

## *Автоматизація та інтелектуалізація приладобудування*

Упорядкувавши стовпці за спаданням їх значень, одержимо ряд альтернатив  $x_2, x_1, x_3, x_4, x_5$ . Відповідно до прийнятого раніше позначеннями самим трудомістким, а тому пріоритетним є вузол “Гіроскопічна секція”.

### **Висновки**

Запропонований метод вибору альтернативного варіанта по порівнюваних конкуруючих альтернативах із залученням експертів, дозволяє підвищити рівень об'єктивності оцінки складності виготовлення вузла виробу [5].

Подальші дослідження спрямовані на застосування даної методики до побудови гнучкої автоматизованої системи прискореної підготовки складального виробництва. Така система дозволить більш раціонально організувати підготовку механо-складального виробництва, тим самим скоротивши цикл випуску першої партії виробів.

### **Література**

1. Румбешта В.О. Стельмах Н.В. Принцип гнучкості в структурі сучасної технологічної підготовки виробництва. Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. 2/2007 НТУ “ХПІ”, Харків.
2. Алиев Р.А. и др.. Управление производством при нечеткой исходной информации. – М: Энергоатомиздат, 1991. – 238 с.
3. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б./ Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта – М.: Наука, 1986. – 311 с.
4. Румбешта В.О. Основи технології складання приладів: Підручник. - К: ІСДО, 1993. – 303 с.
5. Поспелов Д.А. Модели выбора альтернатив в нечеткой среде // Тез. докл. – Рига: РПИ. - 1984.

<p>Стельмах Н.В., Румбешта В.О. Барабаш Я.В.  <b>Методика вибору пріоритетності виготовлення вузлів изделия на основі теорії нечітких множин.</b>          В роботі пропонується методика вибору найбільш трудомісткого вузла изделия з використанням теорії нечітких множин на основі мнень експертів.</p>	<p>Stelmakh N.V., Rumbeshta V.O., Barabash Y.V.  <b>Technique of a choice of the most difficult production unit by use of the fuzzy sets theory on the basis of expert opinions.</b>          The article has devoted to technique of a choice of the most difficult production unit by use of the fuzzy sets theory on the basis of expert opinions.</p>
---	---

*Надійшла до редакції  
1 лютого 2008 року*

УДК 681.586+531.76

## РОЗВИТОК ТА СТАН МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

*Казаченко Г.А., Гераймчук М.Д., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*В роботі проведений аналіз стану та розвитку мікроелектромеханічних систем (МЕМС), розглянуті технологічні процеси їх виготовлення та програмне забезпечення комп'ютерного*

*моделювання МЕМС. Розглянуто існуючі мікропристрої, прилади та системи вимірювання параметрів руху, зокрема, прискорення, а також прилади орієнтації та навігації*

### **Вступ. Постановка задачі**

Початок нового століття у сфері приладобудуванні характеризувався бурхливим розвитком нового напрямку мікроелектромеханічних систем (МЕМС). Головним у цьому напрямку є застосування мікротехнологій, адаптованих на виробництво складних інтегрованих пристроїв і систем.

Можливості прецизійної обробки матеріалів, групова технологія формування приладів, інтеграція механічної й електричної частин приладу (від чутливого елемента на вході схеми до підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, мікропроцесора у тракті обробки інформації та виконавчого пристрою на виході), а також різноманітність технологічних процесів є незаперечними перевагами використання досягнень мікроелектроніки при виготовленні мікроелектромеханічних елементів і систем.

МЕМС характеризуються надзвичайно малими масою і габаритами, мають високі динамічні характеристики, малу інерційність, мале енергоспоживанням, низьку вартість і одночасно високу стійкість до зовнішніх впливів.

Необхідно відзначити, що МЕМС є досить складними пристроями, для проектування й оптимізації функціонування яких, необхідно використовувати комп'ютерне моделювання.

