

*Будь-який матеріальний предмет – це  
всього лише скупчення атомів у просторі.  
Те, як ці атоми зібрані в структуру,  
визначає, що це буде за предмет.*

С. Лем

## ВСТУП

Функціональні та технологічні успіхи кремнієвої електроніки в недавньому минулому уможливили не лише реалізацію мікромініатюризації пасивної частини мікроелектроніки, але й інтеграцію в єдиний кристал динамічної складової функціональної схемотехніки. Це мікророзмірів (від гр. *mikros* – малий), а сьогодні вже нанорозмірів рухомі конструкції з мініатюрних шестерень, пружин тощо. Працюють ці мікромеханізми на енергії статичних розрядів і в них актуальні атомарні сили та мікрорельєф поверхні кристала. Такі електронні пристрої називаються мікроелектромеханічними системами МЕМС (аббревіатура від англ. MEMS – *Microelectromechanical Systems*). Вперше МЕМС сформувався як самостійний науковий напрям у 1987 р. в Salt Lake City, (штат Юта), на конференції з твердотільної мікродинаміки.

Історично термін “мікроелектроніка” виник із появою базових елементів транзистора характерних розмірів, перші із них – близько 10 мкм. За півсторіччя розміри мікроелектронних компонентів зменшились майже у 200 разів. Сьогодні із мікроелектронних компонент формують електромеханічні й мехатронні (механічні компоненти) системи, розміри яких перевищують 1 мкм; МЕМС – 1...1000 мкм та НЕМС (аббревіатура з англ. NEMS – *Nanoelectromechanical Systems*) – 1...100 нм (нано – від грец. *nannos* – карлик). У принципі межі між нанотехнологіями умовні.

Сьогодні ці складні функціональні вузли інтегровані з процесорною технікою і являють собою мікроелектромеханічні, мікрооптоелектромеханічні, мікроакустоелектромеханічні пристрої з рухомими елементами, що утворюють єдину інтегровану МСТ. Теоретичні основи МЕМС закладені працями Фейнмана, Натансона, Петерсона, Заврацького і Лучиніна.

Мікросистемна техніка – це окремий науково-технічний напрям. Його мета – створити в обмеженому просторі твердого тіла або на його поверхні багатофункціональні пристрої у вигляді впорядкованих композицій областей із заданим складом, структурою та геометрією. Їх статична чи динамічна сукупність забезпечує генерацію, перетворення, передавання енергії та руху в інтеграції з процесами відтворення, обробки, трансляції та збереження інформації під час виконання запрограмованих операцій та дій у потрібних умовах експлуатації. У табл. 1 наведено систематизацію структури виробів та розробок МСТ.

## Структура виробів і розробок МСТ

| Клас об'єкта МСТ                  | Напрямок розробок  |
|-----------------------------------|--|
| Мікроелектронні системи і машини  | Мікромеханізми, мікроприводи, мікродвигуни   |
| Оптико-механічні мікросистеми     | Мікрооптика, оптико-механічні інтегральні схеми  |
| Біотехнічні мікросистеми          | Мініатюрні автономні системи для діагностики організму і заміни органів                                  |
| Мікросистеми енергозабезпечення   | Автономні мініатюрні джерела енергії, мікротурбіни, мікросистеми рекуперації енергії                     |
| Сенсорні мікросистеми             | Мультисенсори, інтелектуальні сенсори, сенсори з оберненим зв'язком                                      |
| Мікроаналітичні системи           | Мініатюрні аналітичні прилади  |
| Технологічні мікросистеми         | Мікрореактори, мікроінструменти, мікрорегулятори, мікронасоси  |
| Міні- і мікророботехнічні системи | Автономні багатофункціональні діагностичні й технологічні міні-системи для спеціальних умов експлуатації |

Подальше зменшення розмірів функціональних МЕМС-елементів привело до створення наноелектромеханічних\* систем (НЕМС, аббревіатура від англ. NEMS – *Nanoelectromechanical Systems*). Серед основних завдань цього напрямку – конструювання наноструктурованих, нанофазних, нановолоконних та наноконпозиційних матеріалів. Це такі основні структурні елементи, як кристаліти, волокна, шари, пори тощо, розміри яких не перевищують 100 нм хоча б в одному напрямку. До багатокомпонентних гетерофазних матеріалів з межами поділу фаз можна зарахувати металополімерний наноконполімер із високим вмістом феромагнітних частинок розміром до 5 нм для запису інформації із високою щільністю.

