

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Осадчука Ярослава Олександровича на тему: «Радіовимірвальні прилади на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірвальні прилади

1. Актуальність теми дисертації

Тиск відноситься до одного з основних параметрів, який необхідно вимірювати при дослідженнях навколишнього середовища, в автомобільній, авіаційній та космічній техніці, хімічній та нафтогазовій промисловості тощо.

На теперішній час, більшість існуючих сенсорів, в тому числі і сенсорів тиску, є аналоговими, де вихідною величиною є струм або напруга. Це відноситься до широко розповсюджених тензорезистивних, п'єзоелектричних сенсорів та сенсорів на поверхнево-акустичних хвилях, що обумовлює ряд недоліків у їх роботі, зокрема: низьку чутливість і точність, недостатній рівень вихідного сигналу, суттєві паразитні міжканальні завади та низькі масогабаритні показники.

Перспективним науковим напрямком, що дозволяє усунути недоліки аналогових сенсорів тиску є створення радіовимірвальних частотних мікроелектронних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення «тиск-частота» на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором. Тому, розв'язок теоретичних питань щодо створення радіовимірвальних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску з тензочутливими напівпровідниковими елементами, розробка і експериментальне дослідження їх метрологічних характеристик та подальше впровадження даних пристроїв є безперечно актуальним.

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи забезпечено коректним використанням фізичних і математичних методів дослідження, що підтверджено результатами експериментів, використанням стандартних методів статистичної обробки результатів вимірювань, а також представленням з подальшим обговоренням результатів роботи на тематичних міжнародних та вітчизняних конференціях.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає в отриманні наступних результатів:
– вперше запропоновано метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в радіовимірвальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах, де тензочутливі елементи виступають в ролі активних елементів частотних радіовимірвальних пристроїв моніторингу, відмінність якого полягає в використанні залежності повного опору тензочутливих елементів від тиску та перетворення "тиск-частота", що надало принципову можливість по підвищенню

точності і чутливості вимірювань;

– вперше розроблені математичні моделі тензореактивного ефекту в тензочутливих напівпровідникових елементах, відмінністю яких є урахування залежності еквівалентних параметрів діодів, біполярних та польових транзисторів від тиску, що лягло в основу розрахунку їх тензочутливості;

– набули подальшого розвитку математичні моделі радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, в яких на відміну від існуючих врахований вплив тиску на параметри нелінійних еквівалентних елементів транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що надало можливість отримати відповідні функції перетворення і рівняння чутливості;

– теоретично встановлені і експериментально підтверджені залежності вихідної частоти радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів від тиску, які відрізняються використанням перетворення "тиск-частота", що дозволило підвищити метрологічні показники радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та моніторингу фізичної підготовки спортсменів.

4. Цінність дисертаційної роботи для науки

Отримані наукові результати вносять суттєвий вклад в розвиток теорії параметричних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило на основі тензореактивного ефекту в тензочутливих напівпровідникових елементах створити новий клас мікроелектронних перетворювачів "тиск-частота". Це забезпечує підвищення метрологічних характеристик радіовимірювальних пристроїв визначення тиску та приведених до тиску фізичних величин (сил, переміщень, вібрацій тощо) та значно розширює функціональні можливості мікроелектронних перетворювачів "тиск-частота", зокрема в задачах оцінки фізичної підготовки та м'язової пам'яті спортсменів.

5. Практичне значення отриманих результатів

Отримані практичні результати дозволили створити та практично реалізувати новий клас мікроелектронних перетворювачів "тиск-частота" з підвищеними метрологічними характеристиками:

– розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі "тиску-частота" на основі біполярно-польових транзисторних структур з пасивними і активними індуктивними елементами, чутливість яких складає (0,35 ... 2,65) кГц/кПа в діапазоні тисків від 10 кПа до 200 кПа;

– розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі "тиску-частота" на основі польових транзисторних структур з пасивною і активною індуктивністю, чутливість яких складає (1,6 ... 2,85) кГц/кПа в діапазоні тисків від 60 кПа до 120 кПа;

– отримано аналітичні вирази для функцій перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило встановити граничні значення сумарної

похибки вимірювання тиску, яка не перевищує (0,3...0,4) %, при крутизні перетворення (0,35 ... 2,85) кГц/кПа.

– розроблено алгоритмічно-програмне забезпечення для моделювання та інженерних розрахунків параметричних мікроелектронних перетворювачів "тиск-частота" на основі тензореактивного ефекту в тензочутливих напівпровідникових елементах;

– на основі запропонованих перетворювачів "тиск-частота" розроблені та практично реалізовані радіовимірювальні багатоканальні прилади моніторингу фізичної підготовки та м'язової пам'яті спортсменів стрільців з лука з підвищеною точністю визначення розподілу навантаження, яка лежить в межах $\pm 0,025\%$.

6. Оцінка змісту та завершеності дисертації

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів досліджень та публікації, структуру і обсяг роботи.

