

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ
Центр заочної та дистанційної форм навчання

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

ДАТЧИКИ СИЛИ ТА ТИСКУ НА ОСНОВІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Студент гр. ЕП_з-51_к

П.О. Рильський

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., ст. викладач

І.П. Бурик

Нормоконтроль,
к.т.н., ст. викладач

О.Д. Динник

Конотоп 2020

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛІВКОВИХ ДАТЧИКІВ СИЛИ ТА ТИСКУ	5
1.1 Тензометричні датчики.....	5
1.2. Ємнісні датчики.....	12
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	17
2.1 Методика отримання плівкових матеріалів.....	17
2.2 Методика дослідження тензорезистивних властивостей плівок.....	18
2.3 Методика розробки структурних моделей в ANSYS	22
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	26
3.1 Конструктивно-технологічні особливості плівкових датчиків.....	26
3.2 Робочі характеристики плівкових тензодатчиків.....	27
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33
ДОДАТОК А	36

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи бакалавра є тензорезистивні властивості плівкових матеріалів та їх застосування у датчиках сили та тиску.

Мета роботи – полягає у вивченні структури та електрофізичних властивостей плівкових тензодатчиків та їх застосування у сучасній сенсорній техніці та електронному приладобудуванні.

Робота складається із вступу, основної частини із трьох розділів та висновків. У першому розділі приведено огляд тензометричних та ємнісних датчиків сили та тиску як первинних вимірювальних перетворювачів з високою часовою стабільністю, малою зміною їх показів у широкому температурному діапазоні та ін. У другому розділі стисло описано найбільш розповсюджених методів отримання, дослідження та моделювання плівкових тензодатчиків. В третьому розділі розглянуто конструктивно-технологічні особливості та тензорезистивні властивості плівкових тензодатчиків. Наведено чисельне моделювання механічних характеристик тензометричного плівкового елемента. Проведено розрахунок робочих характеристик тензодатчика, змодельовано деформаційний розподіл для визначення необхідного варіанта конструкції. При виконанні роботи використовувалося програмне середовище ANSYS, зокрема окремий модуль Static Structural.

Робота викладена на 36 сторінках, включаючи рисунків - 15, таблиць - 2, список цитованої літератури - 31 джерело.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПЛІВКОВИЙ ТЕНЗОДАТЧИК, ДАТЧИК СИЛИ, ДАТЧИК ТИСКУ, ДЕФОРМАЦІЯ, СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ ДАТЧИКА

ВСТУП

При автоматизації виробничих процесів, в пристроях сигналізації та ін. активно застосовуються датчики тиску та сили. Найбільш розповсюдженими були сильфонні датчики як такі, що не вимагають підсилення, а генерований сигнал з них подається на виконуючий орган системи керування. З подальшим розвитком електроніки почали застосовуватись менш чутливі, проте більш надійні датчики на основі тонкоплівкових елементів [1-10]. Подібні датчики будуються на основі тензорезистивних чутливих елементів (ЧЕ). Як правило останні мають лінійну, позитивну або негативну залежність електроопору від температури. Вони можуть бути виготовлені з напівпровідника або металу. Такі датчики мають хорошу збіжність параметрів, достовірність та часову стабільність. Слід відмітити, що для виготовлення плівкових та дротяних датчиків як ЧЕ використовується платина, іридій, нікель, мідь, сплави з алюмінію і т.п. Поширеними є метало плівкові тензодатчики, оскільки вони можуть працювати в широкому діапазоні деформацій, не потребують додаткового живлення, стабільні в часі.

Відомо, що у сучасних засобах автоматизації як ЧЕ переважно застосовуються плівкові датчики сили та тиску. Вони бувають одно- чи багатокомпонентні, у вигляді сплавів або багатошарові, як правило в них використовується тензорезистивний ефект. Хоча також може змінюватись ємність між мембранами, які прогинаються або лінійно деформуються під дією різниці сил та тисків. Метрологічні параметри таких датчиків визначаються насамперед якісними механічними характеристиками пружних елементів, що деформуються.

РОЗДІЛ 1

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛІВКОВИХ ДАТЧИКІВ СИЛИ ТА ТИСКУ

1.1. Тензометричні датчики

Удосконалення контролю різноманітних технологічних операцій та процесів, нові вимоги до систем управління, діагностики, їх автоматизація обумовлюють інтенсивний розвиток тензорезистивних сенсорів різних за властивостями та будовою [5-8]. Постійний розвиток в області створення таких сенсорів спрямований на поліпшення їх основних характеристик: компактна конструкція та планарна технологія, стабільність, економне живлення, підвищення чутливості, лінійність шкали, незначний гістерезис, зменшення часу спрацьовування або швидкодія, ефективна інтеграції з мікропроцесорними або мікроконтролерними засобами обробки, тощо [11-14]. Напівпровідникові сенсори займають передові місця в цьому процесі. Слід відмітити, що для напівпровідникових тензорезисторів розглядається можливість їх виготовлення з різними електро-механічними властивостями, що неможливо для провідникових та фольгових тензорезисторів [6].

Як приклад розглянемо декілька типових промислових тензометрів [14-20]. Датчики фірми EMSYST [18] призначені, перш за все, для виміру сил різних промислових машин. Прикладом може бути визначення відношення сила/дорога, яке вимірюється часто (автомобільні і авіаційні амортизатори, пружини, буфери і т. п.), або вимір сил на пресах і гідравлічних агрегатах. Такі датчики можна застосовувати і для технологічного зважування. Універсальні мембранні датчики EMS 20, 30, 40, 50, 60 група датчиків на мембрані з однаковими метрологічними параметрами. Вони працюють за принципом деформації останньої, і цим обумовлена їх геометрія. Такі датчики відрізняються лише способом закріплення, за допомогою зовнішнього різьблення закріплюється EMS20, внутрішнього -

EMS30 (рис.1.1а,б). Датчики EMS40, EMS50 і EMS60 призначені для вимірювання сили відносно підставки. Відомо, що клас точності датчиків вказує на відсоткову помилку датчика, яка відноситься до його меж спрацьовування. Інакше розраховується точність датчиків ваги, їх точність вказується перевірою діленням. Проте існує співвідношення між цими обома способами. Датчик, який має точність, встановлену за допомогою перевірою ділення 3000 діл. відповідає С3 класу точності. В цьому випадку відсоткова похибка (клас точності) визначатиметься як $(1/(2 \cdot 3000)) \cdot 100 = \pm 0,017\% \text{ FS}$. Детальнішу інформацію про помилки датчиків, призначених для зважування, можна знайти в міжнародних рекомендаціях OIML R60 [14-20].

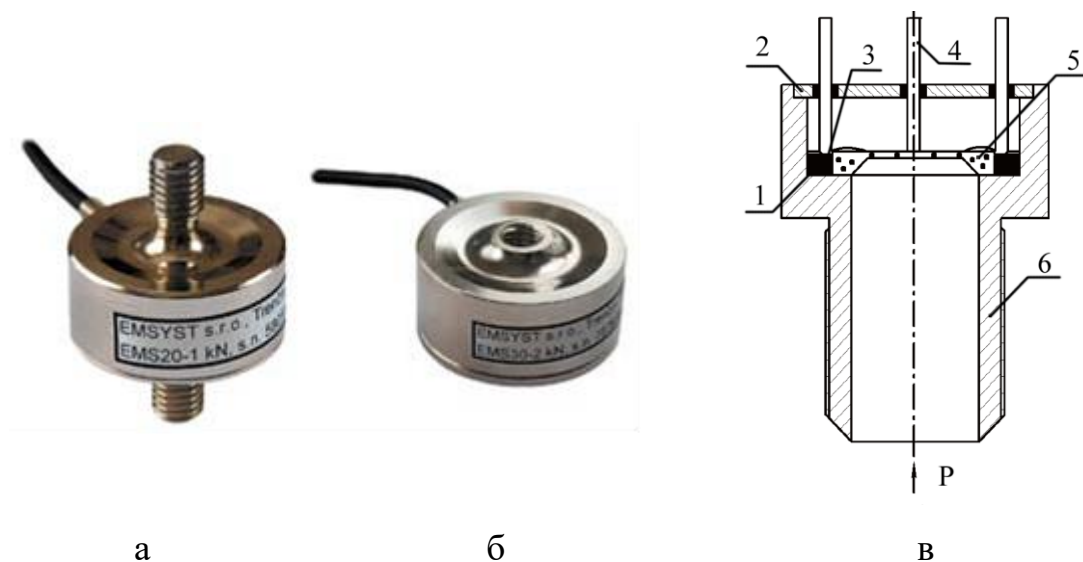


Рис. 1.1. Мембранні тензодатчики EMS20 (а) та EMS30 (б) та їх схематична конструкція (в): 1 – монтажне кільце; 2– захисна кришка; 3 – проміжні провідники; 4 – виводи; 5 – ЧЕ; 6 – корпусний елемент

У тензодатчиках мембранного типу відсутня проміжна ланка (клей) між пружним елементом та чутливим елементом – тензорезистором, на відміну від дротяних наклеюваних тензорезисторів. Відомо, що клей є неодмінною причиною появи додаткових похибок наклеюваних тензодатчиків, як правило через недосконалість його механічних характеристик. Ізоляція чутливого елемента напівпровідникового тензосенсора від тіла пружного елемента (мембрани)

здійснюється за рахунок відповідних властивостей р-n-переходу [5]. Схема мембранного сенсора приведена на рис 1.1в [6].

Отже, мембранний тензодатчик на основі тензорезисторів виготовляють за планарною кремнієвою технологією [5]. Частину підкладки витравляють до утворення тонкої пружної мембрани 1. Потім методом іонної імплантації на такій мембрані, формують тензочутливу інтегральну схему 2. При зміні зовнішнього тиску або сили мембрана прогинається, а під дією тензоефекту відбувається зміна електроопорів чутливих елементів. Таким чином досягається висока величина чутливості такого датчика(рис. 1.2а).