Одним з важливих напрямків використання МЕМС є мікроколивальні системи - акселерометри і гіроскопи, датчики кутової швидкості, мультисенсорні датчики. Вони знаходять широке застосування на транспорті, в медицині в промислових системах вимірювання і управління, в інерційних системах навігації (ракетно-космічна техніка, авіаційна техніка), машинобудуванні, енергетиці, нафтогазовій техніці, системах комп'ютерної безпеки, інтелектуальних переносних пристроях, а також в системах віброконтролю, діагностиці та моніторингу.

Промисловість виготовляє багато різновидів МЕМС датчиків параметрів руху, що мають різні принципи дії, діапазони вимірювання, масу, габарити, ціни тощо. Тому важливим є уявлення принципів дії, характеристик, технологій виготовлення існуючих МЕМС.

### **Загальні характеристики мікроелектромеханічних систем**

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС) – це маленькі інтегровані пристрої або системи, що поєднують електричні і механічні компоненти. Їхні розміри є у межах від мікрметра до міліметра, їх може бути будь-яка кількість - від декількох елементів до мільйонів у специфічній системі. МЕМС застосовують методи виготовлення, розроблені для промисловості інтегральних схем (ІС), щоб додати механічні елементи типу балок, шестірні, діафрагм, і пружин на пристрої [1]. Також МЕМС - інтеграція механічних елементів, датчиків, приводів, і електроніки на звичайну кремнієву підкладку застосуванням технології мікро-виготовлення.

MEMS - це не тільки одне із застосувань або пристроїв, вони не визначені єдиним процесом виготовлення і не обмежені декількома матеріалами. Вони - підхід виготовлення, що надає переваги мініатюризації, багаторазових компонентів, і мікроелектроніки до проектування і конструювання інтегральних електромеханічних систем. MEMS є не тільки мініатюризація механічних систем, але також нова парадигма для розробки механічних пристроїв і систем [2].

Ці системи можуть зчитувати, керувати, активізувати механічні процеси в мікромасштабі, функціонувати індивідуально або в множинах, щоб зробити ефекти у макромасштабі. Мікротехнологія дозволяє виготовлення великих множин пристроїв, що індивідуально виконують прості задачі, але в комбінації можуть виконувати складні функції.

### **Технології виготовлення MEMS**

Існує три характерних риси технологій виготовлення MEMS - мініатюризація, множинність, і мікроелектроніка.

*Мініатюризація* дозволяє виробництво компактних, швидкодіючих пристроїв.

*Множинність* відноситься до групового виготовлення властивому обробці напівпровідника, що дозволяє легко й одночасно виготовити тисячі або мільйони компонентів.

*Мікроелектроніка* забезпечує інтелект MEMS і дозволяє монолітне злиття датчиків, приводів, і логіки, щоб будувати замкнутий зворотний зв'язок компонентів і систем. Успішна мініатюризація і множинність традиційних систем електроніки не були б можливі без технологій виготовлення ІС. Тому, технологія виготовлення ІС, або мікро-виготовлення, була спочатку однією можливою технологією для виробництва MEMS. Мікротовиготовлення забезпечує могутній інструмент для групової обробки і мініатюризації механічних систем у розмірну область, не доступну звичайними методами механічної обробки. Крім того, мікротовиготовлення забезпечує можливість інтеграції механічних систем з електронікою, щоб розробити високоякісні замкнутого типу керовані MEMS [3].

MEMS технологія стирає розходження між складними механічними системами й електронікою інтегральної схеми. Історично, датчики і приводи - сама дорога і ненадійна частина макромасштабних систем електроніки. MEMS технологія дозволяє цим складним електромеханічним системам бути виготовленими, використовуючи методи групового виготовлення, зменшуючи вартість і збільшуючи надійність датчиків і приводів, щоб зрівняти їх з інтегральними схемами.

