler	Триосьовий сенсор компрес- сійного типу	3	±500	Аналоговий у діапазоні (2÷6) В	4 мВ/г	4 В	0.054%/°C	–	10÷20000
<b>П'єзорезистивні сенсори</b>									
3031MSI	Одноосьовий п'єзорезистив- ний сенсор для креш-тестування	1	±50; 100; 200; 500	Мостовий, каліброван- ний в діапа- зоні ±5 В	(0.6÷0.06) мВ/г	–	–	–	0÷(1000...2400)
3255MSI	Одноосьовий п'єзорезистив- ний сенсор для креш-тестування	1 (кріплення допускає детектування будь-якої осі)	±25; 50; 100; 250; 500	Аналоговий вихід (0.5÷4.5) В	(76±3.8) мВ/г	–	–	–	–
EGAS Entran (MSI)	Одноосьовий та триосьовий п'єзорезистивний сенсор	1 або 3	±5...±2500	Мостовий; ±100 мВ	(20±0.04) мВ/г	±15 мВ	±2.5%/50°C	±1 мВ/50°C	0÷(150...3500)
EGAS Entran (MSI)	Одноосьовий мініатюрний п'єзорезистивний сенсор	1	±5...±5000	Мостовий; ±(75, 125 або 250) мВ	(15±0.05) мВ/г	±15 мВ	±2.5%/50°C	±2.5 мВ/50°C	0÷(150...3500)

Продовження таблиці 1

<b>Ємнісні сенсори</b>									
7290A Microtron Endevco	Ємнісний акселерометр – сенсор змінної ємності	1 (Z)	±2g (7290A-2); ±10g (7290A-10); ±30g (7290A-30)	Диференціальний аналоговий вихід	(1±0.02) В/г (7290A-2); (200±10) мВ/г (7290A-10); (66±4) мВ/г (7290A-30)	±50 мВ max	±3%	±2%	0÷15 (7290A-2); 0÷500 (7290A-10); 0÷800 (7290A-30)
7596AM3 Endevco			±2g (7596A-2); ±10g (7596A-10); ±30g (7596A-30)		(1±0.02) В/г (7596A-2); (200±10) мВ/г (7596A-10); (66±4) мВ/г (7596A-30)	±200 мВ max	±6%; ±8% для 7596A-50	±6%	0÷15 (7596A-2); 0÷500 (7596A-10); 0÷800 (7596A-30)
7292A- XXM1 Endevco			±10g (7292A- 10M1); ±30g (7292A- 30M1); ±50g (7292A- 50M1)		(200±10) мВ/г (7292A-10M1); (66±4) мВ/г (7292A-30M1); (40±2) мВ/г (7292A-50M1)	–	±6%; ±8% для 7292A-50M1	–	0÷500 (7292A-10M1); 0÷800 (7292A-30M1); 0÷1000 (7292A-50M1)
SCA103T- D04; SCA103T- D05 VTI	Високоточні одноосьові інклінометри	1 (Y)	±15° (±0.26); ±30° (±0.5)	Пропорційні диференціальні аналогові виходи або SPI	280 мВ/° та 140 мВ/° або 16 В/г та 8 В/г; точність калібрування чутливості ±5%	$U_{0g}/2$ (точність калібрування зміщення при 25°C 0.057° та 0.11° або ±1 мг та ±2 мг)	(-2.5÷1)%	≤±0.29°	Верхня частота зрізу (8÷28) Гц на рівні -3 дБ; детектування статичного прискорення
SCA100T- D01; SCA103T- D02 VTI	Двоосьові інклінометри	2 (X, Y)	±0.5 (±30°); ±1 (±90°)		4 В/г та 2 В/г; точність калібрування чутливості ±5%	$U_{0g}/2$ (точність калібрування зміщення при 25°C ±2 мг та ±4 мг)		±15 мг	
SCA61T- FAHHIG; SCA61T- FA1HIGVTI	Одноосьові інклінометри	1 (Y)							
SCA111T; SCA121T VTI	Одно- та двоосьові автономні інклінометри	1 (X) {111T-D02; 111T-D04}; 2 (X, Y) {121T-D03; 121T-D04; 121T-D05; 121T-D07}	±30° (111T-D02; 121T-D07); ±90° (121T-D03; 111T-D04; 121T-D05)	Аналогова напруга	35 мВ/° (121T-D03; 121T-D05); 70 мВ/° (111T-D02; 121T-D07; 111T-D04)	2.5 В (точність калібрування зміщення ±1°)	(-1.5÷0.5)%	±0.6°	Верхня частота зрізу 18 Гц на рівні -3 дБ; детектування статичного прискорення



