

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.2.08

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ
ЧАСТОТНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИСКУ**

Спеціальність 05.11.08 – Радіовимірювальні прилади

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі радіотехніки Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: **Семенов Андрій Олександрович**,
кандидат технічних наук, доцент,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри радіотехніки

Офіційні опоненти: **Підченко Сергій Костянтинович**,
доктор технічних наук, доцент,
Хмельницький національний університет,
професор кафедри телекомунікацій і
комп'ютерно-інтегрованих технологій

Шевченко Костянтин Леонідович,
доктор технічних наук, доцент,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»,
професор кафедри автоматизації експериментальних
досліджень

Захист дисертації відбудеться "19" жовтня 2018 року о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК

Автореферат розісланий "10" вересня 2018 року

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

О. М. Васілевський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тиск відноситься до одного з основних параметрів, який підлягає вимірюванню і контролю в різноманітних галузях науки, техніки, промисловості. Його потрібно вимірювати в космічних дослідженнях, при моніторингу навколишнього середовища, в автомобільній промисловості, комп'ютерній техніці, будівництві, хімічній промисловості, нафтогазовій промисловості, військовій техніці тощо. Тому виявляється нагальна необхідність розширення наукових досліджень в галузі вітчизняного виробництва радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів механічних величин з огляду їх подальшого розвитку в напрямках: малі масогабаритні показники, висока точність, надійність, відтворюваність, низька вартість, широка номенклатура та інтеграція з мікропроцесорними пристроями обробки інформації. Все це примушує проводити пошук і розробку нових методів вимірювання, які б дозволили вирішити задачі, що з'являються у зв'язку з потребами практики.

На теперішній час більшість сенсорів, в тому числі сенсори тиску, є аналоговими, у яких вихідною величиною є струм або напруга. Це приводить до ряду недоліків у їх роботі, таких як низька точність і чутливість, низький вихідний сигнал, паразитний вплив вимірювальних каналів один на інший, значні масогабаритні показники тощо. Ці недоліки відносяться до широко використовуваних на теперішній час сенсорів тиску, таких як п'єзоелектричні, тензорезистивні, з розподіленими РС-структурами і поверхнево-акустичні.

Перспективним науковим напрямком, що дозволяє усунути недоліки аналогових сенсорів тиску, є створення радіовимірювальних частотних мікроелектронних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення "тиск-частота" на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Створення таких приладів виключає з їх конструкції підсилювальні пристрої та аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем контролю та управління, а також створити "інтелектуальні" вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та первинного перетворювача. Тому необхідність розроблення теоретичних засад до створення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів тиску на основі функціональної залежності реактивних властивостей напівпровідникових приладів з від'ємним опором від тиску, а також розробки схем, конструкцій, експериментальне дослідження параметрів, оцінювання їх метрологічних характеристик, розроблення мікропроцесорних приладів вимірювання тиску та впровадження їх у виробництво є актуальним на даний час.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась згідно з госпдоговірними та держбюджетними науководослідними роботами: 32-Д-348 «Розробка радіовимірювальних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур» (2013–2014 р.), № державної реєстрації 0113U002287С; 32-Д-354 «Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2013–2014 р.), № державної реєстрації 0113U003133; 32-Д-373 «Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових структур» (2015–2016 р.), № державної реєстрації 0115U001123; 32-Д-386 «Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах», № державної реєстрації 0117U000573, а та-

кож згідно програм розвитку електронної промисловості України на 2015-2020 роки. "Електроніка України - 2015".

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення точності, чутливості та рівня вихідного сигналу радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску та радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та моніторингу фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука на їх основі, технологічно сумісних з мікроелектронною елементною базою, принцип роботи яких базується на використанні функціональної залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором від зміни тиску, що надає можливість створення та виготовлення конкурентоспроможних зразків цієї продукції.

Об'єктом дослідження є процес перетворення тиску у частотний сигнал у радіовимірювальних приладах та частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах.

