

Для оцінки конструкційних розмірів повітророзподільника введемо узагальнений параметр повітроводу  $\tau$ :  $\tau = \sqrt{ab}/L$ . Аналіз діаграми рис. 2 дає змогу стверджувати, що для ланок повітророзподільних пристроїв з  $0,1 < \tau < 0,14$  похибка комп'ютерного моделювання по відношенню до результатів експериментальних досліджень не перевищує 10 %. За діаграмою рис. 3 встановлено значення параметра повітроводу  $0,05 < \tau < 0,3$  для якого похибка моделювання не більша, ніж 20 %.

### Висновки

Повітророзподільні ланки ЛСПП базових несучих конструкцій для електронних засобів мають параметр  $\tau$ , що змінюється у межах, встановлених під час досліджень. Отже, створена модель повітророзподільника може застосовуватись для синтезу відповідних ланок систем примусового повітрообміну, забезпечуючи достатню для проектних розрахунків точність.

На основі створеної математичної моделі запропонований метод аеродинамічного синтезу конструкції роздавальної ланки систем локальної подачі повітря, використання якого у процесі проектування уможливило забезпечити задані температурні поля у електронних засобах вищих рівнів ієрархії та за рахунок цього дає змогу підвищити надійність конструкції і скоротити процес проектування

1. Бакума С.Н., Бондарев А.Д., Горохов С.М. Моделирование воздушораспределения в каналах РЭА в задачах анализа тепловых режимов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. – 1991. – № 3. – С. 48–56. 2. Кушелевский А.А., Абдрахманов Т.А., Бабич А.А. Опыт решения прикладных задач аэродинамики при проектировании систем воздушного охлаждения передвижной РЭА // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО. – 1984. – № 3. – С. 102–108. 3. Спокойный Ю.Е., Трофимов В.Е., Сконежный В.В., Гайдаров Б.М. Исследование воздушораспределителей с продольной щелью для систем струйного воздушного охлаждения электронных модулей в БНК РЭС // Вопросы радиоэлектроники. Серия ТРТО. – 1991. – № 1. – С. 9–14. 4. Гліненко Л.К., Фаст В.М., Янбашев М.М. Моделювання повітроводу з отворами різної площі для систем примусової подачі повітря: Зб. науково-технічних праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2003. – Вып. 13.1. – С. 160–164.

УДК 621.31

М.К. Курок

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних засобів комп'ютерно-інформаційних технологій

### ВИСОКОЧУТЛИВІ МІНІАТЮРНІ ПЕРВИННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ ДЛЯ МЕДИЧНИХ АПАРАТІВ

© Курок М.К., 2005

**Проведено аналіз характеристик існуючих первинних перетворювачів тиску для медичних апаратів; показано доцільність використання перетворювачів, принцип дії яких ґрунтується на деформаційних ефектах в напівпровідникових структурах.**

**An article contains analysis of characteristics of existing primary pressure transducers for medical apparatuses; demonstration of application expediency of transducers, whose principle of work is based on deformation effects in semi-conductor structures.**

### Вступ

Як відомо, науково-технічний прогрес сприяє всебічному розвитку людської спільноти. Він покращує життя, робить його змістовнішим. Але, на жаль, він також призвів і до певних негативних наслідків, основними з яких є забруднення довкілля і зростання захворюваності на діабет, гіперто-

нію, алергію, астму тощо. Все частіше на ці хвороби страждають молоді працездатні люди. До заходів, які можуть покращити ситуацію, відноситься неперервний контроль стану функціональних систем організму в домашніх умовах, на роботі, в дорозі. Для цього потрібні прості в користуванні малогабаритні медичні апарати, які б людина, подібно до годинника, плеєра чи мобільного телефона, могла постійно носити з собою для неперервного контролю за станом організму. Крім того, бажано, щоб такі медичні прилади могли контролювати стан кількох систем організму, тобто були комплексними. Тоді їх доцільно було б використовувати не тільки хворим людям, але й, наприклад, спортсменам для оптимізації режимів фізичних навантажень.