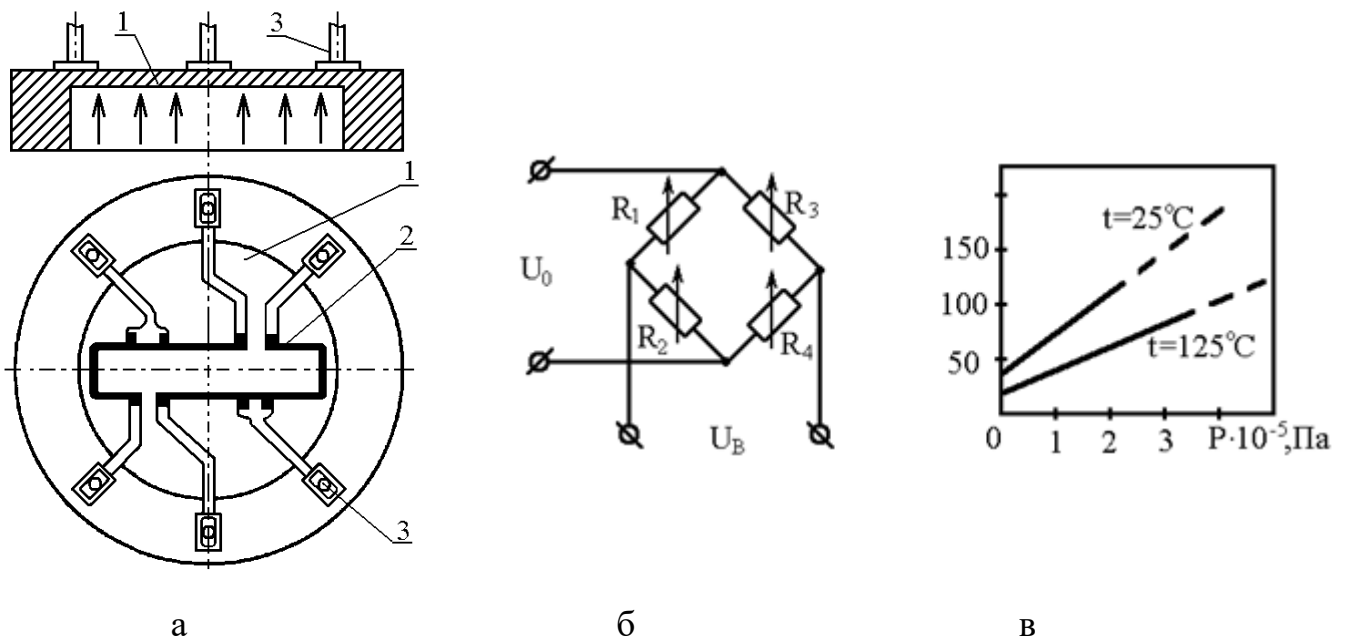


Рис. 1.2. Схема тензорезистивного перетворювача тиску мембранного типу (а), вимірювальний міст (а) та робоча характеристика при двох температурах [4-5]: 1 – мембрана; 2–тензочутлива інтегральна схема (ЧЕ); 3 – контактні виводи

На рис. 1.2б наведено вимірювальна схему мембранного кремнієвого сенсора [4], який складається із чотирьох однотипних тензоелементів, створюючих тензочутливий міст.

Максимальна деформація тензодатчиків залежить від площі поперечного перерізу напівпровідникового ЧЕ, а також від обробки його поверхні. Як приклад

при малому поперечному перерізі ($0,3 \text{ мм}^2$) гранична відносна деформація тензодатчиків сягає до 10^{-3} . При перевищенні граничної максимальної деформації тензодатчик виходить з ладу [3]. Технологічні параметри (геометрична форма ЧЕ, товщина мембрани) визначається інтервалом навантажень.

Як відомо [4], резистори R_1 - R_4 з'єднуються таким чином щоб при деформації мембрани величини електрооприв R_1 і R_3 збільшувались, коли R_2 і R_4 – зменшувались. Така схема забезпечує високу чутливість вимірювального моста. Вихідна напруга ЧЕ U_B обчислюється згідно формули [4]:

$$U_B = U_0 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (1.1)$$

Залежність U_B від тиску P має характерну лінійність (рис. 1.2в). Тангенс кута нахилу (кутовий коефіцієнт) залежить від температури вимірювання. Для підсилення слабкого вихідного сигналу ($\sim 10^{-1} \text{ В}$) застосовується операційний підсилювач (ОП), який видає напругу $U_B \sim 1 \text{ В}$. Поряд з цим для підвищеної точності вимірювань необхідно компенсувати т.зв. температурні похибки. Існують наступні пасивний та активний методи термокомпенсації. [4] Перший за допомогою датчика температури і резистора (датчик температури – паралельно мосту). Слід відмітити, що останні вмикаються у вхідну ділянку моста. Другий метод реалізується за допомогою схеми розв'язки на ОП, яка майже повністю усуває термопохибку.

Фольгові тензорезистивні перетворювачі виготовляють із стрічки товщиною 4-12 мкм. Частина металу останньої вилучена хімічним травленням. Та частина, що залишилася, утворює ЧЕ та контактує з виводами. Типові приклади фольгових тензодатчиків приведені на рис. 1.3 [5].

Як приклад для вимірювання лінійних деформацій застосовують ЧЕ, який зображено на рис. 1.3а [5]. На рис. 1.3 б зображено тензоперетворювач, що складається з чотирьох тензорезисторів, які створюють відповідні чотири плеча моста. Цей ЧЕ наклеюється на мембрану. До виводів (1) і (3) підводиться напруга

живлення, контакти (2), (4') та (4'') утворюють відповідну вимірювальну діагональ. Контакти (4') та (4'') розімкнені для того, щоб можна було включити додаткову величину R в потрібне плече і добитися підбором величини R відповідної рівноваги моста. Слід відмітити, що ЧЕ, розташовані в центрі, випробовують розтягування, на периферії – стиснення.

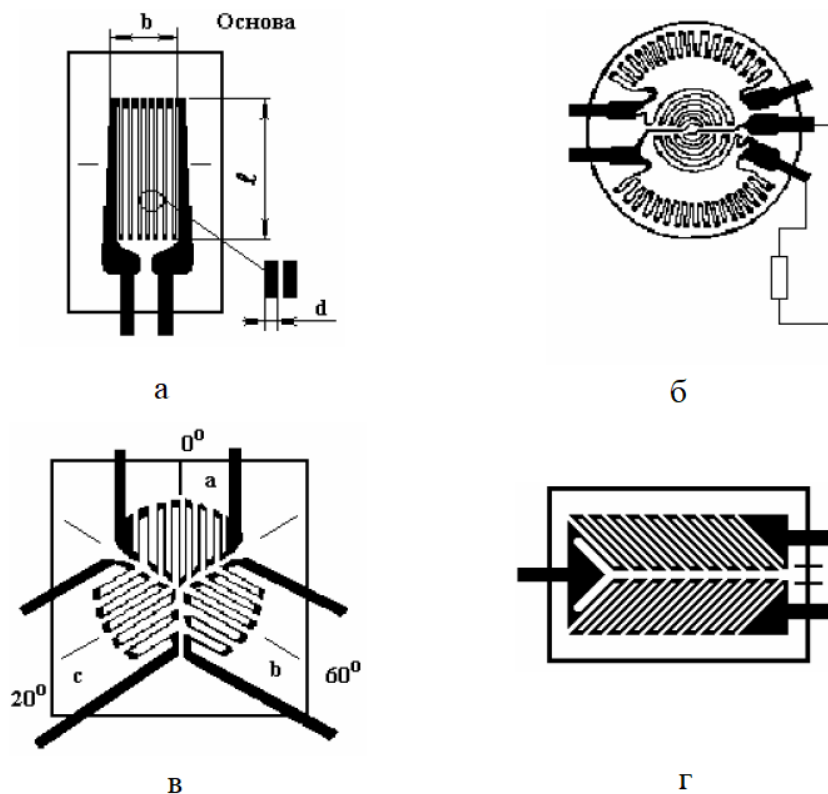


Рис. 1.3. Типові приклади фольгових тензорезисторів [5]

На рис.1.3в наведено типовий тензорезистор, який складається з трьох ЧЕ і використовується коли невідомо який напрямок мають механічні напруження. Тензорезистор представлений на рис.1.3г складається з двох ЧЕ і застосовується для вимірювання відповідних деформації валів при скручуванні. Фольгові ЧЕ мають менші габарити, ніж дротяні; відомі подібні тензорезистори з базою до 0,8 мм. У фольгових тензочутливих елементів [5] поперечна тензочутливість значно менша за рахунок розширення поперечних ділянок. Як відомо [4] кількісний показник тензоефекту коефіцієнт тензочутливості (КТ) для металевих тензодатчиків лежить в інтервалі від 2 до 2,5 одиниць.

Поряд з цим слід відмітити, що на основі напівпровідникового кристала з кремнієвою мембраною (відповідно одного базового модуля) можна створити абсолютний, відносний та диференційний типомінали ЧЕ [7].

На рис.1.4, взятого із роботи [2], наведена схема, яка виконана на трьох кристалах на спільній керамічній підкладці. Гібридна схема такого інтегрального ЧЕ має всі базові елементи для здійснення повної функції перетворення. Зокрема відмітимо такі: повна мостова тензочувлива схема, вакуумована з одного боку (для створення т.зв. еталонного тиску), мембрана з основою; електронна схема на інтегральних ОП для отримання стандартного вихідного сигналу, балансування, температурної компенсації, тощо.