Продовження таблиці 1

Резонансна частота $f_0$ , Гц	Напруга живлення, В	Споживаний струм, мА/ Споживана потужність, Вт	Розділова здатність, мг	Шуми (спектральна густина або піковий розмах амплітуди шумів)	Нелінійність, % від повної шкали	Поперечна осьова чутливість, %	Рагометричність, %	Здатність протидіяти перетилітати переваженням, г	Довготривала стабільність	Тип корпусу, розміри та маса	Діапазон робочих температур, °С
<b>П'єзоелектричні сенсори</b>											
-	5 (4.75÷5.25) для xxx 141; 4÷5.25 для xxx 150 та xxx 131)	12 мА для xxx 141; 15 мА для xxx 150 та xxx 131)	-	-	-	-	-	-	-	(50×35×20) мм для xxx 141; (20×20×8) мм для xxx 150/ xxx 131	-45...95
> 25000			-		15-41 мВ/г			-		(34×48×26) мм для xxx 148; (27×52×24) мм для xxx 153/ xxx 118	-40...130 -40...150
80000	12 – 30	Споживаний струм (2...20) мА	25 мг	-	1	5	-	2000	-	Титановий корпус з вбудованою електронікою; вага 2.5 г	-55...135
<b>П'єзорезистивні сенсори</b>											
2000...5000	5...10	Споживаний струм 8.5 мА		1.0 мкВ піковий розмах	0.5	1		1000-2000		SMD	-40...125
-	4...7	Споживаний струм 10 мА		10 мВ піковий розмах	0.2	1		2000			
300...7000	15	Споживаний струм 11.5 мА	-		1	2	-	500-10000	-	Корпуси спеціальної геометрії; вага 1 г	-40...120
300...8000	15	-			1	3		25-10000		Один з варіантів геометрії корпусу (3.6×3.6×6.9) мм; вага 0.5 г	

Продовження таблиці 1

<b>Ємнісні сенсори</b>											
1300 (A-2); 3000 (A-10); 5500 (A-30)	9.5÷18.0	Споживаний струм 8.5 мА (10 мА max)	0.0005 (A-2); 0.0025 (A-10); 0.008 (A-30)		±0.2 (0.5 max)	±2				Розміри корпусу (25×21.6×7.6) мм; вага 10 г	-54...121
1300 (A-2); 3000 (A-10); 5500 (A-30)	8.5÷30	Споживаний струм 4.5 мА (8 мА max)	0.0005 (A-2); 0.0025 (A-10); 0.008 (A-30)	Залишковий шум 100 мкВ в діапазоні (0.5÷100) Гц	±0.2 (0.5 max)	±1	-	20000	-	Розміри корпусу (25×21.6×9.9) мм; вага 13 г	-55...121
3000 (10M1); 5500 (30M1); 5500 (50M1)			0.0025 (10M1); 0.008 (30M1); 0.012 (50M1)		±0.2 (0.5 max) (10M1, 30M1) ±1 (2 max) (50M1)					Розміри корпусу Ø25.4×14 мм; вага 40 г	
-	5 (4.75÷5.25)	Споживаний струм (4÷5) мА	0.001 в смузї 10 Гц; цифрова розділова здатність виходу 0.009/LSB та 0.017/LSB або 12 біт	0.0004°/Гц в діапазоні (0÷100) Гц	±0.11° (±2 мг)	±4	1	-	<0.014°	DIP-12; 9×5×16 мм; <1.2 г	-55...125
		Споживаний струм (2.5÷4) мА	Цифрова розділова здатність виходу 11 біт	15 мкг/Гц в діапазоні (0÷100) Гц	±2 мг та ±10 мг ±2 мг та ±10 мг					±2	
-	5 (4.75÷5.25) або 16 (7÷35)	Споживаний струм 5 мА	0.001	-	0.1° (SCA111T-D02; SCA121T-D07); N/A (SCA121T-D03; SCA111T-D04; SCA121T-D05)	±3	-	-	<0.02°	30×30×13 мм; 60 г; клас захисту IP66	-40...85

Диференціальні акселерометри (наприклад, представники сімейства *ADXL Analog Devices* з нелінійністю до 0.2%) використовують для живлення нерухомих обкладок однакові за рівнем протифазні напруги з частотою порядку 1 МГц, при цьому в нульовому положенні рухомої обкладки напруга на вході демодулятора відсутня. Інший поширений метод вимірювання ємності полягає у використанні підсилювача заряду, який перетворює співвідношення вимірюваної та опорної ємностей в сигнал у формі напруги з нелінійністю порядку 1%. Використання підсилювача напруги дозволяє

отримати більш лінійну залежність напруги на рухомій обкладці як функцію зміни відстані з нелінійністю до 0.5% [14].