Предметом дослідження є метод, радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску та радіовимірювальні прилади визначення м'язової пам'яті спортсменів та моніторингу фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі необхідно вирішити такі **завдання:**

- проаналізувати існуючі прилади тиску, показати їх недоліки та обґрунтувати переваги методу вимірювання тиску при перетворенні його у частотний сигнал на основі радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску у порівнянні з аналогами;
- розробити математичні моделі тензореактивного ефекту в діодних, біполярних і польових транзисторах;
- розробити математичні моделі радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів тиску, на основі яких отримати аналітичні залежності функцій перетворення та рівнянь чутливості;
- розробити радіовимірювальні прилади моніторингу фізичної підготовки та м'язової пам'яті спортсменів стрільців з лука, їх принципові електричні схеми, блок-схеми, конструкції;
- розробити радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі транзисторних структур з резистивними, ємнісними, діодними та транзисторними тензочутливими елементами, їх принципові електричні схеми, блок-схеми, конструкції;
- виконати експериментальну перевірку розроблених математичних моделей радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів від тиску та дослідити їх характеристики в широкому діапазоні частот;
- здійснити метрологічну оцінку похибок вимірювання тиску та впровадити розроблені радіовимірювальні прилади тиску у практику.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше запропоновано метод* вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах тиску з тензочутливими елементами, який відрізняється від існуючих

використанням залежності повного опору тензочутливих елементів від тиску, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочутливі елементи виступають і в ролі активних елементів радіовимірювальних частотних параметричних перетворювачів, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тисків.

2. *Вперше розроблено* математичні моделі тензореактивного ефекту в тензочутливих напівпровідникових діодах, біполярних та польових транзисторах, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано залежності параметрів діодів, біполярних та польових транзисторів від тиску, що лягло в основу розрахунку повного опору тензочутливих елементів від тиску.

3. *Розроблено математичні моделі* радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, в яких на відміну від існуючих враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем приладів на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором, що дало можливість отримати функції перетворення і рівняння чутливості.

4. *Теоретично встановлено і експериментально підтверджено* залежності вихідної частоти радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів від тиску, які відрізняються від існуючих тим, що тиск перетворюється у вихідну частоту, що дозволило створити радіовимірювальні прилади визначення м'язової пам'яті та моніторингу фізичної підготовки спортсменів з покращеними метрологічними параметрами.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Розроблено радіовимірювальні багатоканальні прилади моніторингу фізичної підготовки та м'язової пам'яті спортсменів стрільців з лука на основі створених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило підвищити визначення силу натягу плечей лука, розподілу навантаження на пальці спортсменів, кількість спроб сили натягу, які знаходяться в заданих межах $\pm 0,025\%$.

2. Розроблено радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі біполярно-польової транзисторної структури з пасивними і активними індуктивними елементами, в яких первинними тензочутливими елементами виступали діоди, резистивні та ємнісні елементи, при цьому чутливість перетворювачів складала 0,35 кГц/кПа – 2,65 кГц/кПа в діапазоні тисків від 10кПа до 200кПа.

3. Розроблено радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі біполярно-польової структури, в якій тензочутливим елементом виступав двоколекторний біполярний транзистор. Чутливість приладу складала 0,65 кГц/кПа – 1,12кГц/кПа в діапазоні тисків від 60 кПа до 140 кПа.

4. Розроблено радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі польової транзисторної структури з пасивною і активною індуктивністю, в якій тензочутливим елементом виступив двостоковий польовий транзистор, чутливість приладів складала 1,6 кГц/кПа – 2,85 кГц/кПа в діапазоні тисків від 60 кПа до 120 кПа.

5. Розроблено принципові електричні схеми, блок-схеми, конструкції радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та приладів моніторингу фізично-

го стану спортсменів стрільців з лука, а також радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.