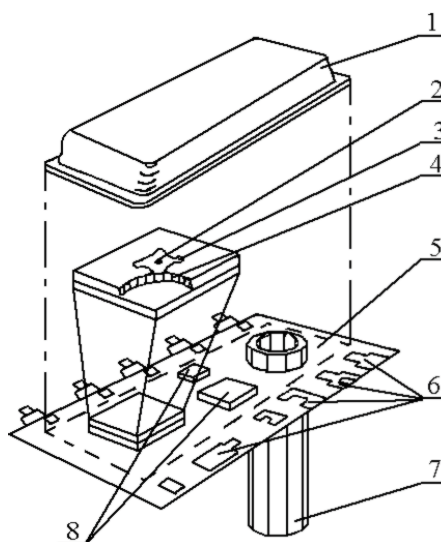


Рис. 1.4. Типова конструкція гібридної інтегральної схеми тензодатчика [2]: 1 – захисна кришка; 2- нагрівальний та термоЧЕ; 3 - тензочувлива мостова схема; 4 - кремнієва мембрана; 5 - керамічна підкладка; 6 – регульовальні товстоплівкові резистори; 7 - трубка для подачі газу, для створення тиску; 8 – ОП

ЧЕ напівпровідникового сенсора сили та тиску являє собою підкладку Si, в якій планарно виконана прямокутна мембрана [2]. На решті площі, що залишилась, розташована тонкоплівкова схема температурної компенсації. Вона балансує міст плівкових резисторів та стабілізує напругу на опорному діоді. На підкладці розміщені також буферні та вихідні ОП. В центрі мостової тензочувливої схеми,

яка являє собою квадратну рамку, розташований потужний транзистор. Останній використовується як нагрівач та підтримує температури ЧЕ в процесі адаптації та різного роду випробувань. Слід відмітити, що емітерно-базовий перехід цього транзистора є високостабільним термоелементом. Таким чином забезпечуються одночасні вимірювання сили або тиску, а також температури [2]. Конструкція інтегрального сенсору з ЧЕ на основі n-p-n-поперечних та p-n-p-поздовжніх тензотранзисторів має наступну будову. Посередині кожної з чотирьох сторін квадратної мембрани, де вона кріпиться до основи, розміщено n-p-n або p-n-p транзистори з різноманітною орієнтацією відносно краю чутливої мембрани. У центрі мембрани розташовані два транзистори - один n-p-n, другий p-n-p. Подібний набір компонентів дозволяє застосовувати їх як незалежно, так і включати у складніші схеми для посилення тензочутливості.

Крім того, за межами мембраною виготовлений планарний транзистор, який може застосовуватись як для компенсації температурних похибок, так і для визначення температури [7].

Окремим напрямом в інтегральних тензодатчиках є створення схем, які складаються з багатьох компонентів, чутливих до дії тиску та тиску [8], які мають стабільність та високу чутливість на поріг спрацьовування. На рис.1.5 наведено типовий приклад такої інтегральної схеми датчика.

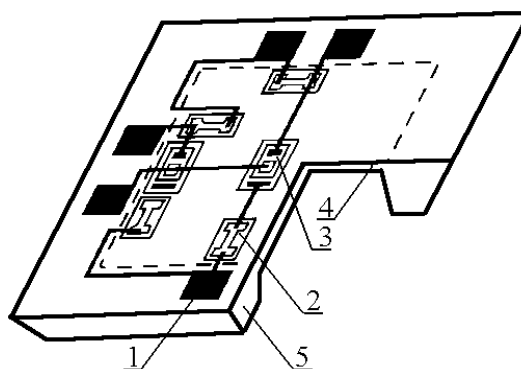


Рис. 1.5. Типовий ЧЕ інтегрального перетворювача сили та тиску [8]: 1 – контактний майданчик; 2 – тензодатчик; 3 – тензотранзистор; 4 – чутлива мембрана; 5 – основа корпусу

Датчик складається з кремнієвої підкладки, яка первинно зорієнтована в необхідній площині. На ній є тонка мембрана, на якій за допомогою її планарної технології виготовлена відповідна інтегральна схема. Одне плече цієї схеми складається з транзистора та двох резисторів, один з яких з'єднується з колектором транзистора, а другий – відповідно із базою. Друге плече моста утворене відповідно транзистором і резисторами, розташованими в центральній частині одного з боків квадратної мембрани. Знаки ЧЕ (транзисторів, базових і колекторних резисторів) протилежні в різних плечах моста. За рахунок цього існує можливість вдвічі підвищити тензочутливість [8].

1.2.Ємнісні датчики

Перспективи використання ємнісних мікроелектронних датчиків пов'язані з їх електрофізичними фізико-механічними властивостями. Ємнісні елементи мають високу чутливість, що дозволяє ефективно підвищити точність і швидкість роботи датчиків, їх малі розміри і вага забезпечують високу вібростійкість і мінімальне енергоспоживання [1,2]. Вони добре узгоджені з вбудованим електронним обладнанням, що дозволяє об'єднати в одній конструкції датчика вторинні пристрої.

Визначення величини сили в класичних ємнісних датчиках ґрунтується на визначенні взаємної ємності. Датчик сили і тиску може бути побудований, якщо між пластинами конденсатора встановлені пружини, а на верхню пластину прикладено силове навантаження. Тоді чим більша сила прикладена, тим більше пластини будуть стискатися, чим менше відстань між ними, тим більша ємність. Але оскільки такі датчики залежать від факторів навколишнього середовища, використання цього принципу вимагає значних конструктивних зусиль. Поряд з цим в якості безконтактних кнопок часто використовують ємнісні датчики. Коли пальцем натискається кнопка відбувається різка зміна ємності (C).

Коли нажимається кнопка збільшується відстань між силіконовою шайбою і електродами. Послідовно змінюється величина C між кришками електродів на печатній платі також видається. Мікросхема контролера перетворює величину C датчика в напругу, яка записується в цифровому коді. Такі датчики використовують у комп'ютерних клавіатурах, пультах дистанційного управління, відеокамерах і т. д. [1-5].

Основу тонкоплівкових ємнісних датчиків сили та тиску становить поліімідна плівка, яка має підвищену механічну міцність та інші високостабільні характеристики в широкому діапазоні температур. Як правило, використовується плівка типу РМ-1Е або її аналоги товщиною 10-20 мкм. У датчиках цього типу ЧЕ 1 (рис. 1.6), виконаний з поліімідною плівки, розташований між основою 2 і гнучкою мембраною 3. На поверхні основи і мембрани за допомогою вакуумного розпилення утворені обкладинки 4, і навколо них - захисні екрани 5. Елементи з'єднані за допомогою клею 6 і закріплені на поверхні профілю 7, з'єднувальні провідники металізовані. Тонкоплівкові ємнісні датчики сили та тиску завдяки їх більшій гнучкості можна розміщувати на корпусах з високою кривизною, на тонких профілях та у важкодоступних місцях [1].

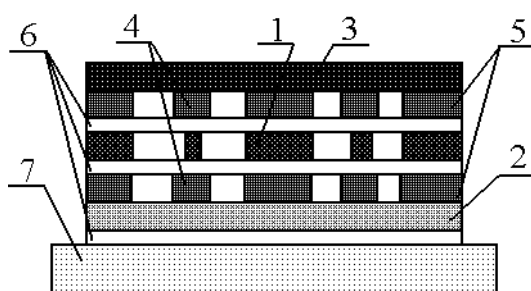


Рис. 1.6. Схематична будова тонкоплівкового ємнісного сенсора [1]: 1 – ЧЕ; 2 – основа корпусу; 3 – мембрана; 4 – обкладинки; 5 – захисні екрани; 6 – клей або компаунд; 7 – профіль поверхні тіла

Стінки перфорованої мембрани працюють в пружному режимі під впливом тиску. Діафрагма датчика на периферії перфорованого отвору (комірки) працює в режимі згинання. Поза зоною ЧЕ тонка плівка (де розташовані металізовані

виводи та екрани) працює в режимі пружного стиснення. У всіх цих режимах роботи датчик плівки може змінювати лінійну ширину, довжину та товщину. Усі шорсткості та виступи клейових шарів деформуються рівномірно. Оскільки сенсорний елемент датчика виконаний з твердої тонкої плівки, референсними реакціями по радіусу перфорації можна знехтувати, оскільки вони виникають лише при великих деформаціях сенсорного елемента [2].

Величина відносної ємності такого датчика визначається як [1]:

$$\frac{\Delta C}{C_1} = \frac{a^4 p (1 - \mu^2) n C_r}{16 E b^3 t (C_2 + n C_r)}, \quad (1.2)$$

де C_r - ємність n -ої комірки із газовим заповненням; C_1 - початкова ємність ЧЕ; C_2 - ємність стінки комірки; a - радіус комірки; b - товщина мембрани; μ - коефіцієнт Пуассона; n - кількість комірок; p - величина тиск; E - модуль пружності Юнга.