MEMS технологія базується на низці інструментів і методологій, що використовуються, щоб формувати структури з розмірами масштабу мікрметра. Істотні частини технології були прийняті від технології ІС. Наприклад, майже всі пристрої ґрунтуються на пластинах кремнію, подібно ІС. Структури реалізовані в тонких плівках матеріалів, подібно ІС. Вони

копіюються, використовуючи фотолітографічні методи, подібно ІС. Є однак кілька процесів, що не отримані з технології ІС, і оскільки технологія продовжує рости, відрив з технологією ІС також зростає. Є три основних стандартних будівельних блоки в МЕМС технології: здатність депонувати тонкі плівки матеріалу на підкладку, копіювати образи на вершини плівок фотолітографічним відображенням, і труїти плівки вибірково до образів. Процес МЕМС - звичайно структурована послідовність цих дій, щоб формувати необхідні конструкції та пристрої [4].

### **Моделювання МЕМС**

За складністю опису дії мікромеханічні пристрої не уступають напівпровідниковим приладам, а здебільшого є більш складними і менш вивченими. Тому без використання комп'ютерного моделювання складно та дорого розробляти і виготовляти якісні мікромеханічні пристрої. Проблемі моделювання приділяється досить велика увага як розроблювачами і виготовлювачами мікромеханічних пристроїв, так і розроблювачами програмних продуктів.

Є кілька способів опису дії мікромеханічних пристроїв: від аналітичного опису за допомогою формул до тривимірного моделювання кінцевих елементів. Іноді для рішення задачі оптимізації конструкції і технології виготовлення мікромеханічних пристроїв використовується сполучення декількох способів опису. Найбільший інтерес для розроблювачів мікромеханічних пристроїв представляють пакети програм, що дозволяють вирішувати широке коло задач.

Перший крок при моделюванні мікромеханічних пристроїв є визначення: які фізичні ефекти важливі, і які з цих ефектів є взаємозалежними. Це звичайно визначає вибір програми моделювання, що буде використовуватись. Потім формується геометрія приладу або за допомогою редактора геометрії, або за результатами моделювання технології виготовлення. Після цього включаються вхідні параметри (граничні умови, властивості матеріалу тощо). Властивості матеріалів повинні бути отримані експериментально з тестових структур. Потім може бути виконане моделювання з використанням таких програм, як Abaqus [5], MEMCAD [6], IntelliCAD [7], Solidis [8], Ansys [9]. Для рішення системи диференціальних рівнянь ці програми використовують методи кінцевих елементів, граничних елементів, кінцевої різниці або кінцевих об'ємів. Потім за результатами моделювання формуються спрощені моделі, що застосовуються для розробки систем. Моделювання на системному рівні виконується за допомогою програми моделювання електричних схем SPICE [10], або більш загальних програм Simulink [11] і Saber [12], що використовують стандартну мову опису вхідного файлу для моделювання VHDL-AMS.

### **МЕМС акселерометри**

Як зазначалось раніше, одним з найважливіших напрямків використання

MEMS є мікроколивальні системи - акселерометри і гіроскопи, датчики кутової швидкості і мультисенсорні датчики. Зважаючи на це розробкою MEMS приладів та систем, що вимірюють та контролюють параметри руху, займаються велика кількість компаній. Світовими лідерами в цій галузі є «Analog Devices», «Sandia National Laboratories», «HDK America Inc.», «Freescale Semiconductor Inc.», «Kionix», «Jewell Instruments LLC» та «Endevco Corp.».

Компанія «Analog Devices» розробляє низку акселерометрів iMEMS® (integrated Micro Electro Mechanical System - інтегральні мікроелектромеханічні системи). Акселерометри iMEMS були першими компонентами в лінійці датчиків руху Motion Signal Processing™, у яких застосовується нова технологія, що дозволяє сполучати компактні, надійні датчики зі схемами обробки сигналів на одному кристалі. Сьогодні компанія «Analog Devices» пропонує найширший вибір акселерометрів, призначених для самих різних систем, що характеризуються високою точністю, малим енергоспоживанням і малими розмірами [13].

Акселерометри ADXL є основним сімейством акселерометрів «Analog Devices», у них використовується поверхнева мікромеханічна технологія iMEMS. Технологія iMEMS дозволяє одержати високу надійність, якість і низьку вартість. Акселерометри випускаються для малих і для великих значень прискорення і застосовуються для вимірювання положення, руху, нахилу, ударів і вібрації в різних системах.