Розвиток оптоволоконних технологій дав змогу виокремити новий клас МЕМС – мікро(нано)оптикоелектромеханічні системи (М(Н)ОЕМС). М(Н)ОЕМС дають змогу поєднати оптичні, механічні елементи й ефекти у електронні, за рахунок яких інтегровані системи спроможні працювати за високих температур [1.1]. Нижче наведено класифікацію за функціональним призначенням видів наносистемної техніки [1.2]. У них дія електронних наносистем ґрунтується на перетворенні електричних сигналів, оптичних – на перетворенні світлових сигналів на електричні й, навпаки, механічних – на перетворенні механічного руху.

Загалом, М(Н)ОЕМС забезпечують конвертацію величин різної фізичної природи (електричної, магнітної, теплової, механічної тощо) і їх можна поділити на такі групи: давачі, актюатори, мікро(нано)структури і мікро(нано)електроніка.

\* Англійський термін “nanotechnology” запропонував японський професор Норіо Танігучі в середині 70-х років минулого століття і використав у доповіді “Про основні засади нанотехнології” (*On the Basic Concept of Nanotechnology*) на міжнародній конференції в 1974 р.

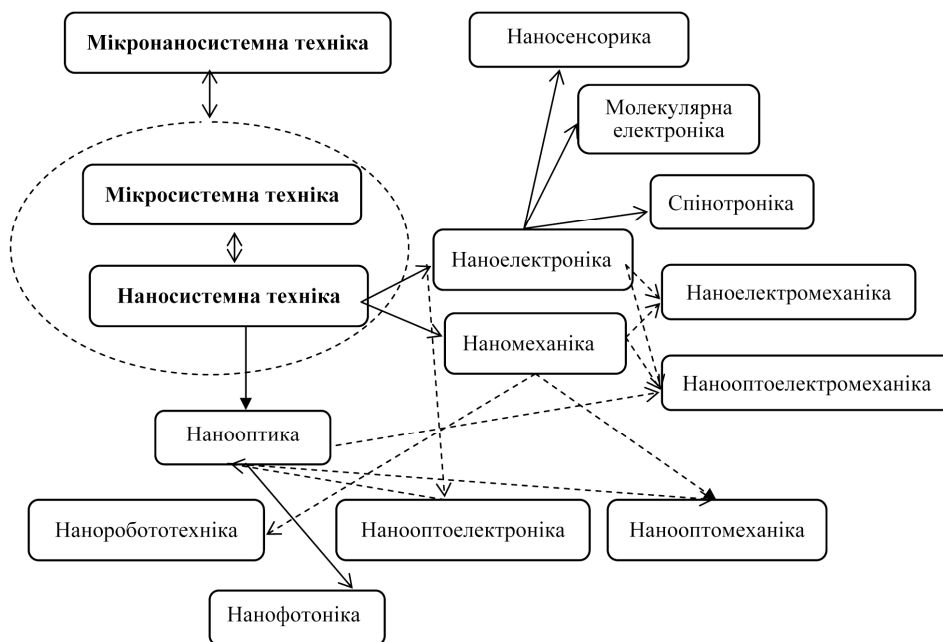


Рис. 1. Класифікація наносистемної техніки за функціональним призначенням

Давачі й актюатори перетворюють енергію із одного виду на інший: давачі із вимірюваного параметра на електричний сигнал, актюатори – електричну енергію на механічну. В мікролабораторіях (давачі й актюатори інтегровані разом з мікропроцесором у вигляді одного кристала) досягається складніше функціональне опрацювання і перетворення сигналів. Основні технологічні методи виготовлення пристроїв мікросистемної техніки детально викладено в багатьох джерелах, наприклад [1.3]. Серед нано- і мікроелектромеханічних пристроїв особливе місце займають так звані теплові мікродавачі потоку, принцип дії яких ґрунтується на залежності інтенсивності конвективного перенесення тепла від швидкості рухомого середовища (флюїда).

І на завершення зазначимо таке. Мікросистеми функціонально являють собою інформаційно-керуючі системи різного призначення, які структурно об'єднують підсистеми збирання і обробки інформації, що генерується дією на виконавчі пристрої, а відтак на об'єкт керування. До функціональних мікропристроїв інформаційно-керуючих систем належать перетворювачі фізичних величин, фільтри, подільники, підсилювачі, перетворювачі, мікроконтролери (процесори), запам'ятовуючі пристрої тощо. Функціонально виконавчими мікропристроями МСТ є мікродвигуни, мікрорідинні елементи, мікродзеркала, мікроприводи, виготовлені поверхневою та об'ємною обробкою на поверхні, переважно кристала кремнію.