При зміні тиску на величину Δp товщина чутливого елемента під обкладками змінюється на величину Δl , відповідно електрична ємність C змінюється пропорційно до тиску на величину ΔC . При цьому вихідна напруга ΔU , що знімається з сенсора, пропорційна до опорної напруги $U_{оп}$ [1]:

$$\Delta U = \frac{\Delta C}{C} \cdot U_{оп}. \quad (1.3)$$

Виходячи з виразу (1.3) величина заряду ΔQ становитиме:

$$\Delta Q = \Delta C \cdot U_{оп} \quad (1.4)$$

На рис. 1.7 наведена перфорована поліїмідна плівка та форма електродів плівкових ємнісних ЧЕ [2]. Для виготовлення датчиків використовується металізована Al або Ni поліїмідна плівка. Фотолітографією формується задана конфігурація елементів. На поліїмідну плівку товщину 12-18 мкм шляхом конденсації в вакуумі через маску наноситься шар металу. До металевих верствам алюмінію або нікелю приварені штирі, які кріпляться зверху струмопровідних клеєм. Для зменшення впливу електромагнітних завад чутливі елементи датчиків захищені екранами з тих же металів. Для типових плівкових ємнісних датчиків з

газовим діелектриком, які мають 55 ... 60 осередків, характерні наступні основні параметри [2]: діапазон робочих температур 0-150 ° С; похибка вимірювання 1,0%; ємність датчика 15-40 пФ; діаметр комірки 4 ... 5 мм; товщина датчика 70-80 мкм; температурний коефіцієнт нестабільності вихідного сигналу 10^{-3} ° С⁻¹; товщина мембрани 12 ... 18 мкм; діаметр перфорації: 0,6 ... 0,8 мм; розміри чутливих елементів 4 ... 9 мм; коефіцієнт перетворення ЧЕ $3 \cdot 10^{-9}$... $4 \cdot 10^{-8}$; межі вимірювання пульсацій тиску 10 ... 8000 Па;

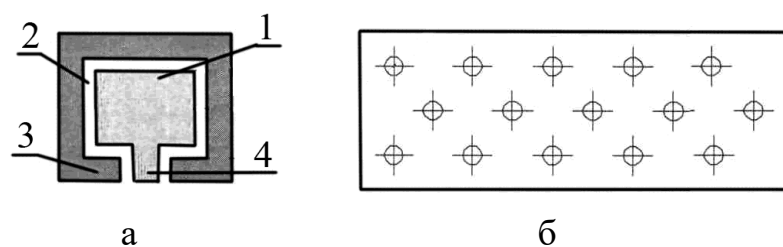


Рис. 1.7. Електроди (а) та перфорована поліімідна плівка (б) тонкоплівкових ємнісних сенсорів сили [2]: електрод; 2 - поліімідна плівка; 3 - екран; 4 – вивід

Залежно від типу діелектрика плівкових ємнісних датчиків – перфорованого чи суцільного, сенсори мають деякі відмінності в характеристиках, які показані в таблиці 1.1 [2]. Обидва сенсори мають лінійні градуовальні характеристики, які не залежать від пульсацій вхідного сигналу в діапазоні 60-400 Гц.

Таблиця 1.1

Особливості характеристик ємнісних плівкових датчиків з перфорованим та суцільним діелектриком [2]

Тип діелектрика сенсора	Ємність, пФ	Тангенс кута діелектричних втрат	Товщина сенсора, мкм	Коефіцієнт чутливості, Па ⁻¹
Перфорований	20-150	0.003	70- 100	$(0.5- 10) \cdot 10^{-9}$
Суцільний	100-200	0.002	60-70	$(0.5- 10) \cdot 10^{-8}$

Одним з найважливіших етапів проектування ємнісних датчиків є вибір матеріалів, оскільки від них залежать деякі метрологічні характеристики, такі як відтворюваність, гістерезис і стабільність температури. Крім того, необхідно

визначити максимально можливий прогин діафрагми, який необхідний для отримання задовільного відхилення лінійності. Як правило, лінійна характеристика виходить тоді, коли прогин не більше половини товщини мембрани ($y_{\max}(r=0) < t/2$). Тоді як поза межами цієї границі лінійність характеристики перетворення ЧЕ можна забезпечити засобами подальшої обробки сигналу. У таблиці 1.2 наведено деякі механічні характеристики матеріалів, які застосовуються для електродів ємнісних ЧЕ [1].

Таблиця 1.2

Характеристики матеріалів, які використовуються в ємнісних сенсорах сили

Параметр	ВеСb ₂₅	Кремній	Al ₂ O ₃	Кварц
Коефіцієнт термічного розширення, (K ⁻¹)10 ⁻⁶	16,7	2,62	6,2	0,55
Модуль зсуву, ГПа	50	60	130	68
Прогин мембрани, при тиску 0,15 МПа, мкм	50	35	25	75
Модуль пружності, ГПа	127	185	320	72
Межа міцності на розтяг, ГПа	0,82	0,10	0,17	-
Метод герметизації	паяння твердим припоєм	паяння твердим припоєм	паяння скляним припоєм	паяння скляним припоєм

Контакти отримуються трафаретним друком і відпалом металевого провідного шару (в основному Au або Ag) на зовнішній стороні жорсткої конструкції і на мембрані; електроди також покриті склом для запобігання міграційним ефектам внаслідок різниці напружень або відносних вологостей. Збирання компонентів сенсора проводиться після трафаретного друку, пайки склом і відпалювання на краях структури. В основному вибирається скло з низькою температурою плавлення від 400 до 500 °С. У деяких випадках один і той самий скляний припій використовується для створення механічної структури датчика (відстані між електродами) і як підкладка для електродів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика отримання плівкових матеріалів

Плівки отримують методом термічного випарування відповідних металів та послідовного осадження шарів без орієнтуючого магнітного поля у високому вакуумі ($p = 10^{-4}$ Па). Для цього використовувалося спеціальне експериментальне обладнання, основним складовим елементом якого є вакуумна установка ВУП-5М. Робочий об'єм (рис. 2.1а) виготовлено із нержавіючої сталі, яка разом з гумовими ущільнювачами забезпечує необхідну для проведення експерименту вакуумну герметизацію. Необхідний температурний режим в інтервалі 300 - 750 К забезпечувався за допомогою нагрівача, схематично зображеного на рис. 2.1б.

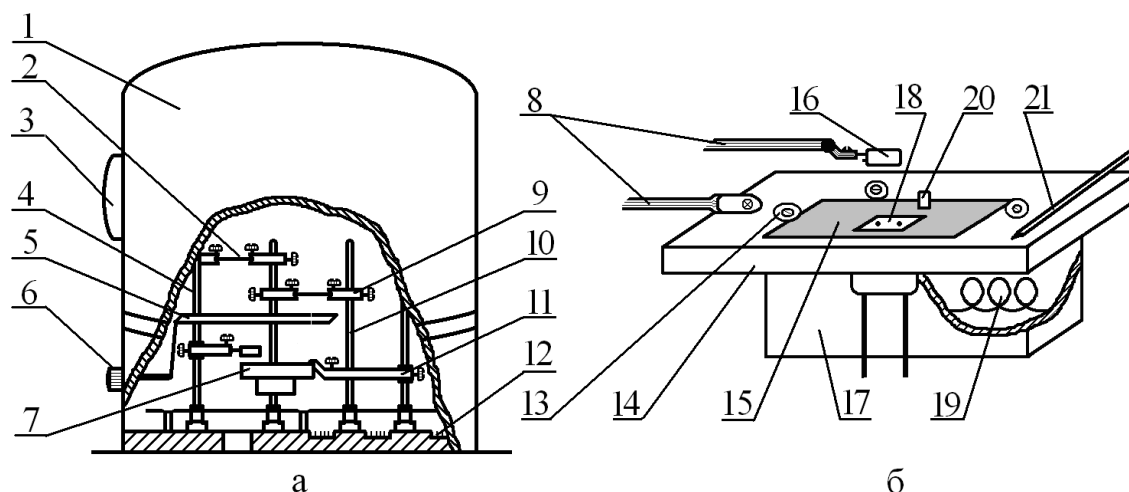


Рис.2.1. Схема робочого об'єму ВУП-5М (а) та пристрій для термовідпалювання зразків у вакуумі (б): 1 – корпус робочої камери; 2 – терморезистивні випаровувачі; 3 – спостережувальне віконце; 4, 10 – стійки; 5 – заслінка; 6 – обертова ручка заслінки; 7 – столик для відпалювання зразків; 8, 9, 11 – тримачі; 12 – роз'єм; 13 – підкладкотримач; 14 – мідний столик; 15 – маска; 16 – п'єзорезонатор для контролю товщини плівки; 17 – піч для відпалювання; 18 – підкладка з молібденовими електродами; 19 – вольфрамова спіраль; 20 – пластини NaCl; 21 – термопара

Товщини плівок з точністю визначення 10 % *in situ* контролювалися методом кварцового резонатора (КР). Для технічного забезпечення останнього використовувалися промисловий кварцевий резонатор типу РГ-08 з частотою 10 МГц, частотомір ЧЗ-34 та генератор електричних коливань на транзисторі КТ315Б. В інтервалі температур 250-330 К метод КР дає достовірні результати, у випадку коли маса плівки не перевищує 1% від маси коливальної пластини резонатора. Товщина плівок визначалась за співвідношенням:

$$d = \frac{N_g \cdot \rho_g}{\rho_f \cdot f_g^2} \cdot (f_g - f), \quad (2.1)$$

де ρ_g, ρ_f - відповідно густина кварцу і матеріалу плівки;

f_g, f - частоти кварцової пластини до та після наплення;

$N_g = 1,668 \cdot 10^3$ Гц·м – частотна постійна

Улаштування для отримання та дослідження плівок розміщувались в корпусі робочої камери. За допомогою мультиметрів UT70D та UT70B контролювалися із точністю $\pm 0,05\%$ електропір плівок та температура (точність ± 1 К) підкладки, відповідно. Як термопару використовували сплав хромель – алюмель. Автоматично за допомогою інтерфейсу RS232 експериментальні дані з мультиметрів передавалися на персональний комп'ютер.

2.2. Методика дослідження тензорезистивних властивостей плівок

Відомо [21], тонкі плівки мають унікальні електричні, оптичні, механічні та ін. властивості, які знаходять саме широке застосування для різних датчиків. Незважаючи на тривалий час досліджень, тензорезистивні властивості плівок залишаються актуальними. Вони вже ретельно вивчені в області пружних деформацій (до 1%) тонких проводів, плівкових сплавів, гетерогенних структур,

одношарових і багатошарових плівок. Особлива поведінка плівок, яка існує в деформаційно-стійких та інших структурах в області непружних деформацій залишається актуальною і донині. Вирішення цього питання пов'язане з дослідженням розмірних ефектів у електрофізичних властивостях плівок, процесів дифузії і фазоутворення. Крім того, що в даний час наявні тенденції пошуку матеріалів з високою тензочутливістю [21], термостійкістю, широким діапазоном пружних деформацій, тощо.