6. Отримано аналітичні вирази для функцій перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, які можуть бути використані для інженерних розрахунків характеристик приладів тиску.

7. Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі "Matlab 7.1" для моделювання та розрахунків характеристик розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних приладів тиску.

8. Встановлено максимальне значення сумарної похибки вимірювання тиску розроблених приладів, яка складає $\pm 0,36\%$, а чутливість $0,35 \text{ кГц/кПа} - 2,85 \text{ кГц/кПа}$.

Реалізація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджено у Федерації стрільби з лука України в національній збірній України зі стрільби з лука та навчальний процес кафедри радіотехніки ВНТУ при вивченні курсів "Сенсори фізичних величин", "Генерування та формування сигналів" та "Радіовимірювальні перетворювачі інформації".

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно у Вінницькому національному технічному університеті. У роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належить: [1] – проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску; [2] – розроблено схему частотного перетворювача тиску на основі двостокового тензотранзистора та отримано функцію перетворення та рівняння чутливості; [3] – проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни ємності MEMS- конденсатора та тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску; [4] – удосконалено математичну модель перетворювача тиску; [5] – запропоновано еквівалентну схему генератора; [6] – проведено дослідження впливу тиску на параметри МДН-транзисторних структур; [7] – експериментально досліджено вплив деформації на електричні параметри напівпровідникових структур; [8] – запропоновано схему активного індуктивного елемента і його включення у схему перетворювача тиску; [9] – розроблено еквівалентну схему перетворювача і розраховано залежність функції перетворення від тиску; [10] – проведено теоретичні, експериментальні дослідження функції перетворення сенсора тиску з частотним виходом; [11] – розроблено математичну модель сенсора тиску на основі двоколекторного тензотранзистора; [12] – розроблено еквівалентну схему перетворювача тиску і оптимальне місце включення MEMS-конденсатора у схему; [13] – проведено дослідження впливу тиску на електричні параметри напівпровідників; [14] – проведено огляд існуючих перетворювачів тиску; [15] – проведено експериментальні дослідження характеристик перетворювача тиску з частотним вихідним сигналом; [16] – розроблено еквівалентну схему перетворювача тиску; [17] – запропоновано еквівалентну схему двостокового МДН-тензотранзистора; [18] – проведено експериментальні дослідження характеристик сенсора тиску; [19] – розроблено математичну модель двоколекторного тензотранзистора; [20] – отримано аналітичні вирази функції перетворення і чутливості перетворювача тиску на основі двостокових МДН-тензотранзисторів; [21] – розроблено структурну схему вимірювально-інформаційної системи та проведено експериментальні дослідження; [22] – розроблено структурну схему багатоканальної системи та проведено експериментальні дослідження; [23] – запропоновано використання MEMS-

сенсорів тиску у вимірювальній системі та досліджено функції перетворення частотних перетворювачів тиску; [24] – розроблено структурну схему вимірювальної системи для блочного лука та проведено експериментальні дослідження; [25], [26] – запропоновано схему активного індуктивного елемента; [27] – запропоновано схему живлення двостокового тензочутливого МДН- транзистора; [28] – запропоновано схему з використання двостокового тензочутливого МДН- транзистора; [29] – запропоновано структурну схему багатоканальної вимірювальної системи; [30] – запропоновано використання трьох частотних перетворювачів тиску та систему обробки інформації; [31] – запропоновано схему підключення двостокового тензочутливого транзистора; [32] – запропоновано схему підключення двостокового тензочутливого транзистора в загальну схему перетворювача тиску.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, що викладено у дисертації, було апробовано на наукових конференціях, серед них:

VIII Mezinárodní vědecko - praktická conference Vznik moderní vědecké - 2012», 2012. Praha (Чехія); VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka i inowacja - 2012», 2012. Przemysł (Польща); III Міжнародна науково-практична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", 2013. м. Чернівці (Україна); III Всеукраїнська науково-практична конференція "Інтелектуальні технології в системному програмуванні 2014", 2014. м. Хмельницький (Україна); XIII Міжнародна науково-технічна конференція "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах", ВОТТП-2014, м. Одеса. (Україна); Міжнародні НТК "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" РТПСАС 2015, 2016, 2017 р., м. Київ. (Україна); П'ята міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", м. Івано-Франківськ, 2015. (Україна); 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). Proceedings. – Omsk. Russia; XII International scientific and practical conference, «Areas of scientific thought», 2016. Sheffield, United Kingdom; XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016», 2016. Przemysl. (Польща); XIIIth International Conference TCSET-2016. " Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science", 2016. Lviv-Slavsko, Ukraine; Vth International Scientific-Practical Conference "Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Information Systems" PREDT-2016. 2016, Chernivtsi, Ukraine; VI Міжнародної НТК "Датчики, прилади та системи – 2017". ДПС-2017. 2017. Черкаси-Херсон (Україна); VI Міжнародної НТК "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (СПРТП-2017). 2017. Вінниця (Україна).

Публікації

Результати дисертації опубліковано у 32 наукових працях. Серед них 5 статей у науково метричній базі Scopus, 7 статей у фахових виданнях України, 12 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій (6 статей у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних), отримано 8 патентів на корисні моделі України.

Обсяг і структура дисертації

Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і 8 додатків. Загальний обсяг дисертації 252 сторінки, з яких основний зміст викладено на 170 сторінках друкованого тексту, містить 126 рисунків, 6 таблиць.

Список використаних джерел складається з 171 найменування. Додатки містять результати розрахунків, фрагменти програмного забезпечення та акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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** проведено аналіз публікацій та патентів, присвячених теоретичним та експериментальним дослідженням розвитку перетворювачів тиску. Показано, що існуючі методи та прилади вимірювання тиску поділяються на аналогові, параметричні, частотні, цифрові. Аналогові прилади тиску мають низькі вихідні сигнали, низьку точність і чутливість, паразитні впливи каналів вимірювання один на інший, тому вимагають додаткових підсилювальних пристроїв, аналогово-цифрових перетворювачів при подальшій обробці вихідних сигналів. Ємнісні параметричні прилади тиску хоча мають високу точність і чутливість, проте не здатні працювати при високих тисках, мають високу вартість. Індуктивні параметричні прилади тиску характеризуються значними вихідними сигналами, широким діапазоном вимірювання, проте температурно нестабільні, мають високу чутливість до ударів та вібрації. Частотні п'єзоелектричні прилади тиску мають низькі вихідні напруги, низьку точність, недостатню стабільність роботи. Частотні прилади тиску на поверхневих акустичних хвилях мають низьку точність і чутливість, які можна підвищити за рахунок введення двох діафрагм, що значно ускладнює прилад. Частотні прилади тиску на основі розподілених RC-структур характеризуються такими недоліками як і п'єзоелектричні прилади тиску, оскільки структура опору виконана з п'єзоелектрика. Цифрові прилади вимірювання тиску мають високу точність і чутливість, проте є складними і дорогими, використовуються при прецизійному вимірюванні тиску.

Найбільш оптимальним для практичної реалізації є частотний метод вимірювання тиску на основі залежності реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором від тиску. Прилади, що побудовано на цьому методі, дозволяють усунути недоліки існуючих приладів тиску, тобто значно підвищити точність і чутливість, відмовитися від використання підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці сигналів, при цьому можлива передача сигналів на відстань, а також повна інтелектуалізація радіовимірювальних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску. Аналіз сучасного стану перетворювачів тиску дозволив сформулювати мету і задачі досліджень, а також оцінити їх теоретичний рівень.