## Продовження таблиці 1

Сенсор/ Параметр	Функціо- нальне при- значення	Кількість вимірюва- льних осей	Максимальний діапазон прис- корень $G_{max}$ , g (повна шкала)	Тип виходу	Чутливість мВ/g (при 25°C)	Зміщення нуля $U_{0g}$ , В	Дрейф чутли- вості (в повно- му діапазоні)	Дрейф зміщення (в повному діапазоні)	Діапазон робочих частот, кГц	
<b>Нікелеві акселерометри Silicon Designs</b>										
1210	Одноосьові аналогові ІС	1 (Z)	±5g (1210-005); ±10g (1210-010); ±25g (1210-025); ±50g (1210-050); ±100g (1210-100); ±200g (1210-200); ±400g (1210-400)	Диференціальний вихід ±4 В або уніполярний аналоговий вихід (0,5÷4,5) В	Диференціальна чутливість 800 (1210-005); 400 (1210-010); 160 (1210-025); 80 (1210-050); 40 (1210-100); 20 (1210-200); 10 (1210-400). Уніполярна – по- ловина вказаного значення	Помилка калі- брування 2%; 4% максимум (1210-005); 1%, 2% максимум (від 1210-010 до 1210-400)	Помилка калібрування 1%, 2% максимум; температурний дрейф ±300 ppm/°C	Температурний дрейф 100 ppm/°C; 300 ppm/°C мак- симум (1210-005); 200 ppm/°C мак- симум (від 1210- 010 до 1210-400)	0±0.4 (1210-005); 0±0.6 (1210-010); 0±1 (1210-025); 0±1.5 (1210-050); 0±2 (1210-100); 0±2.5 (1210-200); 0±3.5 (1210-400)	
2412	Аналоговий триосьовий з відкритим фреймом на основі трьох сенсорів 1210	3	±5g (2412-005); ±10g (2412-010); ±25g (2412-025); ±50g (2412-050); ±100g (2412-100)			Дані аналогічні 1210			Помилка калібрування 1.5% (типова) та 3% (максимальна)	Дані аналогічні 1210
2220	Одноосьові аналогові мо- дулі на основі сенсорів 1210	1	±(2±200)g			2000 (2220-002); 800 (2220-005); 400 (2220-010); 160 (2220-025); 80 (2220-050); 40 (2220-100); 20 (2220-200)	Помилка калі- брування 4% максимум (2220-002); 1.5% макси- мум (від 2220- 005 до 2220- 200)	Помилка калібрування 1%, 2% максимум; температурний дрейф ±250 ppm/°C	Температурний дрейф 100 ppm/°C; 200 ppm/°C макси- мум (2220-002); 50 ppm/°C; 100 ppm/°C мак- симум (від 2220- 005 до 2220-200)	0±0.4 (2220-002); 0±0.6 (2220-005); 0±1 (2220-010); 0±1.5 (2220-025); 0±2 (2220-050); 0±2.5 (2220-100); 0±2.5 (2220-200)
1010	Одноосьові цифрові ІС	1 (Z)	±2g (1010-002); ±5g (1010-005); ±10g (1010-010); ±25g (1010-025); ±50g (1010-050); ±100g (1010-100); ±200g (1010-200)	TTL/ CMOS частотний вихід напрямку	62.5 (1010-002); 25.0 (1010-005); 12.5 (1010-010); 5 (1010-025); 2.5 (1010-050); 1.25 (1010-100); 0.625 (1010-200), кГц/g	Помилка калі- брування 2%, 4% максимум (1100-002); 1%, 2% макси- мум (від 1100- 005 до 1100- 200)	Помилка калібрування 1%, 2% максимум; температурний дрейф ±300 ppm/°C	Температурний дрейф 150 ppm/°C; 400 ppm/°C макси- мум (1100-002); 100 ppm/°C; 300 ppm/°C макси- мум (від 1100-005 до 1100-200)	0±0.4 (1100-002); 0±0.6 (1100-005); 0±1 (1100-010); 0±1.4 (1100-025); 0±1.6 (1100-050); 0±1.8 (1100-100); 0±2 (1100-200)	

## Продовження таблиці 1

<b>П'єзоплівкові акселерометри MSI</b>										
ACH01-XX (ACH01-02/ ACH01-03/ ACH01-04)	Недорогий одноосьовий акселерометр загального призначення	1 (Z)	Динамічний діапазон ±250g типовий; ±150g мінімум	Вихід з високим імпедан- сом – 20 кОм	10 мВ/g; діапазон (7±1) мВ/g			Температурна чутливість 0.35g/°C	0.001±20 (нижня межа 0.005 мак- симум; верхня – 10 мінімум)	
ACH04-08- 05	Триосьовий акселерометр	3	Динамічний діапазон ±250g	Аналого- вий	1.8 мВ/g				0.0005±4	
ACH-04- 08-09	Одноосьовий акселерометр спеціального призначення	1 (Y)	Динамічний діапазон ±40g	–	6 мВ/g				0.0002±1.5	
<b>Теплові акселерометри Memsic</b>										
MXA 2500G/M	Двоосьовий аналоговий акселерометр з покращени- ми характе- ристиками та шумовими властивос- тями	1	±1.7g	Аналоговий	500 (475±525)	±0.1g максимум; (1.25±0.05) В		Температурний дрейф -10% мінімум та +8% максимум (MXA 2500G); -25% мінімум та +8% максимум (MXA 2500M)	Температурний дрейф ±1.5 mg/°C	0.017 (0.015±0.019); до 160 кГц
MXC 6202 G/H/M/N	Двоосьовий цифровий акселерометр з малим споживанням, в тонкому кор- пусі з інтер- фейсом I <sup>2</sup> C	2	±2g	I <sup>2</sup> C	512 (486±538) LSB/g (G/M) або 128 (122±134) LSB/g (H/N)	±0.1g; 2048 (1996±2100) LSB (G/M) або 512 (499±525) LSB (H/N)		Температурний дрейф 15%	Температурний дрейф ±1.0 mg/°C	0.017 (0.015±0.019); до 150 кГц