При дослідженні тензочутливості тонких плівок треба постійно мати на увазі, що опір плівок має невеликі значення (порядку 10 Ом). Тому особливо велика увага звертається на технологію підготовки підкладок для досліджень з низькоомними контактами (рис.2.2). Вони мають у мінімальній мірі впливати на тензочутливість досліджуваних плівок. Відповідно до цього нами розглядалась спеціально розроблена методика, яка детально описана у роботі [21], підготовки підкладок зі струмопровідними контактами.

Особливість даної методики у порівнянні з методиками, де замість фторопластових, склотекстолітових чи підкладок з фольги Ni як підкладки з контактними використовувалися стрічки полістиролу, який, наприклад, застосовується для друку на лазерному принтері, товщиною 0,4 мм [22-24]. Перевага підкладки з полістиролу (рис.2.2) полягає у тому, що вони мають гладку поверхню і хороші досить гарні пружні характеристики в інтервалі деформацій до 2%. До її недоліків можна віднести низьку термостійкість до 500 К.

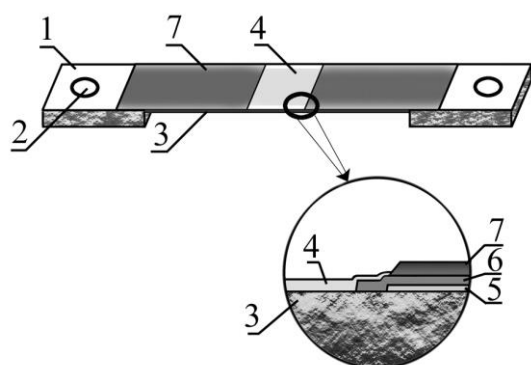


Рис.2.2. Підкладка для дослідження тензочутливості плівок [22]: 1 – кріплення Al; 2 – отвори кріплення на деформаційний пристрій; 3 – підкладка з полістиролу; 4 – плівка; 5, 6 – підшар Cu і Cr; 7 – шар електролітичного Cu

Як приклад розглянемо послідовність виготовлення досліджуваних зразків (рис.2.2) для деформацій типу розтяг/стиснення. Шляхом вакуумної конденсації через спеціальні маски на поверхні полістиролових підкладок формувалися плівкові контакти Cu/Cr/P (P-підкладка). Перший шар плівку Cr товщиною до 20 нм осаджували на нагріту підкладку, що гарантувало добру адгезію. Далі конденсувався шар Cu товщиною 60 нм, на який, з метою створення надійного контакту, який мінімально впливав би на тензочутливість досліджуваних плівок, шляхом електролітичного осадження відбувалося наращування шару Cu товщиною до 2 мкм, при з формуванні східців різної товщини [23-26]. Слід відмітити, що спостережувана висока адгезія металевих плівок до полістиролу, внаслідок розігріву останніх, призводить до того, що вимірювання тензочутливості фактично здійснювалось на системі плівка/підкладка.

Тензочутливість плівок при деформаціях типу згин досліджувалися за допомогою стенду (рис. 2.4). Він виготовлений на основі крокового двигуна від DVD приводу, моторного драйвера та мікроконтролера Arduino Uno R3. Максимальна величина струму (через обмотки крокового двигуна даного типу) може досягати 500 мА. Пристрій дає можливість дослідження тензочутливості плівки за N кількістю циклів згин - розтгин. Зібраний стенд підключається за допомогою COM порта до середовища LabVIEW.

Управління експериментом і обробка результатів здійснювалася програмним забезпеченням, розробленим в середовищі LabVIEW 10 (рис. 2.4). Підключення плати Arduino здійснювалася при попередньому встановленні Web-додатка VI Package Manager 2010. Для роботи з Arduino через COM в середовищі LabVIEW додано бібліотеку NI LabVIEW Interface for Arduino Toolkit.

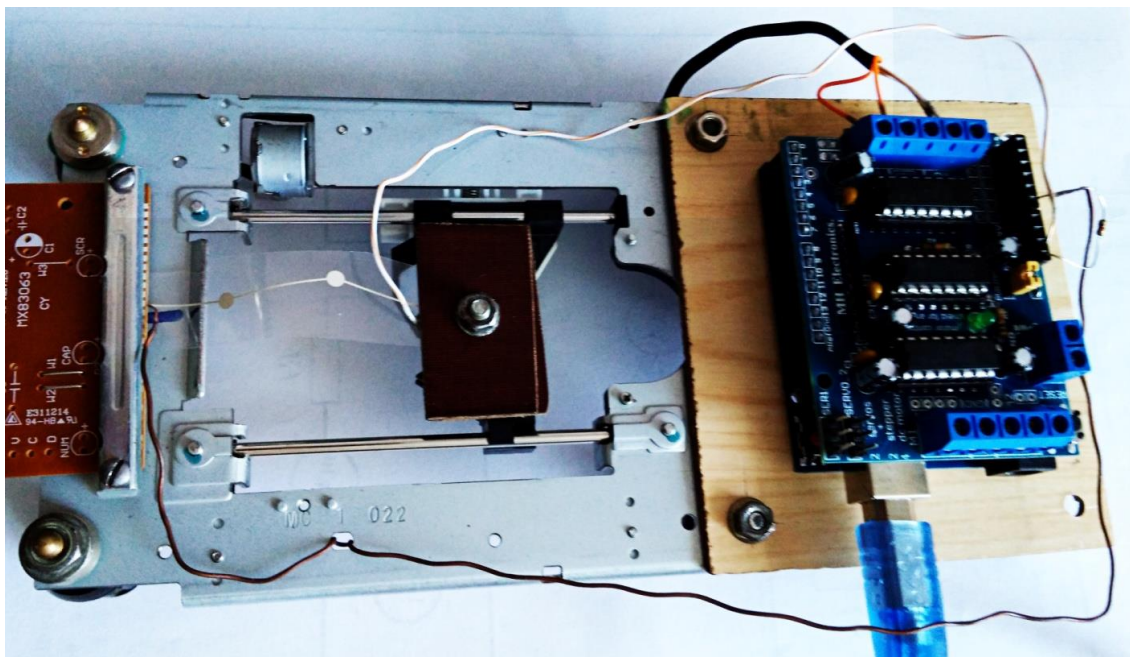


Рис. 2.3. Зовнішній вигляд стану для дослідження тензорезистивних властивостей плівок

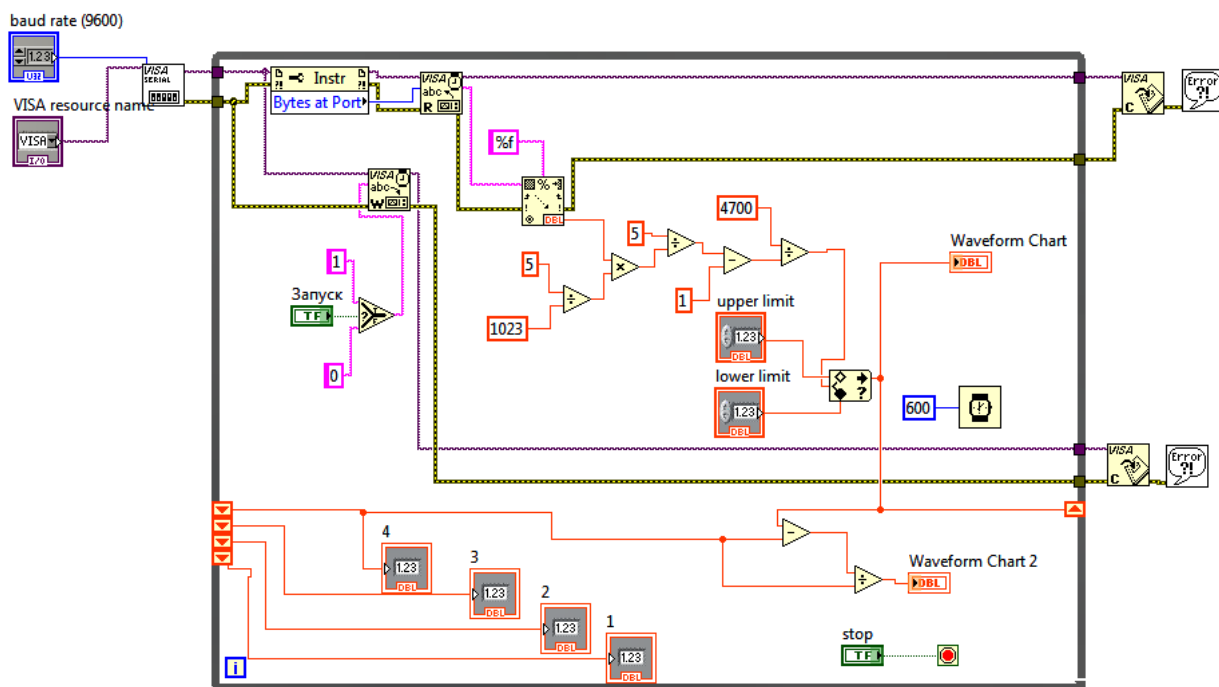


Рис. 2.4. Програма в LabVIEW для роботи з значеннями опору тензодатчика

Експериментальні дані передавались біт за бітом по єдиній лінії зв'язку (послідовна передача). Подібний формат передачі даних для приймального - передавального пристроїв повинен бути один і той самий. В протилежному випадку передача даних буде неможлива. Подібні формат передачі даних визначають біт парності і швидкість передачі, стартовий і стоповий біти. При запуску починається зчитування значення електроопору плівки в режимі реального часу. Пристрій робить вигин – згин плівки і через кожні 25 кроків надсилає дані у зчитувальній порт. На основі даних автоматично будується графік залежності електроопору плівки в режимі реального часу. Якщо один пристрій, намагається передати дані з більш високою швидкістю, ніж вони мають бути оброблені приймаючою детектсистемою, може стати втрата частини даних. Щоб запобігти такої передачі, використовують спеціальні методи управління потоком даних, управління зв'язком, тощо. При підключенні пристрою шини до мікроконтролера Arduino, останній автоматично передає до комп'ютера свої параметри. Це дозволяє своєчасно ідентифікувати пристрій, визначити функції для кожної кінцевої точки в LabVIEW.