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

Математична модель тензореактивного ефекту в напівпровідниковому тензочутливому діоді описує залежність його повного опору від дії тиску. Зміна дійсної і уявної

складових повного опору від дії тиску визначає залежність вихідної частоти радіовимірних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів від дії тиску. Таким чином, для вирішення цієї задачі необхідно визначити еквівалентну схему діода, залежність її елементів від дії тиску і на основі цього знайти залежність повного опору від дії тиску. Еквівалентну схему напівпровідникового діода визначено з розв'язку рівняння перенесення носіїв заряду в базовій області діода, яка зображена на рис. 1.

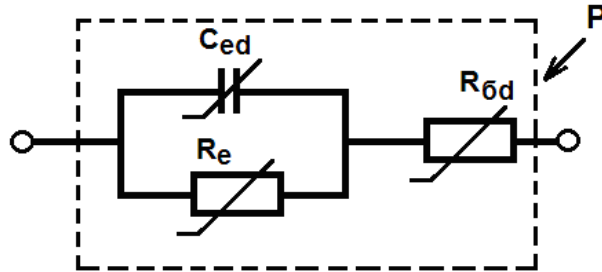


Рисунок 1 – Еквівалентна схема р-п переходу у відкритому стані (C_{ed} – дифузійна ємність р-п переходу, R_e – опір р-п переходу, $R_{\delta d}$ – опір базової області)

Основними електрофізичними факторами, що змінюють параметри діода під дією тиску, виступають зміна ширини забороненої зони, зміна ефективних мас та рухливості носіїв заряду, що приводить до залежності C_{ed} , R_e і $R_{\delta d}$ від тиску. Виходячи з формул для C_{ed} , R_e і $R_{\delta d}$ визначимо їх зміни від дії тиску

$$\Delta R_e(P) = \frac{\partial R_e}{\partial I_e} \Delta I_e(P) + \frac{\partial R_e}{\partial T} \Delta T(P), \quad (1)$$

$$\Delta C_{ed}(P) = \frac{\partial C_{ed}}{\partial I_e} \Delta I_e(P) + \frac{\partial C_{ed}}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P) + \frac{\partial C_{ed}}{\partial T} \Delta T(P), \quad (2)$$

$$\Delta R_{\delta d}(P) = \frac{\partial R_{\delta d}}{\partial I_e} \Delta I_e(P) + \frac{\partial R_{\delta d}}{\partial T} \Delta T(P), \quad (3)$$

де I_e – прямий струм через р-п перехід, τ_p – час життя носіїв заряду в базовій області діода, T – температура, P – тиск.

Повний опір напівпровідникового діода (рис.1) визначається формулою

$$Z = R_{\delta d} + \frac{R_e}{1 + (\omega C_{ed} R_e)^2} - j \frac{\omega R_e^2 C_{ed}}{1 + (\omega C_{ed} R_e)^2}. \quad (4)$$

При підстановці формул (1) – (3) у вираз (4) розраховано залежності дійсної та уявної складових виразу (4) від дії тиску, які представлено на рис.2 і рис. 3.

Як видно з рис. 2 та рис. 3, зміна складових повного опору діодів є суттєвою, особливо при тисках більше 10^6 Па, що є основою використання їх у якості тензо-чутливих елементів радіовимірних частотних параметричних перетворювачів тиску.

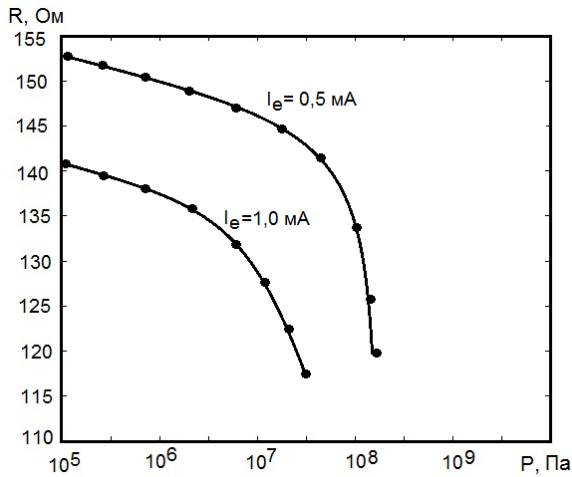


Рисунок 2 – Залежність дійсної складової повного опору напівпровідникового діода від тиску