Продовження таблиці 1

Резонансна частота $f_0$ , Гц	Напруга живлення, В	Споживаний струм, мА/ Споживана потужність, Вт	Час готовності до роботи, мс	Розділова здатність, мг	Шуми (спектральна густина або піковий розмах амплітуди шумів, мкг/√Гц	Нелінійність, % від повної шкали	Поперечна основа чутливості, %	Раціональність, %	Здатність прогнати перевантаження, г	Тип корпусу, розміри та маса	Діапазон робочих температур, °С	
<b>Нікелеві акселерометри Silicon Designs</b>												
–	5 (4.75÷5.25)	7 мА; 10 мА (макс.)	–	–	32 (1210-005); 63 (1210-010); 158 (1210-025); 316 (1210-050); 632 (1210-100); 1265 (1210-200); 2530 (1210-400)	±0.5; ±1 максимум	±2; ±3 максимум	–	2000g максимум за 0.1 мс	xL-LLC 20; J-JLLC 20; вага 0.62 гр.	-55...+125	
–	5	21 мА максимум	–	–	–	–	–	(30.5×30.5×25) мм, вага 16 гр.		-40...+85		
–	9÷32	12 мА; 14 мА (макс.)	–	–	Дані визначаються 1210	±0.3; ±0.5 макс.	±1; ±2 максимум	–		вага 10 гр.	-55...+125	
–	5 (4.5÷5.5)	2 мА; 3 мА (макс.)	–	–	–	±0.5; ±1 максимум	±2; ±3 максимум	–		LLC 20 або JLLC 20; вага 0.62 гр.	-55...125	
<b>П'єзоплівкові акселерометри MSI</b>												
> 35	3÷40	2 мкА (типовий)	–	–	Шумовий поріг 40 мкг/√Гц	0.1% типове; 1% максимум	2 типове; 5 максимум	–	1000 g	(13×19×6) мм, вага 3 гр., адгезивне кріплення	-40...+85	
9.2		6 мкА (типовий)	–	–	Шумовий поріг 200 мкг/√Гц	0.1%				15		(11×10×2) мм, вага 0.35 гр.
3.4		2 мкА (типовий)	–	–	Шумовий поріг 200 мкг/√Гц							
<b>Теплові акселерометри Memsic</b>												
–	3÷5.25	3.1 (2.5÷3.9) при 5 В; 3.8 (3÷4.6) при 3 В	160 (5 В); 300 (3 В)	–	0.2 мкг/√Гц; 0.4 мкг/√Гц макс.	±0.5; ±1 максимум	±2	–	50000 g	LLC (5×5×2) мм, вага 1 гр.	-40...+105 (M); 0...+70 (G)	
–	3 (2.7÷3.6)	1.8 мА	75; 100 макс.	0.5 мг; 1 мг макс.	0.58 мкг/√Гц					LLC (5×5×1.55) мм, вага 0.8 гр.	-40...+85 (M/N); 0...+70 (G/H)	

Серед ємнісних акселерометрів найбільш поширеними є так звані *closed loop* або *force balanced* (балансовані силою) або *servo* (слідкувальні) акселерометри, які використовують сигнал зміни ємності як напругу зворотного зв'язку, що протидіє переміщенню маси та утримує її в центральному положенні (примусовий зворотний зв'язок). Для ємнісних сервопристроїв різниці потенціалів між нерухомими електродами та рухомою масою контролюються так, що електростатична сила компенсує переміщення, викликане прискоренням. Утримання маси в збалансованому режимі покращує чутливість, практично виключає похибки нелінійності, зменшує вплив зміни температури та часових змін параметрів.

Сервоакселерометри забезпечують високу точність, яка є важливою для прецизійних інклінометрів систем контролю параметрів та навігації (блоків *IMU* з шістьма степенями свободи, що комбінуються з гіроскопами), однак їх ціна може на порядок перевищувати вартість пристроїв незамкненого циклу. Оскільки відхилення інерційної маси зменшується (в акселерометрах *Analog Devices* менше 0.01 мкм), то детектований діапазон прискорень складає зазвичай до 50g.

Еквівалентна лінійна фізична модель, що ілюструє принцип роботи сервоакселерометра у напрямку однієї степені свободи, розглянута в [28]. Відомі також маятникові моделі сервоакселерометрів: один з варіантів описаний в [1], а другий – в бібліотеці для розробників на сайті *National Instruments* [29].

В таблиці 2 представлений порівняльний аналіз різних технологій акселерометрів. Для задач мобільної робототехніки найкращими на даний час за характеристиками є поверхневі ємнісні акселерометри (однак навіть прецизійні пристрої, хоча й забезпечують високу лінійність, в результаті можуть забезпечити меншу точність, ніж прецизійні ПЕ-сенсори).

На основі проведеного огляду сучасного стану та технологій виробництва акселерометрів на рис. 1 наведена їх класифікація [24].