2.3. Методика розробки структурних моделей в ANSYS

Програмне середовище ANSYS відноситься до програм які працюють області CAE-продуктів на базі методу скінченних елементів (CE), який поєднує в собі універсальність алгоритмів вирішення різних крайових задач з ефективністю комп'ютерної реалізації обчислень. ANSYS має багаторічний досвід у вирішенні різних прикладних задач чисельними методами[27-31]. За цей період, такі CAE-системи як FLUENT, AUTODYN, CFX, Workbench та інші, зручно інтегровані в ANSYS та і можуть використовуватися для вирішення відповідних завдань. Для геометричного моделювання в цю платформу вбудований модуль Design Modeler, реалізований на базі ядра Parasolid. Модуль симуляції Mechanical забезпечує розширення необхідних інструментів моделювання. За допомогою Workbench

практично весь комплекс ANSYS може бути об'єднаний з потужними CAD-системами, такими як Unigraphics, SolidWorks та ін.

Вибір форми і розміру скінченного елемента (СЕ) залежить від форми тіла і виду напружено-деформованого стану. Стрижневий СЕ застосовується для моделювання одноосного напруженого стану під напругою (стиснення), а також у задачах обертання або вигону. Плоскі СЕ у вигляді, наприклад, трикутної або чотирикутної пластини, викривляються для імітації плоского напруженого або плоского деформованого стану. Для аналізу об'ємного напруженого стану служить для об'ємного тривимірного СЕ у вигляді, наприклад, тетраедра, шестикутника або троля. СЕ у формі кільця застосовується у разі вісесиметричного напруженого стану. Відповідний плоский СЕ береться для розрахунку виньеткової таблички. Для розрахунку оболонки береться оболонковий СЕ або плоский елемент, який є ідентичним характер згинання. У тих ділянках тіла, де очікуються великі градієнти напруги, слід застосовувати менші СЕ або елементи більшого порядку [27].

СЕ присвоюють необхідні властивості, які задаються за допомогою відповідних констант і опцій. Наприклад, для стрижневої форми СЕ вказується площа поперечного перерізу, а модель моделюється тросом, який працює тільки на розтягнення, тому призначається відповідна опція. Для плоского негнучкого СЕ можна вказати товщину і тип напруженого стану: плоский напружений, плоский деформований або вісесиметричний. Плоскі елементи, для яких можна використовувати вигин, і оболонкові СЕ також повинні мати товщини. Всі елементи і з'єднувачі пронумеровані. Нумерація побудована загальна (глобальна) для всіх нових елементів і локальна для всіх існуючих елементів. Нумерація даних і загальна нумерація розширень повинна бути виконана таким чином, щоб продуктивність була розрахована як найнижча. Відомі алгоритми оптимізації цієї нумерації. З'являться масиви зв'язку між номерами СЕ і номерами вузлів, а також між локальними і глобальними номерами вузлів об'єкта.

Для обчислення за допомогою СЕ полів різних фізичних величин потрібно встановити деякі параметри. У проблемах деформації слід вказати пружні властивості - модуль пружності та коефіцієнт Пуассона. Якщо передбачається пластичність, необхідно вказати діаграму деформацій, яка апроксимуються білінійними або мультилінійними кривими. Коли корпус нагрівається нерівномірно, слід встановити вказані механічні властивості для ряду температур і, крім того, слід ввести коефіцієнт теплового розширення. Для динамічних задач необхідно ввести щільність матеріалу та, якщо необхідно, коефіцієнт в'язкості демпфування.

Розрахунки здійснюються в інтерактивному (Interactive) або пакетному (Batch) режимах [28]. Для останнього попередньо має бути написана програма користувача за допомогою вбудованої мови APDL (ANSYS Parametric Design Language) і відповідних команд ANSYS. Такий командний файл, що містить код програми, зчитується засобами ANSYS і далі виконується. Пакетний режим зручний при вирішенні складних завдань, алгоритм яких містить переходи, структури «якщо - то», цикли, тощо.

Загалом методика розв'язання крайової задачі здійснюється ANSYS програмно в три етапи. На першому передпроцесінгу створюється основа СЕ моделі досліджуваного об'єкта. Передпроцесінг включає в себе нижченаведені процедури вибору параметрів [27-30]:

1. Фізпроцесу (теплопередача, механіка деформованого твердого тіла, тощо) та проводяться відповідні налаштування.

2. Типів та деяких характеристик СЕ (в залежності від розмірності об'єкта та інших його властивостей).

3. Матеріалу об'єкта і вказуються всі його необхідні властивості, які можуть бути задані вручну або імпортовані з бібліотеки матеріалів; встановлені властивості визначають модель матеріалу (пружно-пластичний, лінійно-пружний, білінійний і т.д.).

4. Геометрична модель твердого тіла, для цього використовується програмний модуль PREP7; у Workbench відповідно використовується модуль Design Modeler; модель також може бути експортована з ряду САD-пакетів.

5. Геометрична модель розбивається на СЕ, при розбивці повинні бути задані параметри сітки.

6. Модель контакту і її характеристики, Контактні пари (у разі контактної задачі).

Накладення на модель фізичних умов і розв'язання (другий етап) – складається з наступних трьох пунктів вибору:

1. Граничних умов - переміщення (зв'язки), сили, тощо.
2. Типу аналізу (динамічний, статичний, модальний); також можливий вибір методів розв'язання системи рівнянь і встановлення параметрів процедур розрахунку (число ітерацій, кроків, тощо)

3. Розв'язання системи рівнянь; у результаті рішення формується файл, який містить вектор знайдених ступенів свободи (вузлових температур, вузлових переміщень, тощо).

Постпроцесінг (третій етап) полягає у аналізі результатів; розраховані фізичні величини (деформації, напруження, температури, тощо) представляються в графічному вікні ANSYS у вигляді таблиць або графіків, картинок або анімацій; усі результати записуються у відповідно сформатовані файли.

При виконанні всіх етапів розв'язання задачі програмним пакетом ANSYS створюється в пам'яті ПК база даних (.data), яка містить необхідну інформацію про модель. Таку базу даних зберігають в бінарний файл та пізніше використовують для продовження або розширення відповідного аналізу.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Конструктивно-технологічні особливості плівкових датчиків

Сила або тиск викликають деформацію (розтягування, стискування, зсув) сприймаючого елемента, тому базовим чутливим елементом для датчика (Д) може служити видозмінений елемент сенсор деформації (СД). Так, в більшості випадків і поступають: вмонтовуючи ЧЕ (ЧЕ) СД на сприймаючий елемент (СЕ) відповідного сенсора, включають його у вимірювальну схему і навантажують, маючи на виході сигнал еквівалентний вхідній дії.

Структурна схема ДС приведена на рис. 3.1, де прийняті наступні позначення: ε -ЧЕ – деформаційний ЧЕ; ЕС – електрична схема; СЭ – сприймаючий елемент; СЧЕ – силоЧЕ.

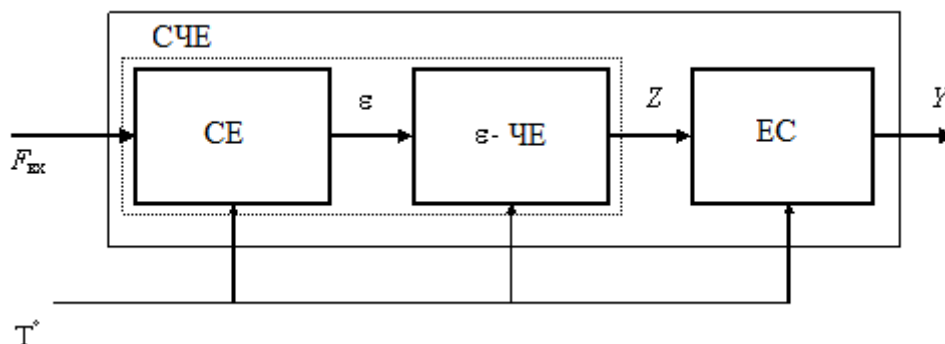


Рис. 3.1. Структурна схема датчика сили [2]

Формула перетворення для датчика сили:

$$F_x \rightarrow \varepsilon \rightarrow Z \rightarrow Y. \quad (3.1)$$

Як проміжна величина Z можуть бути прийняті наступні: зміна опору ΔR для тензорезистивних ЧЕ; зміна напруги ΔU для потенціометричних ЧЕ; зміна заряду ΔQ для п'єзоелектричних ЧЕ; зміна частоти Δf для акустоелектричних

ЧЕ; зміна магнітних характеристик (B , L , M , H) для індуктивних і магнітоелектричних ЧЕ; зміна оптичних характеристик для оптичних ЧЕ.

Як первинні перетворювачі можуть використовуватись стержневі пружні елементи, пружні кільця, балкові пружні елементи. Для більшості перетворювачів неелектричних величин функція перетворення суттєво нелінійна. Тому при їх використанні з електричними вимірювальними приладами, які мають лінійну статичну характеристику, виникає необхідність лінеаризації функції перетворення сенсора. Для компенсації впливу дестабілізуючих факторів ефективно використання диференціальних схем. У подібних перетворювачах використовуються два ЧЕ, в одному з них під дією вимірюваної величини вихідна величина зменшується, а в іншому збільшується. Вихідний сигнал відповідно формується як різниця вихідних сигналів ЧЕ. При цьому за рахунок зовнішніх факторів зміни вихідних сигналів взаємнокомпенсуються.

В залежності від первинного вимірювального перетворювача та вигляду його вихідного сигналу використовуються ті чи інші електровимірювальні прилади. Як правило апаратна частина вторинних приладів для вимірювання неелектричних параметрів не відрізняється від приладів для вимірювання електричних сигналів. Однак суттєвою відрізняється лише алгоритм роботи приладу, який зокрема визначається алгоритмом виконання процедури вимірювання фізичних величин.