### Постановка задачі

Багато медичних діагностичних апаратів вітчизняного та закордонного виробництва контролюють такі показники людського організму, як частота пульсу, тиск крові, вентиляційна функція легень, температура тіла тощо [2; 4; 5]. В них використовуються різноманітні механоелектричні перетворювачі, з яких найбільш розповсюдженими є первинні перетворювачі тиску. Потрібно проаналізувати, наскільки точними, чутливими, малогабаритними і придатними для неперервного вимірювання є первинні перетворювачі тиску, які використовуються в медичних діагностичних апаратах. Така інформація буде корисною не тільки медикам і пацієнтам, але й технічним спеціалістам.

### Аналіз властивостей існуючих перетворювачів тиску

Широко розповсюдженими в медичному приладобудуванні є первинні перетворювачі тиску тензорезистивного, ємнісного, п'єзоелектричного, магнітопружного типів, які розроблені і впроваджені такими відомими корпораціями, як Siemens, Sensor, Philips, Microlife.

В основу принципу дії тензорезистивних перетворювачів покладено явище зміни електричного опору провідникового матеріалу під час його механічної деформації. Основною характеристикою чутливості матеріалу до механічної деформації є коефіцієнт відносної тензочутливості, який визначається як відношення відносної зміни опору до відносного видовження провідника. Для напівпровідникових тензорезисторів коефіцієнт тензочутливості визначається, насамперед зміною питомого електричного опору. Сучасна напівпровідникова тензометрія розвивається у кількох напрямках. Перший напрямок пов'язаний з розвитком одиничних приклеюваних тензорезисторів, а другий – зі створенням інтегральних тензомодулів та мостових тензорезистивних структур. Недоліком тензорезисторів є погіршення їх метрологічних характеристик під дією повзучості, механічного гістерезису, температури довкілля. Останнім часом широке застосування знайшли напівпровідникові мостові тензорезистивні структури, які є мініатюрнішими і точнішими порівняно з одиничними напівпровідниковими тензорезисторами. Інші переваги і недоліки тензорезистивних перетворювачів перераховані в таблиці "Орієнтовні значення деяких характеристик перетворювачів тиску" [1; 2; 4; 5; 6; 7].

Ще одним видом перетворювачів тиску, який набув широкого застосування, є первинні перетворювачі ємнісного типу, що являють собою електричні конденсатори, ємність яких змінюється внаслідок зміни, під дією вимірюваної величини, відстані між обкладками, площі перекриття обкладок, або діелектричної проникності середовища між обкладками. Чутливими елементами ємнісних перетворювачів тиску є мембрани і діафрагми, які є електродами і перетворюють вимірюваний тиск у переміщення. Отже, чутливість ємнісного перетворювача визначається відносною зміною ємності, яка для ємнісного перетворювача тиску з еластичною мембраною обчислюється за формулою (1), а для перетворювача тиску зі штвиною мембраною – за формулою (2).

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{R^2}{8 \cdot \delta \cdot W} \cdot P; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{(1 - \mu^2) \cdot R^4}{16 \cdot E \cdot \delta \cdot h^3} \cdot P, \quad (2)$$

де  $C_0$  – початкова ємність перетворювача;  $R$  – радіус мембрани;  $\delta$  – відстань між обкладками (электродами);  $W$  – штвність мембрани;  $P$  – діючий тиск;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль

пружності матеріалу мембрани;  $h$  – товщина мембрани (всі величини подані в системі СІ). Ці перетворювачі мають високу чутливість і малі габарити, але під час їх конструювання потрібно особливу увагу приділяти вибору матеріалів (для забезпечення мінімальної температурної похибки деталі чутливого елемента мають бути дуже близькими за значенням до ТКЛР). Істотним також є електростатичне екранування всіх виводів ємнісного перетворювача.

Сьогодні дуже широко використовуються п'єзоелектричні перетворювачі, дія яких ґрунтується на використанні п'єзо ефекту. Прямий п'єзо ефект полягає в поляризації певного класу діелектриків за механічних напружень в їх кристалах. Найчастіше використовуються такі п'єзоелектричні матеріали, як кварц і штучно поляризована п'єзокераміка. П'єзоелектричні перетворювачі мають дуже високу точність, крім того, вони мають високий вхідний механічний опір, тобто надзвичайно мало деформуються. Їх недоліками можна вважати малу діелектричну проникність і обмеження п'єзоелектричних властивостей певним температурним діапазоном.