Таблиця 2. Порівняльний аналіз переваг та недоліків різних технологій акселерометрів

Технологія акселерометрів	Переваги, основні відмінності	Недоліки, обмеження
1. Електромеханічні акселерометри типу <i>ball-in-tube</i>	1. Висока роздільна здатність. 2. Можливість детектування статичного прискорення. 3. Наявність сенсорів сервотипу.	1. Великі габаритні розміри та інерційна маса. 2. Чутливість до корозії, шкідливої дії атмосфери та забруднень. 3. Нестабільність роботи внаслідок різної електрохімічної активності використовуваних матеріалів та покриттів. Висока ціна. 4. Перемикальний тип.
2. Безконтактні сенсори магнітного поля (Хола, Віганда та ін.)	1. Працюють в діапазоні НЧ. 2. Можливість детектування статичного прискорення. 3. Аналогова та ШІМ-версії. 4. Наявність інтегрованої в ІС схеми обробки сигналу.	1. Значні розміри та вага інерційної маси. 2. Часовий (старіння магніту) та температурний дрейф точності.
3. П'єзоелектричні сенсори	1. Можливість детектування високих рівнів <i>g</i> . 2. Висока лінійність та широкий динамічний діапазон. 3. Висока роздільна здатність. 4. Висока точність та міцність. 5. Робота в широкому діапазоні частот (0.001...20000) Гц. 6. Однорідна чутливість у всьому частотному діапазоні. 7. Можливість роботи при температурах вище 300 °С для сенсорів з високим імпедансом. 8. Мультиосьове виконання. 9. Малі габарити та маса. 10. Виконуються з п'єзокераміки (недорогої альтернативи кварцу).	1. Неможливість детектування статичного прискорення. 2. Пристрої потребують калібрування (мікроконтролерної обробки). 3. Мають на друкованій платі інтегровану схему обробки. 4. Високий вихідний імпеданс кварцового сенсорного елемента порядку $10^{14}$ Ом. 5. Сенсори з високим імпедансом чутливі до шумів, високої вологості та забруднень. 6. Висока ціна.
4. П'єзоплівкові сенсори <i>MSI</i>	1. Широкий динамічний діапазон та висока чутливість. 2. Високі лінійність характеристик та розділова здатність. 3. Простота та мініатюрність чутливого елемента; стійкість до вологості та забруднень. 4. Мультиосьове виконання. 5. Малі габарити та маса, а також інтегральний корпус. 6. Низька ціна.	1. Неможливість детектування статичного прискорення. 2. Чутливість до електромагнітних завад. 3. Температурна та відносно висока поперечна чутливість. 4. Складність технології виробництва сенсора – механічного та електричного дизайну. 5. Відсутність сенсорів на кремнієвій підкладці.
5. Об'ємні п'єзорезистивні сенсори	1. Високі рівні детектованих прискорень, включаючи статичні. 2. Висока чутливість мостового елемента. 3. Висока лінійність характеристик. 4. Висока роздільна здатність. 5. Мультиосьове виконання (однак в неінтегральному виконанні).	1. Обмеження діапазону робочих частот (до декількох кГц) та кількості детектованих осей. 2. Чутливі до змін температури, ударів та механічних дій. 3. П'єзорезистори потребують узгодження, підгонки і калібрування. 4. Висока або середня ціна.

Продовження таблиці 2

Технологія акселерометрів	Переваги, основні відмінності	Недоліки, обмеження
---------------------------	-------------------------------	---------------------

<p>6. Поверхневі ємнісні кремнієві МЕМС-акселерометри</p>	<p>1. Можливість детектування всіх типів прискорень (також кутові). 2. Мультиосьове виконання. 3. Наявність сервосенсорів з високою лінійністю, точністю і температурною стабільністю. 4. Зменшений дрейф параметрів та покращені шумові характеристики. 5. Висока роздільна здатність. 6. Інтегрованість схем обробки сигналу в корпусі ІС. 7. Однокристальна система. 8. Наявність функції самотестування, підтримка більшості інтерфейсів. 9. Низькі енергоспоживання та ціна.</p>	<p>1. Обмежений діапазон робочих частот. 2. Ключові проблеми, що розв'язуються при розвитку технології – зменшення шумового порогу, підвищення роздільної здатності та точності.</p>
<p>7. Об'ємні ємнісні кремнієві МЕМС-акселерометри</p>	<p>1. Простота сенсорного елемента. 2. Детектування прискорень до <math>\pm 100g</math>, включаючи <i>DC</i>. 3. Висока точність, роздільна здатність та температурна стабільність. 4. Малий дрейф параметрів та покращені шумові характеристики. 5. Схеми обробки сигналу розміщені в інтегральному корпусі. 6. Низька або середня ціна.</p>	<p>1. Технологія передбачає найкращі результати при детектуванні переважно <i>low-g</i> рівня. 2. Обмежений частотний діапазон (контролюється демпфуванням). 3. Нелінійність фізичної природи ємнісного елемента. 4. Значна площа ємнісного елемента та обмежена кількість осей. 5. Дво- або трикристальні сенсори.</p>
<p>8. Об'ємні ємнісні нікелеві МЕМС-акселерометри (<i>Silicon Designs</i>)</p>	<p>1. Простота сенсорного елемента. 2. Детектування прискорень до <math>20000g</math> (на практиці до <math>400g</math>) та статичних прискорень. 3. Висока міцність та жорсткість сенсорного елемента, а також надійність та температурна стабільність. 4. Широкий температурний діапазон до <math>200\text{ }^{\circ}\text{C}</math>. 5. Інтегральний корпус, сенсор на кремнієвій основі. 6. Низька ціна.</p>	<p>1. Порівняно мала ємність та малі зміни вихідного сигналу. 2. Обмежений частотний діапазон (контролюється демпфуванням). 3. Порівняно велика площа ємнісного елемента. 4. Обмежена кількість осей. 5. Двокристальний сенсор.</p>
<p>9. Теплові акселерометри <i>Memsic</i></p>	<p>1. Висока надійність. 2. Детектування статичного прискорення та низький рівень шуму. 3. Висока роздільна здатність. 4. Однокристальна система. 5. Розширення для схем зі змішуванням сигналів; наявність функції самотестування; програмованість. 6. Найнижча ціна.</p>	<p>1. Обмежений діапазон робочих частот. 2. Температурна чутливість та помітні похибки і дрейфи параметрів – вплив зменшується при вдосконаленні процесу виробництва.</p>