Як приклад розглянемо конструкцію металоплівкового тензодатчика [11-13] мембранного типу, схематичне зображення якого представлено на рис. 3.2. ЧЕ датчика виступає фторопластова мембрана (1) товщиною до 0,5 мм. На поверхню мембрани методом вакуумного випарування наноситься тонкоплівковий ЧЕ (2) у вигляді тонкої плівки та мідні контакти (3), як розглядалось вище з попередньо нанесеним для кращої адгезії підшаром Cr (4), до яких приєднуються мікропайкою контактні дроти або притискні контакти Ag.

Конструкційні параметри цього датчика (розміри корпусу датчика відповідають розмірам посадкового гнізда для вакуумметра типу ПМТ) як

приклад дозволяють застосовувати його для вимірювання форвакууму 20-40 Па. використовуються Для кращої фіксації притискних контактів на поверхні контактних площадок застосовуються гумові ущільнювачі (5).

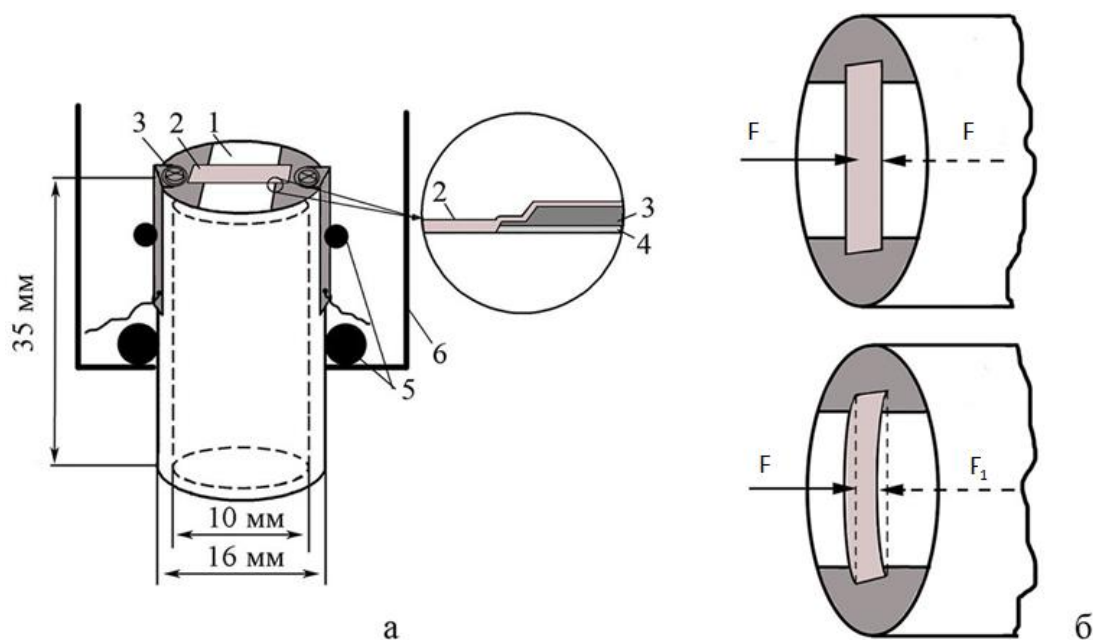


Рис.3.2. Типова конструкція плівкового тензометра сили (а) та ілюстрація принципу його роботи (б) [12]: 1 – мембрана з фторопласту; 2– ЧЕ; 3 – мідні контакти; 4 – плівка Cr; 5 – гумові ущільнювачі; 6 – корпус

ЧЕ тензодатчика слугує тонка тефлонова або полістиролова мембрана (0,5 – 1 мм), на поверхню якої вакуумною конденсацією було нанесено тензорезистор як приклад у вигляді плівкової системи Cu/Cr та ін. (шар Cr використовується в основному для покращання адгезії шару Cu контактних площадок). Двошаровий резистор Cu/Ni більш чутливий до деформації, ніж одношаровий із Cu. Матеріал мембрани вибирається із тих міркувань, що і тефлон, і фторопласт мають хороші вакуумні властивості та низьку залишкову деформацію [22-23]. Електроконтакти приєднуються до майданчиків за допомогою мікропаяння.

3.2. Робочі характеристики плівкових тензодатчиків

Отже, виходячи із залежності відносної зміни електроопору $\Delta R/\Delta \varepsilon_l$ від поздовжньої деформації ε_l , розраховують основні характеристики для тензоефекту в плівках: залежності для миттєвого коефіцієнту тензочутливості (γ_{lm}) та середнього КТ (γ_l) від ε_l , які відповідно визначаються за формулами:

$$\gamma_{lm} = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{\Delta R_i}{\Delta \varepsilon_l} \quad \text{та} \quad \gamma_l = \frac{1}{R_{II}} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta \varepsilon_l}, \quad (3.2)$$

де R_i – початковий опір на i -му кроці деформації, R_{II} – початковий опір (при $\varepsilon_l = 0$).

На рис. 3.3 наведено типовий приклад деформаційних залежностей для системи Cu(20)/Cr(15)/П для величин поздовжньої деформації $\Delta \varepsilon_l$ до 0,01 (рис.3.3а) та до 0,02 (рис.3.3б) (на відповідних вставках рис.3.3а,б наведено відповідні графіки залежності електроопору R та значення миттєвого γ_{lm} і середнього $\bar{\gamma}_l$ [23]. При зміні значення деформації від 0,01 до 0,02 (рис. 3.3 б) спостерігається значне підвищення величини електроопору, відповідно, величини $\bar{\gamma}_l$. Це згідно авторів [23] можна пояснити включенням більш високоенергетичних процесів у плівці або переходом від квазіпружної до пластичної деформації, або навіть можливим мікророзтріскуванням підшару Cr.

В роботі також розглянуто числове моделювання механічних властивостей ЧЕ мембрани на базі програмного комплексу ANSYS (система аналізу Static Structural), який дозволяє розрахувати параметри датчика і мембрани. Робота проводилась у середовищі ANSYS Workbench, моделі датчиків створювались у Design Modeler, як і у попередньому випадку при розрахунках потоку інгібітору. Далі модель імпортувалась у Mechanical, де створювалась сітка об'єкта і проводилась її оптимізація. На наступному кроці задавалися необхідні матеріали і їх параметри, сили, які діють на тіло та опори. Після налаштувань та розрахунку система дозволяє отримати розподіл деформації мембрани і датчика.

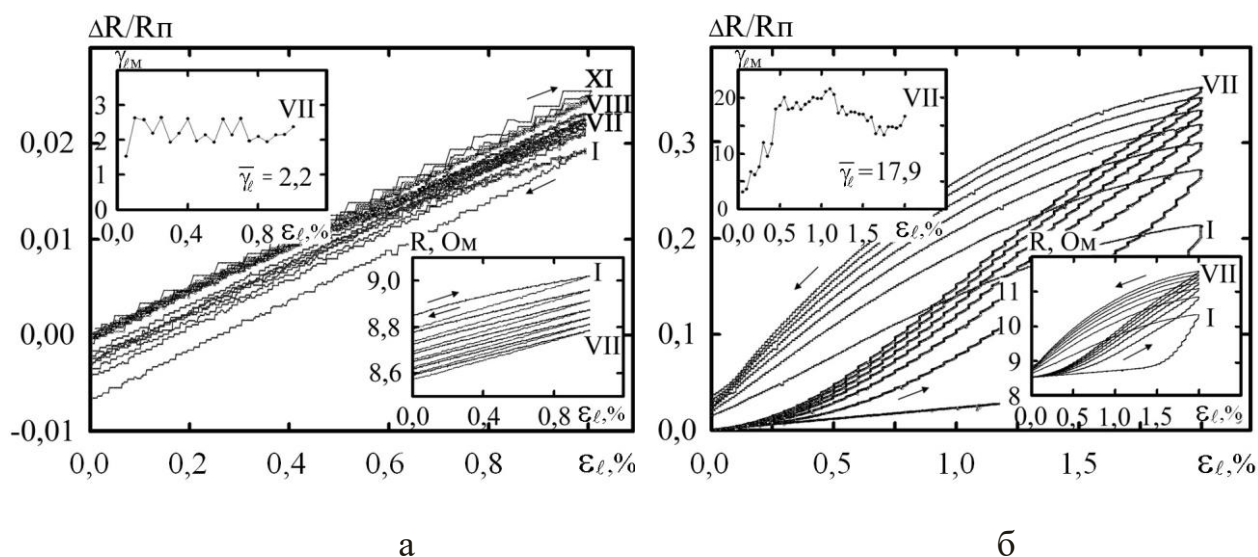


Рис. 3.3. Залежність $\Delta R/R_{\pi}$, R і $\gamma_{\ell M}$ від ε_{ℓ} для плівки у інтервалі деформацій $\Delta\varepsilon_{\ell 1} = 0-1\%$ (а) та $\Delta\varepsilon_{\ell 2} = 1-2\%$ (б) [23]. I-XI – номери деформаційних циклів

Враховуючи те, що даний розрахунок є порівняно простим і не вимагає багато часу для обчислення, є можливість змінювати ключові параметри в широких межах, і спостерігати за отриманим результатом. До ключових параметрів можна віднести: товщину мембрани, матеріал, з якого вона виготовлена, геометрію датчика, його положення та тиск, що діє на мембрану. Кожен варіант представляє собою окремий відповідно налаштований блок, яким можна оперувати у середовищі платформи ANSYS Workbench. Блок в свою чергу містить ряд структурних частин – елементів, кожен з яких відповідає за певну частину аналізу. Серед них: бібліотека матеріалів, створення моделі, генерація елементної сітки, конфігурація параметрів задачі, розв'язання і представлення результатів в графічному вигляді.