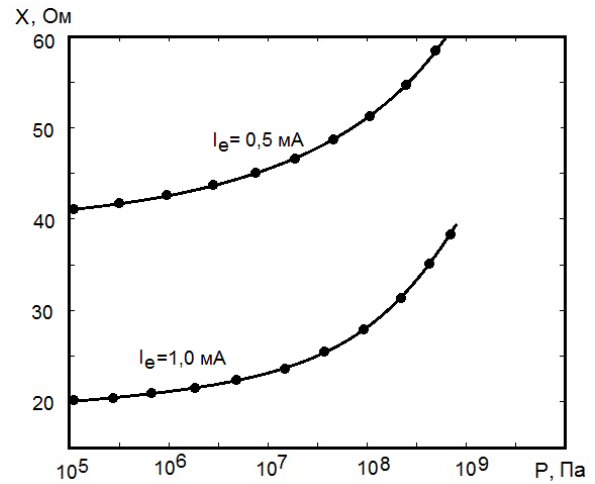


Рисунок 3 – Залежність уявної складової повного опору напівпровідникового діода від тиску

Одним з перспективних напівпровідникових приладів, який працює в широкому діапазоні частот ($10^4 - 10^{12}$) Гц і має від'ємний диференційний опір, є тунельно-резонансний діод. Це дає можливість створити на його основі автогенераторний радіовимірювальний частотний параметричний перетворювач тиску. Зміна енергетичних станів електронів внаслідок дії тиску приводить до зміни вольт-амперної характеристики, а також до зміни частоти генерації перетворювача. Еквівалентна схема перетворювача тиску подана на рис. 4.

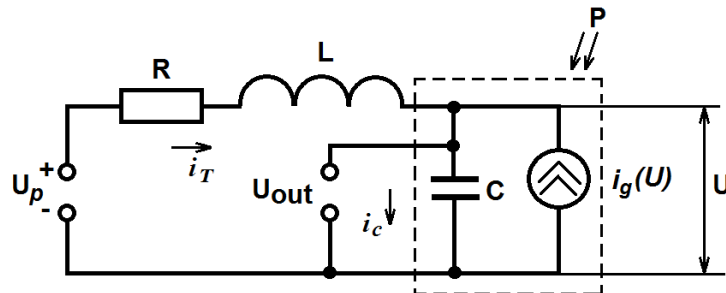


Рисунок 4 – Еквівалентна схема радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску на основі тунельно-резонансного діода

Еквівалентна схема складається з джерела живлення U_p , опору втрат R , індуктивності L , яка з'єднана послідовно з ємністю C , паралельно якій підключено джерело струму, яке керується напругою U , що описує спадаючу ділянку вольт-амперної характеристики перетворювача. На основі схеми (рис. 4) складено і розв'язано диференційне рівняння другого порядку, що описує коливальний процес в автогенераторі перетворювача. Розв'язок рівняння дозволив отримати залежність амплітуди коливань від часу, умову виникнення синусоїдальних коливань в автогенераторі, функцію перетворення і рівняння чутливості. Функція перетворення, тобто залежність частоти генерації параметричного перетворювача від дії тиску, описується виразом

$$F_p(P) = \frac{1}{2\pi R_g(P) C_{ekv}} \sqrt{\frac{R_g^2(P) C_{ekv}}{L} - 1}, \quad (5)$$

де $R_g(P)$ – від'ємний диференційний опір в робочій точці, C_{ekv} – еквівалентна ємність коливального контура, L – індуктивність коливального контура. Чутливість

перетворювача визначається з формули (5) шляхом диференціювання виразу (5) по величині тиску P і описується рівнянням

$$S_P^{F_p} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L}} - 1 \left(\frac{dR_g(P)}{dP} \right)}{\pi R_g^2(P)C_{ekv}} + \frac{1}{2} \frac{\frac{dR_g(P)}{dP}}{\pi L \sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{ekv}}{L}} - 1}. \quad (6)$$