Рідше як первинні перетворювачі тиску використовуються магнітопружні перетворювачі, дія яких ґрунтується на магнітопружному ефекті, тобто на зміні магнітної проникності (чи інших магнітних властивостей) феромагнетика під дією механічних пружних деформацій. Явище магнітної пружності називають також зворотним магнітострикційним ефектом. Умовою нормальної роботи магнітопружного перетворювача є відсутність у матеріалі магнітопроводу повітряних проміжків. Цей вид перетворювачів має досить просту конструкцію, що є його перевагою. Але основний вплив на точність такого перетворювача здійснює так зване “механічне тренування” чутливого елемента, також впливає старіння феромагнітного матеріалу, яке супроводжується зміною його магнітної проникності [1; 2; 4; 5; 6; 7].

### Використання деформаційних ефектів для виготовлення високочутливих первинних перетворювачів тиску

Як зрозуміло з вищенаведеного огляду, у перетворювачів тиску, принцип дії яких ґрунтується на тензорезистивному, ємнісному, п'єзоелектричному чи магнітопружному ефектах, є свої переваги і недоліки. Їх порівняльні характеристики наведені в таблиці “Орієнтовні значення деяких характеристик перетворювачів тиску”, з аналізу якої випливає, що найбільш чутливими є тензорезистивні дискретні та інтегральні напівпровідникові перетворювачі, а найбільш мініатюрними – напівпровідникові структурні перетворювачі. В зв'язку з цим доцільно розглянути можливість конструювання первинних перетворювачів на деформаційних ефектах напівпровідника.

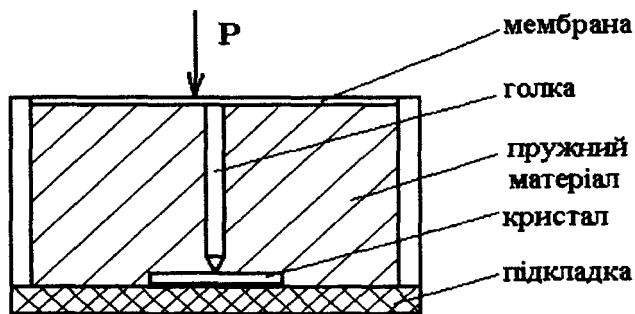
Деформаційний ефект у напівпровідниках пов'язаний із взаємодією електронів з кристалічною ґраткою. Фізичною причиною виникнення цього ефекту є зміщення енергетичних рівнів напівпровідника під дією деформацій і пов'язана з цим зміна спектра носіїв заряду – електронів та дірок – залежно від деформацій [3; 7]. Перетворювачі, принцип дії яких ґрунтується на деформаційних ефектах, мають ряд переваг: малі габаритні показники, високу чутливість, широкий діапазон робочих частот в низькочастотній області спектра. Недоліками таких перетворювачів є температурна нестабільність їх характеристик і крихкість, тому для їх захисту від зовнішніх механічних перевантажень потрібно розробляти спеціальні конструктивні захисні елементи.

### Орієнтовні значення деяких характеристик перетворювачів тиску

Вид первинного датчика	Підвид	Чутливість, Па <sup>-1</sup>	Переваги і недоліки датчика	Габаритні показники
1	2	3	4	5
тензорезистивний	металевий	$6 \cdot 10^{-11}$	(+): простота конструкції; (-): погіршення характеристик під впливом повзучості, механічного гістерезису; температурна нестабільність	вимірвальна база: 3–30 мм
	напівпровідниковий дискретний	$1 \cdot 10^{-12}$	(+): вища чутливість, менші габарити; (-): складність монтажу, температурна нестабільність, великий розкид характеристик	10–15 мм