Датчики серії ADXL оптимальні для застосування при великих обсягах продукції, що випускається, там де ціна акселерометра надзвичайно важлива, тоді як датчики ADIS забезпечують розширені можливості і додаткові функції там, де потрібна гнучкість застосування. Акселерометри серії ADIS випускаються в різних корпусах, у цих приладах об'єднані власне датчики типу ADXL і схеми обробки сигналів, у яких утілений багаторічний досвід фірми «Analog Devices» в області аналогових, цифрових мікросхем і мікросхем зі змішаними сигналами.

На рис. 1, 2 наведені: схема акселерометра ADXL330 – малого енергоспоживання, з трьома вимірювальними осями,  $\pm 3g$ , та акселерометр ADXL50, в якому електроніка займає більшість простору трьохміліметрової двомікросхемної області.

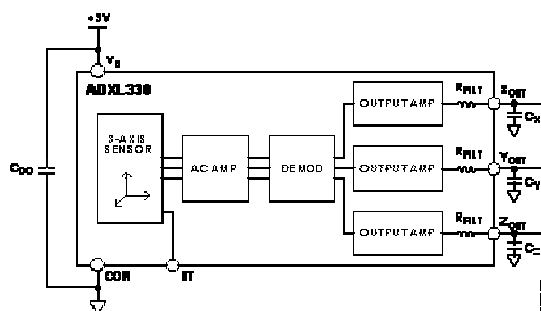


Рис. 1. Схема акселерометра ADXL330

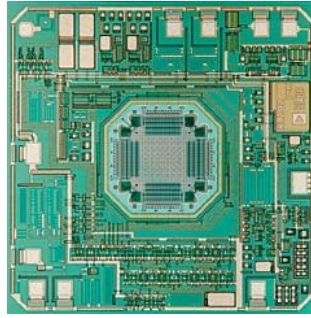


Рис. 2. Акселерометр ADXL 50 компанії «Analog Devices»

Компанія «Sandia National Laboratories» розробила зразок датчика, що може виявляти переміщення в менш ніж 1 нм (рис. 3). Основна частина приладу являє собою ґрати, виготовлені з двох гребінок, що перекриваються, (поперечний розмір 50 мкм): одна нерухома, інша прикріплена до пружини. Відстань між зубцями гребінки складає від 600 до 900 нм, що порівняно з довжиною хвилі видимого світла. Навіть при незначному переміщенні приладу рухлива гребінка здійснює коливання, розширюючи або звужуючи ґрати, утворені зубцями. Зміна зазорів решітки впливає на її оптичні властивості, і лазерний промінь, відбиваючись від зубців, що перекриваються, буде помітно яскравим або тьмяним. Вважається можливим використовувати такий детектор як основу навігаційного приладу, що зможе працювати незалежно від супутникової мережі глобальної системи позиціонування.

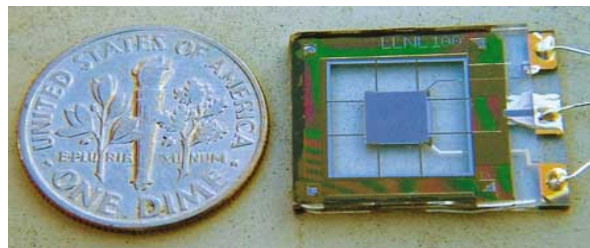


Рис. 3. Датчик MEMS

Традиційно системи позиціонування на базі руху страждають від нагромадження дрібних помилок. З часом ці помилки можуть призвести до показань, що відхиляється від дійсного положення на милі. Позиційне фіксування, характерне для приладу Sandia, забезпечує набагато більш повільну деградацію характеристик. Крім того, прилад може працювати під водою й у тунелі, куди GPS-сигнал не проходить.