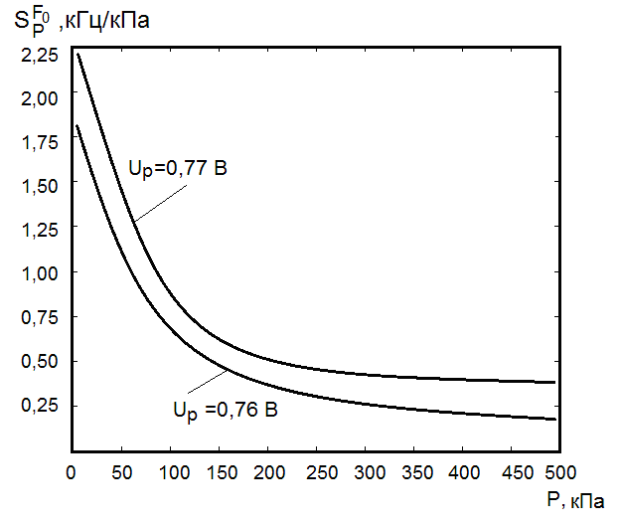
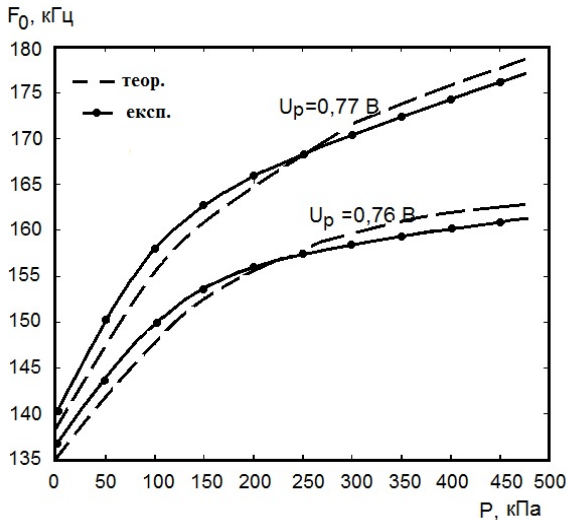


Рисунок 5 – Залежність частоти генерації від тиску Рисунок 6 – Залежність чутливості від тиску

На рис. 5 подано залежність частоти генерації від тиску. Як видно з графіка, частота зростає більш різко при малих тисках (до 150 кПа) і менших напругах живлення (0,76 В). Така поведінка функції перетворення пояснюється зміною величини від'ємного опору від дії тиску. На рис.6 подано залежність чутливості від тиску. Аналіз цього графіка показує, що існують певні діапазони тиску і діапазони живлення з постійної напруги, при яких чутливість має максимальне значення і змінюється від 2,25 кГц/кПа до 0,35 кГц/кПа.

Розглянемо роботу і схемотехнічне рішення частотного параметричного мікроелектронного перетворювача тиску з тензочутливим резистором, геометрія якого відповідає будові пальців спортсменів стрільців з лука. Електрична схема частотного перетворювача тиску наведена на рис.7. Вона являє собою інтегральну схему, що складається з трьох біполярних транзисторів (інтегральна схема НFA3096), опорів R2-R5, а також тензорезистивного чутливого елемента R2, що дозволяє створити автогенераторний пристрій. Коливальний контур пристрою реалізовано на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 і активної індуктивності на основі транзистора VT3 з фазозсувним ланцюгом R5C1.

На рис. 8 представлена динамічна вольт-амперна характеристика перетворювача тиску. Чутливим до тиску елементом виступає сенсор фірми Interlink Electronics FSR-400. На тензочутливий елемент R2 діє тиск, що приводить до зміни еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору коливального контуру, а це в свою чергу, викликає зміну резонансної частоти автогенератора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються за рахунок від'ємного диференційного опору.