Було розроблено структурну модель тензодатчика мембранного типу з плівковими ЧЕ. Остання забезпечує більш рівномірний розподіл деформації та як наслідок лінійність вихідного сигналу. Отже, геометрія ЧЕ може бути визначена на за даним деформаційного розподілу мембрани, який визначався за допомогою розглянутої вище методики числового моделювання. На рис. 3.4 зображена структурна модель і деформаційний розподіл плівкового тензодатчика.

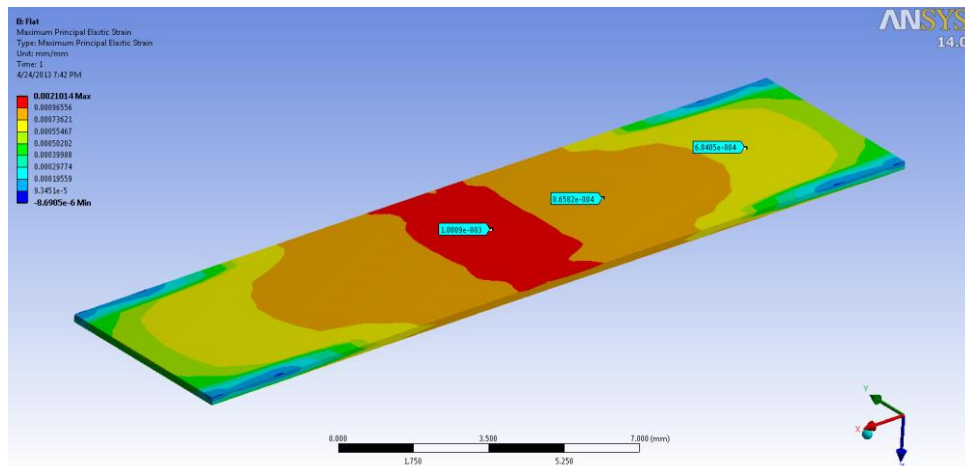


Рис. 3.4. Типовий приклад структурної моделі ЧЕ тензодатчика та його деформаційний розподіл при згинанні

Виходячи з даних числового моделювання можна вибрати геометричні параметри мембрани (товщину, розміри) та ін. Змінювати отсанні можна в додатку Design Modeler, але після цього необхідно провести повторну перебудову сітки, імпортувати і запустити розв'язок задачі, відштовхуючись від нових даних. Оскільки за допомогою ANSYS Workbench цей процес автоматизується, така операція зводиться до внесення потрібних змін у структурну модель та запуску відповідного процесу повторного розв'язання.

ВИСНОВКИ

1. Огляд сучасних літературних даних про особливості методик вимірювання та конструктивно-технологічні параметри плівкових датчиків сили та тиску дозволив встановити наступне:

- для виготовлення плівкових датчиків сил та тисків головним чином застосовують ємнісні та тензорезистивні ЧЕ;

- тензодатчики функціонують при значних механічних навантаженнях, мають високу чутливість, термостійкість, лінійність вихідних сигналів та стабільність у часі;

- компенсація температурної нестабільності вихідного сигналу досягається застосуванням розв'язок мостовими схемами включення, коли в одному з плечей знаходиться вимірювальний елемент, а в іншому подібний компенсуючий, або при використанні як компенсатора операційного підсилювача;

- мікромеханічні тензодатчики узгоджуються за технологією виготовлення із інтегральними мікросхемами і можуть бути вироблені в одному пристрої

2. На сьогодні розроблені та апробовані такі методи отримання та дослідження плівкових датчиків :

- вакуумна пошарова конденсація плівок зразків на полістиролові або тефлонові підкладки зі спеціально сформованими контактами;

- Arduino-сумісні автоматизовані системи дослідження тензорезистивних властивостей плівкових чутливих елементів, які дозволяють проводити велику кількість деформаційних циклів у статичному і динамічному режимі роботи та вивчати ресурс їх роботи;

- за допомогою програмних середовищ типу ANSYS вдало реалізується моделювання структур тензометричних датчиків та подальше дослідження їх механічних, електрофізичних та інших властивостей

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Казарян А.А. Емкостные датчики давления, работающие в условиях деформации изделий / А.А. Казарян // Измерительная техника. – 2000.– № 1.– С. 27-30.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково-навчальне видання в 3-х томах // В. Вуйцік, З.Ю. Готра, В.В. Григор'єв та ін.; за редакцією З.Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2003.– Т.2.– 595 с.
3. Метрологія та вимірювальна техніка/ Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук та ін.; за ред. проф. Є.С. Поліщука.– Львів: Бескид Біт, 2003.– 538 с.
4. Проценко І.Ю. Технологія одержання і застосування плівкових матеріалів / І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008.– 198 с.
5. Зубцов В.И., Васюков А.В. Датчики давления с использованием тензо- и пьезоэффектов / В.И. Зубцов, А.В. Васюков // Приборы и системы управления.– 1999.– № 12.– С. 31-33.
6. Гендель Ю.Г. Быстродействующий датчик давления газа / Ю.Г. Гендель // Радиотехника и электроника.– 2006.– № 2.– С. 154-156.
7. Вечтомов С.М. Полупроводниковые датчики абсолютного и дифференциального давления и приборы на их основе / С.М. Вечтомов // Контрольно-измерительные приборы и системы.– 2000.– № 1.– С. 15-16.
8. Смирнова О.В. Интегральные датчики давления / О.В.Смирнова, Ю. М. Троицкий // Компоненты и технологии.– 2006.– № 7.– С. 34-39.
9. Васильев В.А. Методы уменьшения температурной погрешности датчиков давления / В.А. Васильев // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре.– 2002.– № 4-5.– С.50-54.
10. Казарян А.А. Тонкопленочный пьезоэлектрический датчик давления / А.А. Казарян // Измерительная техника.– 2002.– № 5.– С. 40-42.
11. Пат. 98073761 Україна, G01B7/16. ЧЕ тензодатчика / Одноворець Л.В., Проценко С.І., Черноус А.М. – 30031144А; Заявл. 14.07.1998; Опубл. 15.12.2000, Бюл. №7-11. – С. 1.190.

12. Пазуха І.М. Чутливі елементи датчика тиску на основі плівок Cr і Cu або Fe / І.М. Пазуха, І.Ю. Проценко // Вісник СумДУ. Серія: фізика, математика, механіка. – 2008. – №2. – С. 82-87.

13. Пазуха І.М. Фізичні процеси в чутливих елементах датчиків температури, деформації і тиску: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. ф.-м. наук: спец. 01.04.01 “Фізика приладів, елементів і систем” / Ірина Михайлівна Пазуха. – Суми, 2009. – 25 с.

14. Датчики Украина / Датчики силы : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: http://sensors.com.ua/ndex.php?mod=pages&page=force_transducers

15. Микроприбор / Датчики силы : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.micropribor.com.ua/datchiki-sili>

16. HBM / Датчики силы : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.hbm.ru/index1.php?id=3&subid=9>

17. ZEMIC / Тензометрические датчики, датчики силы : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://zemic.com.ua/>

18. EMSYST / Tenzometrs: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: https://www.emsyst.sk/sk/index_sk.php

19. Датчики силы СИКА : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.eximpribor.com.ua/directory/datchiki-sili-sika.html>

20. Тензометрические датчики CAS : [Електрон. ресурс]. - Режим доступу: <http://www.cascorp.info/katalog.php?subsection=153>

21. Тензочутливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд) / Великодний Д.В. Гричановська Т.М., Однодворець Л.В., Проценко І.Ю., Проценко С.І. // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. - № 1. – С. 5 – 51.

22. Великодний Д. В. Автоматизация процесса исследования тензорезистивных свойств тонкопленочных материалов / Д. В. Великодний, С. И. Проценко // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: II-я международная научная конференция, 2-5 окт. 2007 г. : мат. конф. –

Харьков-Туапсе: ХНУРЕ, 2007. – С. 164-165. Великодний Д. В. Тензорезистивные свойства двухслойных пленок Cu/Cr в области пластической деформации / Д. В. Великодний, А. И. Кучма, С. И. Проценко // Тонкие пленки в оптике, нанофотонике и наноэлектронике : XIX-й международного симпозиум : Мат. симпоз. – Харьков: ХФТИ, 2007. – С. 124–126.

23. Protsenko S. I. Electrophysical properties of Cu/Cr and Fe/Cr film systems within elastic and plastic deformation range / S. I. Protsenko, D. V. Velykodnyi, V. A. Kheraj, M. S. Desai, C. J. Panchal, I. Yu. Protsenko // J. Mater. Sci. – 2009. – V. 44, № 18. – P. 4905-4910.

24. Тищенко К. В. Електрофізичні властивості нанокристалічних плівок платини / К. В. Тищенко, І. М. Пазуха, Т. М. Шабельник та ін. // Журнал нано- та електронної фізики, 2013. – Том 5, № 1. – с. 01029-1 – 01029-5.

25. Strain deformation properties of heterogeneous film materials based on refractory metals/ I.P. Buryk, L.V. Odnodvoretz // J. Nano- Electron. Phys. – 2009. – V.1 No 3. – P.24-29.

26. Structure and electrophysical properties of double-component film alloys based on molybdenum and iron or nickel / I.P. Buryk, T.M. Hrychanovs'ka, D.V. Poduremne et al.]// J. Nano- Electron. Phys. – 2018. – V. 10, No 5. – P. 05026-05026-4.

27. Бате К. Д. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.

28. ANSYS / Офіційний сайт: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу:<https://www.ansys.com>

29. Бруяка В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : Учеб. пособ. / [В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.

30. Зенкевич О. С. Метод конечных элементов в технике / О. С. Зенкевич: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541с.

31. Вержбицкий В. М. Основы численных методов : учебник / В. М. Вержбицкий – М.: Высш. шк., 2005. – 840 с.

ДОДАТОК А