Інтерес представляє також розробка фірмою «HDK America Inc.» самого малогабаритного п'єзорезистивного трьохосьового акселерометра НААМ-32В з розмірами 3x3x1мм. Прилад виготовлений на кремнієвій підкладці з використанням MEMS технології і має вихідну чутливість 400 мВ/г (напруга живлення 3В). Прилад може встановлювати дрібні значення динамічних прискорень по осях X, Y і Z, дані вихідного нахилу і гравітаційного прискорення одночасно. Прилад розрахований на номінальне прискорення  $\pm 2g$  і ефективну по потужності конструкцію, споживаючи струм 0,35 мА і 1 мкА в режимі

очікування. Напруга розбалансу складає  $1,5\text{В} \pm 0,075\text{В}$ , чутливість дорівнює  $20\text{ мВ/г}$  з лінійністю  $\pm 3\%$  FS. Діапазон робочих температур від  $0$  до  $75^\circ\text{C}$ . Ударна стійкість оцінюється при  $4000\text{г}$ .

Ємнісні двохосові MEMS акселерометри серії MMA62xx з діапазоном вимірювання прискорень від  $1,5$  до  $10\text{г}$  ( $\pm 1,5\text{г}$ ) розробляються фірмою «Freescale Semiconductor Inc.». MEMS акселерометр, виконаний на кристалі, містить схему для обробки сигналу, однополюсний фільтр нижніх частот і схему компенсації температури. Зсув Zero-g у повному діапазоні і частота відсічення фільтра встановлюються на заводі, і зовнішні прилади не потрібні. На кристалі також реалізовані можливості повного самотестування. Фірма виготовляє сімейство датчиків, використовуваних у приладах, що зчитують нахил, рух, місце розташування, удар і вібрації в двох напрямках (осі X і Y). Датчики працюють у діапазоні частот між  $50$  і  $900$  Гц, забезпечуючи можливість конструкторам обирати відповідні прилади під свої вимоги. Датчики працюють на напрузі від  $2,7\text{ В}$  до  $3,6\text{ В}$  і розсіюють максимальний струм від  $1,5\text{ мА}$  до  $3\text{ мА}$  залежно від обраної моделі. Діапазон номінальних значень шуму складає від  $1,3$  до  $3,5\text{ мВRMS}$  у залежності від моделі датчика.

MMA6260Q, 6261Q, 6262Q і 6263Q мають чутливість  $800\text{-мВ/г}$  при  $50$ ,  $300$ ,  $150$  і  $900$  Гц, відповідно. Прилади 6231Q і 6233Q мають чутливість  $120\text{-мВ/г}$  при  $300$  і  $900$  Гц, відповідно. Використовується 16-вивідний квадратний, плоский, безвивідний корпус з розмірами  $6 \times 6 \times 1,98\text{мм}$ .

Інерційний датчик на кремнієвій основі KX110 компанії «Kionix» (ІТНАСА, Нью-Йорк) має саму високу чутливість на даний час. Акселерометр реєструє статичне і динамічне прискорення, кути нахилу, і вібрацію, і призначений для використання в системах, керуючих рухом, узагалі, і в автомобільній електроніці - особливо. Датчики мають вбудовану систему самоперевірки й, обумовлену користувачем, настроювання ширини смуги частот. Вони вимагають електроживлення  $5\text{В}$ , забезпечують аналоговий вихід сигналу, пропорційного прискоренню, і зібрані в компактний пакет SOI з 16 пінами. При виробництві KX110 використовується процес плазменної мікромашинної обробки.

З використанням мікромеханічної обробки [14] англійська фірма «Jewell Instruments LLC» розробила універсальний акселерометр LCM-100. Прилад працює в діапазоні температур від  $-45^\circ\text{C}$  до  $+85^\circ\text{C}$ , витримує ударні навантаження до  $500\text{г}$ . Власна частота дорівнює  $100\text{ кГц}$ , вхідна неузгодженість дорівнює  $3^\circ$  максимум, дозвіл і граничне значення  $0,005\text{г}$ . Прилад використовується для тестування характеристик автомобілів, для контролю ліфтів, для сейсмічного моніторингу, для контролю верстатів і при льотних іспитах.