### Висновки

1. Розглянуто основні технічні параметри акселерометрів та представлено порівняльний аналіз різних технологій акселерометрів. Для задач мобільної робототехніки найкращими на даний час за характеристиками є поверхневі ємнісні акселерометри. На основі проведеного огляду сучасного стану і технологій виробництва акселерометрів представлена їх класифікація.

2. З'ясовано, що на даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів (при зменшенні загальної ціни сучасної системи на їх основі та кількості зовнішніх дискретних елементів). В розвитку МЕМС актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікромеханічних та мікроелектронних

пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції. Подальша еволюція MEMS буде полягати в інтеграції виконавчих елементів, сенсорів тиску, магнітного поля та ін.

3. При вірному врахуванні властивостей та особливостей акселерометра, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи МР, що характеризують його здатність детектувати нахил, рух, положення, вібрацію та удар.

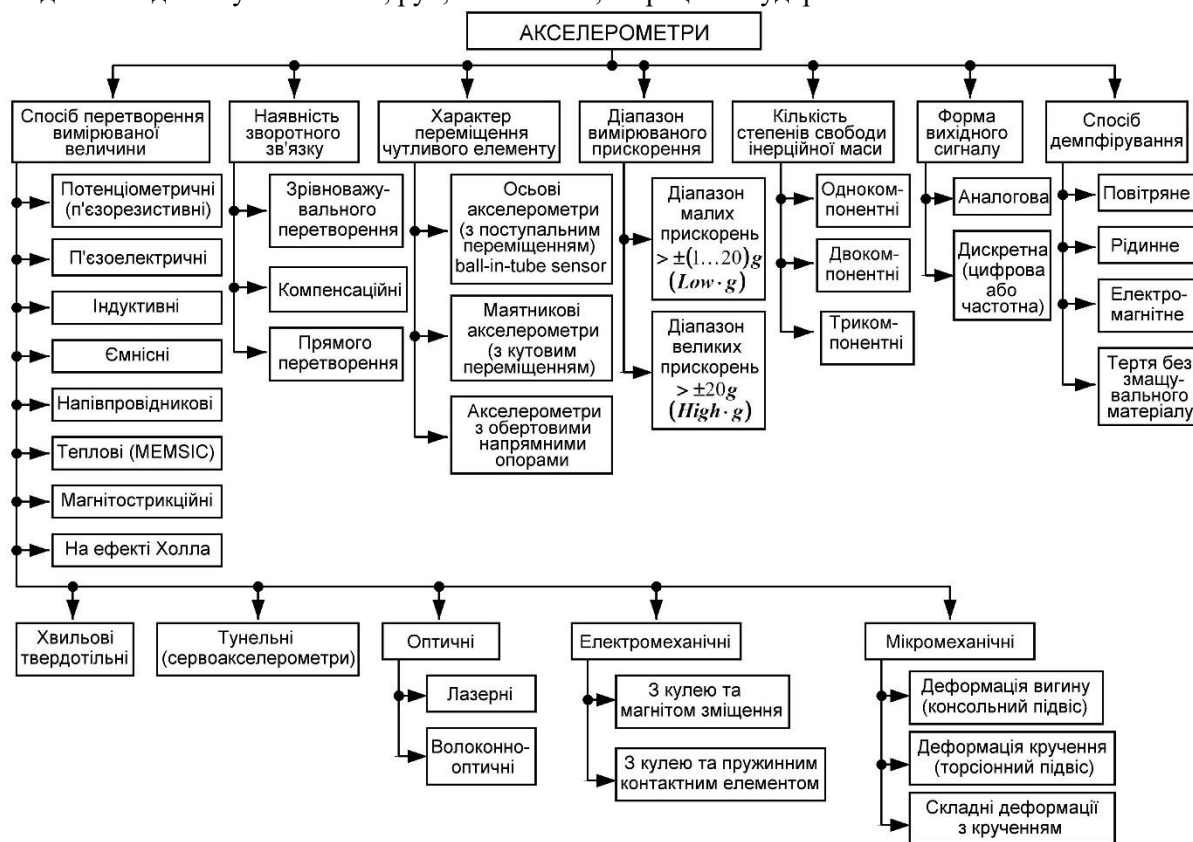


Рис. 1. Класифікаційні ознаки акселерометрів

#### Список літературних джерел

1. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 3. Классификация и анализ базовых рабочих принципов / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 2. – С. 42-49.
2. Rathore, Amer. Magnetostrictive device / Amer Rathore, Teruo Mori, Kiyoshi Uchida, Hiroshi Eda, Yoshio Yamamoto (TDK Corporation). – US Patent №5982054, H04R 15/00, 09.11.1999. – 15 p.
3. Bernstein, J. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sensorsmag.com/articles/0203/14/main.shtml>. (Дата звернення: 18.12.2018).
4. Cooper, E. B. High-resolution micromachined interferometric accelerometer: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.media.mit.edu/nanoscale/courses/readings/APL\\_ID\\_accel.pdf](http://www.media.mit.edu/nanoscale/courses/readings/APL_ID_accel.pdf). (Дата звернення: 03.02.2019).
5. Khammash, M. Robust Feedback Control Design of an UltraSensitive, High Bandwidth Tunneling Accelerometer: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.engineering.ucsb.edu/~tmems/Robust Feedback Control Design of an UI.../Robust Feedback Control Design of an UltraSensitive, High Bandwidth.pdf](http://www.engineering.ucsb.edu/~tmems/Robust%20Feedback%20Control%20Design%20of%20an%20UltraSensitive,%20High%20Bandwidth.pdf). (Дата звернення: 03.03.2019).
6. Introduction to piezoelectric accelerometers. Sensor Net-Work: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sensornet-work.com/id28.html>. (Дата звернення: 28.12.2018).
7. Husby, Harald S. Crash sensor with magnetic field sensor / Harald S. Husby (Breed Automotive Technology, Inc.). – US Patent №6282942, G01P 15/105, 04.09.2001. – 8 p.
8. Meister, Jack B. Vehicle safety restraint system with linear output impact sensor / Jack B. Meister (Breed Automotive Technology, Inc.). – US Patent №5608270, H01H 35/14, 04.03.1997. – 11 p.
9. Thuen, Torbjorn. Gas damped crash sensor / Torbjorn Thuen, Morris Plains, Harald S. Husby, Budd Lake, Allen K. Breed (Breed Automotive Technology, Inc.). – US Patent №5237134, H01H 35/14, 17.08.1993. – 8 p.
10. Breed, D. S. Magnetically biased velocity change sensor / David S. Breed, N. J. Boonton (Breed Corporation). – US Patent №4329549, H01H 35/14, 11.05.1982. – 8 p.