У першому розділі приведено порівняльний аналіз фізико-технічних основ побудови та порівняння метрологічних параметрів сенсорів тиску. Показано, що існуючі прилади вимірювання тиску на теперішній день є аналоговими, які мають низький рівень вихідних сигналів, низьку точність і чутливість, паразитні впливи каналів вимірювання один на інший, що вимагає додаткових операцій по підсиленню та аналого-цифровій обробці інформаційних сигналів.

Автором показано, що оптимальним для практичної реалізації є частотний метод вимірювання тиску на основі залежності реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором від дії тиску. Прилади, побудовані за цим методом, дозволяють усунути недоліки існуючих сенсорів тиску, тобто значно підвищити точність і чутливість, відмовитись від використання підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці сигналів, що надає можливість передачі сигналів на відстань, а також повної інтелектуалізації радіовимірювальних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску. Аналіз сучасного стану перетворювачів тиску дозволив автору сформулювати метод і задачі досліджень.

У другому розділі дисертації запропоновано метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в тензочутливих елементах і представлено дослідження характеристик радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску з тензочутливими діодами, резистивним та ємнісними елементами.

Теоретично обґрунтовано метод вимірювання тиску з використанням математичної моделі тензореактивного ефекту в напівпровідниковому тензочутливому діоді, яка описує залежність його повного опору під дією тиску. Зміна дійсної і уявної складових повного опору під дією тиску визначає

залежність вихідної частоти автогенераторних радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів "тиску-частота".

На основі розв'язку рівняння перенесення носіїв заряду в базовій області діода, отримано еквівалентну схему діода з урахуванням ефекту тензочутливості, що дало можливість розрахувати його повний опір. Як показали розрахунки, зміна складових повного опору діодів під дією тиску є суттєвою, що є основою їх використання в якості тензочутливих елементів автогенераторних радіовимірювальних параметричних перетворювачів. Показано, що вихідна частота автогенераторних перетворювачів однозначно пов'язана із зміною вихідного повного опору від тиску тензочутливих елементів.

Розроблено математичну модель і досліджено характеристики радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску на основі тунельно-резонансного діода. З математичної моделі, яка описує коливальний процес в автогенераторі перетворювача, отримано аналітичні залежності амплітуди коливань від часу, умови виникнення синусоїдальних коливань в автогенераторі, функцію перетворення і рівняння чутливості. Експериментальні дослідження показали, що чутливість має максимальне значення і змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.

Створено і досліджено частотний параметричний мікроелектронний перетворювач тиску з тензочутливим резистором, геометрія якою відповідає будові пальців спортсменів стрільців з лука. Визначено функцію перетворення і рівняння чутливості автогенераторного перетворювача тиску. Показано, що найбільша чутливість приладу лежить в діапазоні від 15 кг/см² до 25 кг/см² і складає 58 Гц/кг/см² – 78 Гц/кг/см².

З метою визначення оптимальної конструкції приладів тиску для стрільців з лука досліджено характеристики частотних параметричних перетворювачів тиску на основі мостових мікромеханічних тензорезистивних елементів і тензочутливих конденсаторів, чутливість яких складає (0,985 ... 2,65) кГц/кПа в діапазоні від 50 кПа до 150 кПа.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено побудові математичних моделей тензореактивного ефекту в тензочутливих біполярних і польових транзисторах, а також дослідженню характеристик радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів "тиску-частота" з тензочутливими біполярними і польовими транзисторами.

Автором розроблено і досліджено математичні моделі тензореактивних ефектів в біполярному і польовому транзисторах. На основі малосигнальної еквівалентної схеми було визначено залежність повного опору під дією тиску на електродах емітер-колектор біполярного транзистора, тобто його тензореактивний ефект. Як показали теоретичні і експериментальні дослідження дійсної і уявної складових повного вихідного опору від тиску для біполярного транзистора, дійсна складова змінюється на 10 Ом/10⁵ Па, а уявна складова на 20 Ом/10⁵ Па, що є суттєвим для використання біполярних транзисторів як тензочутливих елементів в радіовимірювальних частотних параметричних перетворювачах тиску.

Математична модель тензореактивного ефекту в польовому транзисторі з індукованим каналом створена на основі його еквівалентної схеми. Вона описує

залежність повного опору на електродах витік-стік польового транзистора від тиску як в лінійному режимі роботи, так і в режимі насичення. Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що зміна дійсної складової дорівнює $10 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а уявної $20 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ в діапазоні тисків від $0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $2,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що доводить принципову можливість використання польових транзисторів як тензочутливих елементів в частотних приладах тиску.

Запропоновано і досліджено схему автогенераторного параметричного перетворювача тиску, яка складається з тензочутливого двоколекторного біполярного транзистора і польового двозатворного транзистора, причому біполярний тензочутливий транзистор виступає одночасно і в якості підсилювального елемента автогенератора. Це дозволило значно спростити схему приладу і підвищити його чутливість.

Визначено функцію перетворення і рівняння чутливості частотного перетворювача тиску, при цьому чутливість змінюється від $1,12 \text{ кГц}/\text{кПа}$ до $0,65 \text{ кГц}/\text{кПа}$ в діапазоні тисків від 60 кПа до 140 кПа . Досліджено характеристики радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску на основі двостокового МДН-тензотранзистора і двозатворного польового транзистора. Чутливість перетворювача для частоти 300 кГц при напрузі живлення 5 В складає $2,1 \text{ кГц}/\text{кПа}$.