Широкий спектр п'єзоелектричних акселерометрів випускається фірмою «Endevco Corp.» (США). Акселерометр 525 має динамічні діапазони:  $\pm 50\text{г}$ ,  $\pm 100\text{г}$ ,  $\pm 500\text{г}$ , тоді як акселерометр 528 має динамічні діапазони:  $\pm 5\text{г}$ ,  $\pm 25\text{г}$ ,  $\pm 50\text{г}$ . Прилади розміщуються в герметичному корпусі і мають амплітудні характеристики  $0,5\text{ Гц}$  до  $12\text{ кГц}$  і  $0,5\text{ Гц}$  до  $10\text{ кГц}$ , відповідно. Інші

характеристики: діапазон робочих температур  $-54^{\circ}\text{C}$  до  $125^{\circ}\text{C}$ , межа пікової синусоїдальної вібрації  $\pm 800\text{ g}$ , ударна межа  $10\text{ кГ}$ .

### Висновки

Проведений аналіз стану та розвитку мікроелектромеханічних систем показує, що MEMS прилади, пристрої та системи активно розвиваються і знаходять широке застосування практично у всіх галузях науки і техніки. Проектуванню, розробці та удосконаленню цих систем приділяють велику увагу світові лідери МСТ. Проте, незважаючи на це, сукупність конструктивно-технологічних, схемотехнічних та функціональних особливостей дозволяють стверджувати, що одним з головних напрямків подальшого розвитку цієї галузі є підвищення якісних характеристик на основі нових ефектів, які побічно зв'язані з зменшенням розмірів, та створення нових «специфічних» MEMS приладів та систем.

### Література

1. What is MEMS Technology. - <http://www.memsnet.org>.
2. MicroElectroMechanicalSystems(MEMS). - <http://www.csa.com/discoveryguides/mems>.
3. Hocker G. B. MEMS-Based Sensors. - <http://www.wtec.org>
4. MEMS technologies and applications. SPIE PRESS. 2000. Vol. PM85. 516 p.
5. Abaqus ver. 5.7. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, <http://www.hks.com>.
6. MEMCAD ver. 4.5. Microcosm Technologies, Inc., Research Triangle, NC, <http://www.memcad.com>.
7. IntelliSuite, IntelliSense Corp. Wilmington, MA, <http://www.intellisense.com>.
8. Funk J.M., Korvink J.G., Buhler J., Bachtold M., Bakes H. SOLIDIS: A tool for microactuator simulation in 3-D // J. Microelectromechanical Systems. Mar. 1997. Vol. 6, № 1. P. 70-82.
9. ANSYS/Multiphysics ver. 5.5. Ansys, Inc., Canonsburg, PA, <http://www.ansys.com>.
10. Star-HSPICE, Avant! Corp., Fremont, CA, <http://www.avanticorp.com>.
11. Simulink ver. 3.0, The Mathworks, Inc., Natick, MA, <http://www.mathworks.com>.
12. SABER. Analog Inc., Beaverton, Oregon, <http://www.analogy.com>.
13. ADXL150/250, Signal Chip MEMS Accelerometer with Signal Conditioning Datasheets, Analog Devices, Cambridge, MA. - <http://www.analog.com>.
14. General-purpose accelerometer from Jewell. - [www.sensormag.com/express/announce.cgi](http://www.sensormag.com/express/announce.cgi).

<p>Казаченко Г.А., Гераїмчук М.Д. <b>Развитие и состояние микроэлектромеханических систем</b></p> <p>В работе проведен анализ состояния и развития микроэлектромеханических систем (MEMS), рассмотрены технологические процессы их изготовления и программное обеспечение компьютерного модулирования MEMS. Рассмотрены существующие микро устройства, приборы и системы измерения параметров движения, в частности, ускорения, а также приборы ориентации и навигации.</p>	<p>Kazachenko G.A., Geraimchuk M.D. <b>Condition and development of microelectromechanical systems</b></p> <p>In this paper the analysis of a condition and development of microelectromechanical systems (MEMS) is lead, technological processes of their manufacturing and the software of computer modulation MEMS are considered. Existing micro devices and systems of measurement of parameters of movement, in particular, acceleration, and also devices of orientation and navigation are considered.</p>
---	--

Надійшла до редакції

27 листопада 2007