11. Thuen, Torbjorn. Velocity change sensor with spring bias / Torbjorn Thuen, Morris Plains, Harald S. Husby, Budd Lake, Allen K. Breed (Breed Automotive Corporation). – US Patent №5031931, B60R 21/32, 16.07.1991. – 7 p.
12. Aszkler, C. The Principles of Acceleration, Shock and Vibration Sensors / C. Aszkler // Sensors Magazine. – 2005. – № 5. – P. 137-154.
13. Kulwanoski, G. The Principles of Piezoelectric Accelerometers: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sensorsmag.com/articles/0204/main.html>. (Дата звернення: 26.02.2019).
14. Рудик, А. В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота. Монографія / А. В. Рудик, В. П. Квасніков. – Харків : Мачулін, 2018. – 272 с.
15. Baba, Hiroyuki. Acceleration sensor / Hiroyuki Baba, Hideki Matsumoto (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.). – US Patent №6779403, G01P 1/02, 24.08.2004. – 18 p.
16. Baba, Hiroyuki. Acceleration sensor / Hiroyuki Baba, Noriyuki Murata (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.). – US Patent №6817245, G01P 15/09, 16.11.2004. – 17 p.
17. Mlcak, Richard. Micromechanical piezoelectric device / Richard Mlcak, Dharanipal Doppalapudi, Harry L. Tuller (Boston MicroSystems). – US Patent №6953977, H01L 41/22, 11.10.2005. – 11 p.
18. Swanson, Gregory D. Piezoresistive force rebalance accelerometer / Gregory D. Swanson (Delco Electronics Corporation). – US Patent №5596144, G01P 15/13, 21.01.1997. – 8 p.
19. Kolb, Stefan. Acceleration sensor and method for manufacturing an acceleration sensor / Stefan Kolb, Wolfgang Werner (Infineon Technologies AG). – US Patent №6883381, G01P 15/12, 26.04.2005. – 11 p.
20. Werner, Wolfgang. Integrated micromechanical sensor device / Wolfgang Werner (Siemens Aktiengesellschaft). – US Patent №5744719, G01P 15/125, 28.04.1998. – 8 p.
21. Allen, Henry V. Self-testable micro-accelerometer and method / Henry V. Allen, Stephen C. Terry, Diederik W. De Bruin (IC Sensors). – US Patent №5445006, G01P21/00, 29.08.1995. – 8 p.
22. Mozgowiec, Mark D. Sensor with strain isolated sensor / Mark D. Mozgowiec, Kai L. Keasey, Steven Beringhouse (Texas Instruments Inc.). – US Patent №5343748, G01P 21/00, 06.09.1994. – 5 p.
23. Kawate, Keith W. Sensor with programmable temperature compensation / Keith W. Kawate (Texas Instruments Inc.). – US Patent №5241850, G01P 21/00, 07.09.1993. – 6 p.
24. Рудик, А. В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота: дис. на здоб. наук. ступ. д.т.н. / А. В. Рудик. – Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 446 с.
25. Reidemeister, Eric P. Accelerometer / Eric P. Reidemeister (Texas Instruments Inc.). – US Patent №5345823, G01P 1/02, 13.09.1994. – 9 p.
26. Reidemeister, Eric P. Compact capacitive acceleration sensor / Eric P. Reidemeister (Texas Instruments Inc.). – US Patent №5542296, G01P 1/02, 06.08.1996. – 10 p.
27. Acar, C. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1674&.../viewcontent.pdf](http://www.repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1674&.../viewcontent.pdf). (Дата звернення: 16.12.2018).
28. Сысоева, С. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометров / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 3. – С. 10-17.
29. Common Sensors and Actuators for Mechatronics Projects: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/211722>. (Дата звернення: 22.01.2019).