Для реалізації радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску, виготовлено повністю за інтегральною технологією, було запропоновано і досліджено схему, що складається з чотирьох біполярних транзисторів з однаковими типами провідності, два із яких є тензочутливими елементами. Чутливість радіовимірювального автогенераторного перетворювача складає від $1,42 \text{ кГц}/10^5 \text{ Па}$ до $16 \text{ кГц}/10^5 \text{ Па}$ при зміні тиску від 50 Па до $12 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

В четвертому розділі дисертації подано результати розробки та реалізації радіовимірювальних приладів психофізіологічного стану спортсменів – стрільців з лука.

Радіовимірювальний прилад визначення м'язової пам'яті спортсменів – стрільців з лука складається з трьох сенсорів тиску з частотними перетворювачами (на кожен палець, який бере участь в натягу лука), сенсора нахилу і сенсора кутових прискорень за осями з частотним перетворенням, трьох мікроконтролерів і радіомодуля передачі інформації на частоті $2,4 \text{ ГГц}$. Розроблено оригінальне програмне забезпечення роботи радіовимірювального приладу, яке дозволяє вимірювати і контролювати в реальному часі 11 параметрів спортсмена під час його стрільби з лука.

Розроблені радіовимірювальні прилади дозволило підвищити точність визначення сили натягу плечей лука, розподіл навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу, які лежать в заданих межах $\pm 0,025\%$.

7. Повнота висвітлення результатів у наукових працях і особистий внесок здобувача

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 32 наукових працях. Серед них 5 статей у науково метричній базі Scopus, 7 статтях у фахових виданнях України, 12 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць

науково-технічних конференцій (6 статей у виданнях, що входять до міжнародних науко метричних баз даних), отримано 8 патентів на корисні моделі України. Аналіз внеску автора в публікації з питань, висвітлених у дисертації, показав, що внесок Осадчука Я.О. є суттєвим.

8. Відповідність автореферату змісту дисертаційної роботи

Автореферат повністю висвітлює зміст дисертаційної роботи, її мету та наукову новизну. В ньому подано коротку інформацію про кожний з розділів дисертації, а також інші необхідні дані. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам МОН України.

9. Загальні зауваження

1. Аналітичний огляд існуючих конструкцій тензорезистивних параметричних перетворювачів тиску доцільно скоротити та сконцентрувати увагу саме на частотних параметричних пристроях тиску.
2. На мій погляд, необхідно було дати порівняльний аналіз існуючих електричних схем автогенераторів, як одного із основних елементів параметричних перетворювачів типу "тиск-частота".
3. При визначенні методичної похибки вимірювання, яка обумовлена нестабільністю частоти автогенератора, не обґрунтовано доцільність використання полінома шостого ступеня для апроксимації вольт-амперної характеристики перетворювача.
4. Не подано достатнього обґрунтування щодо вибору саме частотного параметричного перетворювача тиску з тензочутливим резистором в якості основного перетворювача тиску в радіовимірювальних приладах для визначення психофізіологічного стану спортсменів – стрільців з лука.
5. В роботі не наведено даних стосовно часу готовності (тривалості процесу вибігу частоти автогенератора після включення перетворювача) та довготривалої стабільності частоти автогенератора під дією дестабілізуючих факторів, що є суттєвим для вимірювальних перетворювачів частотного типу.
6. З наведених даних не зрозуміло, як радіовимірювальний прилад оцінки фізичного стану спортсмена – стрільця із лука забезпечує точність 0,025 %, в той же час, коли граничні значення сумарної похибки запропонованих перетворювачів тиску складають 0,36 %.
7. В тексті роботи зустрічаються не зовсім коректні стилістичні вирази, наприклад:
 - " ... при дії тиску ..." замість "... під дією тиску ..." (с. 54, 143);
 - " ... резонансна частота коливається ..." замість " ... резонансна частота змінюється за законом ..." (с. 58);
 - " ... частота генерації ..." замість "... частота автогенератора ..." або "... частота коливань, які генеруються ..." (с. 77, 154).

10. Загальна оцінка дисертації

Виходячи з критичного розгляду дисертації і зауважень до неї, вважаю, що зауваження не стосуються принципових положень роботи. За актуальністю теми,

обсягом виконаних досліджень, новизною і ступенем обґрунтованості наукових положень та практичною цінністю робота Осадчука Ярослава Олександровича «Радіовимірвальні прилади на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.11.08 – радіовимірвальні прилади і вимогам пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Осадчук Ярослав Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірвальні прилади.

Офіційний опонент,
професор кафедри телекомунікацій
і комп'ютерно-інтегрованих технологій
Хмельницького національного університету
д.т.н., доцент



Підченко С.К.

Підпис професора Підченко С.К. засвідчую.
Перший проректор, проректор з НП та НР
Хмельницького національного університету
д.е.н., професор



Войнаренко М.П.