1	2	3	4	5
	напівпровідниковий інтегральний	$7 \cdot 10^{-12}$	(+): висока точність, технологічність, універсальність; (-): складність конструювання та монтажу	2–6 мм
п'єзоелектричний (поздовжній п'єзоэффект)	п'єзокварцовий	$2,3 \cdot 10^{-12}$	(+): стійкість до дії температури та вологи, механічна міцність, висока точність, простота конструкції; (-): мала діелектрична проникність	поперечний розмір: 3–30 мм
	п'єзокерамічний	$7,8 \cdot 10^{-11}$	(+): чутливість до об'ємної деформації, висока діелектрична проникність, висока точність, простота конструкції; (-): п'єзоелектричні властивості, обмежені температурним діапазоном	
ємнісний	з еластичною мембраною	$1 \cdot 10^{-12}$	(+: висока чутливість, малі габарити; (-): вплив паразитних ємностей конструктивних елементів; потрібне екранування виводів	діаметр електродів: 10–25 мм
	зі штвальною мембраною			
магнітопружний	магнітострикційний	$5 \cdot 10^{-9}$	(+): простота конструкції; (-): невисока чутливість, магнітопружний гістерезис, старіння феромагнетика	переріз магнітопроводу: $\geq 25 \text{ мм}^2$
напівпровідниковий структурний	напівпровідниковий діод	$1 \cdot 10^{-10}$	(+: малі габарити, висока чутливість, широкий діапазон робочих частот; (-): температурна нестабільність, крихкість	площа: $< 1 \text{ мм}^2$
	тунельний діод	$2 \cdot 10^{-10}$		
	діод Шотткі	$4 \cdot 10^{-11}$		
	напівпровідниковий транзистор	$1 \cdot 10^{-10}$		

Для розробки високочутливого перетворювача важливим є метод створення деформацій в напівпровіднику. Найкраще отримувати максимальну концентрацію тиску в малій області напівпровідникового матеріалу. Такої концентрації можна досягти за допомогою спеціальної голки. Пропонується, для досягнення максимальної чутливості перетворювача, вимірюваний тиск передавати через мембрану, з'єднану з голкою, на область р-п переходу напівпровідникового кристала. Схематично конструкція перетворювача тиску голко-мембранного типу показана на рисунку:



Конструкція перетворювача тиску голко-мембранного типу

Конструкція такого перетворювача має забезпечувати добрий контакт голки з напівпровідником та вільну передачу тиску вздовж голки, а також захищати кристал від руйнування при раптових перевантаженнях. Чутливість напівпровідникових структур до тиску можна визначати за відносною зміною струму р-п переходу [3; 7]:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T \cdot (a^2 + d^2)}{\alpha \cdot P_0 \cdot S} \exp \left[ \frac{\alpha \cdot P_0}{k \cdot T \cdot (1 + d^2 / a^2)} \right], \quad (3)$$

де  $S$  – площа р-п переходу;  $I_0$  – повний струм в недеформованому р-п переході;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура в градусах Кельвіна;  $\alpha$  – константа, яка залежить від типу напівпровідника і виду деформації;  $P_0$  – діючий тиск;  $a$  – радіус поверхні контакту голки та напівпровідника;  $d$  – глибина залягання р-п переходу в кристалі (всі величини подані в системі СІ).

### Висновок

Аналіз параметрів перетворювачів тиску, наведених в таблиці, показав, що доцільним є конструювання перетворювачів на деформаційних ефектах в напівпровідникових структурах. Порівняно з іншими типами перетворювачів вони мають багато переваг, а саме: високу чутливість, широкий діапазон робочих частот, малі габарити. Це дасть змогу значно зменшити масогабаритні показники приладів з використанням перетворювачів такого типу, поряд з підвищенням їх точності вимірювання, що є важливим під час проектування комплексних діагностичних медичних апаратів неперервного контролю.

1. Поліщук Є.С. *Методи та засоби вимірювань неелектричних величин: Підручник.* – Л., 2000. 2. Поліщук Є.С. *Метрологія та вимірвальна техніка: Підручник.* – Л., 2003. 3. Полякова А.Л. *Деформація напівпровідників і напівпровідникових приборів.* – М., 1979. 4. *Сенсоры в контрольно-измерительной технике* / П.М. Таланчук, С.П. Голубков, В.П. Маслов и др. – К., 1991. 5. Мейзда Ф. *Электронные измерительные приборы и методы измерений* / Пер. с англ. – М., 1990. 6. *Электрические измерения неэлектрических величин* / Под ред. П.В. Новицкого – Л.: Энергия, 1975. 7. Титце У., Шенк К. *Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство* // Пер. с нем. – М., 1982.