УДК 621.317

**ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ НА СТИСНУТИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ** / Подчашинський Ю.О., Шавурський Ю.О., Воронова Т.С., // Вісник інженерної академії України. – 2018. - №4 – С.

*В статті запропоновано методу визначення точності геометричних вимірювань на цифрових зображеннях, що були стиснуті за допомогою JPEG-алгоритму. Похибки геометричних параметрів розраховуються на основі чисельних методів, що враховують параметри алгоритму стиснення та похибки початкового зображення до стиснення. Таке стиснення може бути складовою частиною процесу обробки експериментальних даних і перетворення цих даних в форму, найбільш прийнятну для їх накопичення і зберігання. Виконано оцінку впливу похибок, пов'язаних із вилученням верхніх частот із спектра сигналу яскравості, на точність геометричних вимірювань.*

**Ключові слова:** цифрове зображення, стиснення зображень, дискретне косинусне перетворення, геометричні параметри, похибки вимірювання.

УДК 621.317.08

**АКСЕЛЕРОМЕТРИ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІКИ – ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ** / А.В. Рудик, Н.І. Лісовець// Вісник інженерної академії України. – 2018. - №4 – С.

*В статті розглянуто основні технічні параметри акселерометрів та представлено порівняльний аналіз різних технологій акселерометрів. Для задач мобільної робототехніки найкращими на даний час за характеристиками є поверхневі ємнісні акселерометри. На основі проведеного огляду сучасного стану і технологій виробництва акселерометрів представлена їх класифікація. З'ясовано, що на даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів (при зменшенні загальної ціни сучасної системи на їх основі та кількості зовнішніх дискретних елементів). В розвитку МЕМС актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікромеханічних та мікроелектронних пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції. Подальша еволюція МЕМС буде полягати в інтеграції виконавчих елементів, сенсорів тиску, магнітного поля та ін. При вірному врахуванні властивостей та особливостей акселерометра, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи мобільного робота, що характеризують його здатність детектувати нахил, рух, положення, вібрацію та удар.*

**Ключові слова:** акселерометр, мобільний робот, прискорення, мікроелектромеханічна система, ємнісний сенсор, п'єзорезистивний сенсор, п'єзоелектричний сенсор.

УДК 656.11

**ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОСТІ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ МІСЬКИХ ВУЛИЦЬ ТА ДОРІГ** / Степанчук О.В., // Вісник інженерної академії України. – 2018. - №4 – С.

*Проаналізовані основні фактори, які впливають на функціонування вулично-дорожньої мережі міст. Отримана матриця досяжності, що характеризує взаємний зв'язок впливу факторів, на основі якої розроблена модель ієрархії, що імітує пріоритетність впливу визначених факторів на функціонування міських вулиць та доріг.*

**Ключові слова:** вулично-дорожня мережа, фактори впливу, рівні ієрархії.

УДК 378:[005.52:005.33/.34]

**ЗАСТОСУВАННЯ SWOT-АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ДІЯЛЬНОСТІ ЗВО** / А.П. Волівач 1, Г.І. Хімичева 2, // Вісник інженерної академії України. – 2018. - №4 – С.

*В даній статті наведено принципи і підходи до формування групи експертів за якісними та кількісними характеристиками на основі яких побудовано алгоритм. Виявлено фактори впливу зовнішнього та внутрішнього середовища, що обумовлюють ризики освітньої діяльності КНУТД. За допомогою методу SWOT-аналізу проведено моніторинг освітньої діяльності даного закладу та запропоновано організаційно-технічні заходи щодо попередження ризиків.*

**Ключові слова:** ЗВО, фактори впливу, ризики освітньої діяльності, SWOT-аналіз, експертна оцінка, стратегії розвитку, організаційно-технічні заходи.



ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ  
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ



**В І С Н И К**  
**ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

ВИПУСК 4 2018

Підп. до друку 31.10.2018р. Формат 60×84/8. Папір офсет. № 1.  
Гарнітура Тип Таймс. Друк офсет. Ум. друк. арк. 33,1  
Обл.-вид. арк. 35,6. Наклад 300 прим. Зам. № \_\_\_\_

Віддруковано: СПД «Андрієвська Л.В.»  
м. Київ, вул. Бориспільська, 9,  
Свідоцтво серія ВОЗ № 919546 від 19.09.2004 р