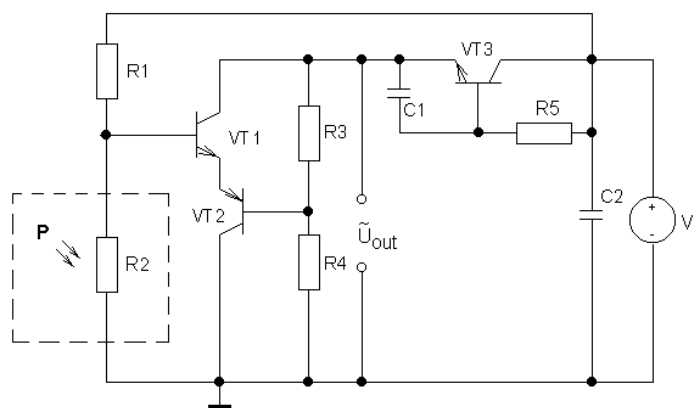


Рисунок 7 – Радіовимірювальний частотний параметричний перетворювач тиску на основі тензочутливого резистора

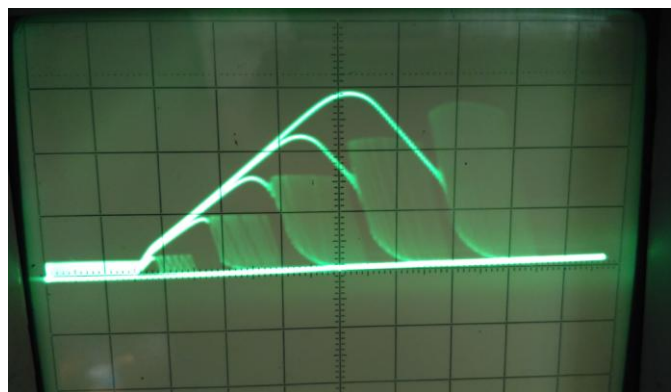


Рисунок 8 – Динамічна ВАХ радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску (по вертикальній вісі одна поділка – 2мВ, а по горизонтальній вісі – 2В)

Функція перетворення описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi R_g(P) C_{EKV}(P)} \left[\frac{R_g^2(P) C_{EKV}(P)}{L_{EKV}} - 1 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

а чутливість визначається з формули (7). Графік функції перетворення представлено на рис. 9, а графік чутливості на рис. 10. Як видно з рис. 10, чутливість перетворювача змінюється від 42,5 Гц/г/см² до 78,0 Гц/г/см² в діапазоні від 0 до 26 кг/см².

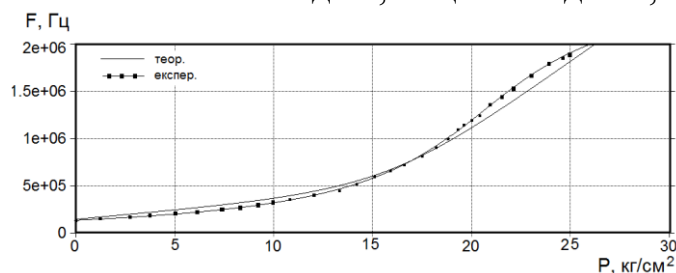


Рисунок 9 – Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни тиску

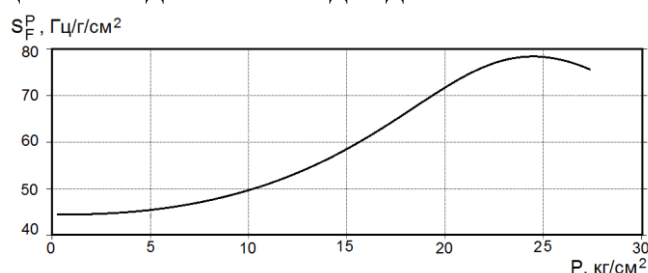


Рисунок 10 – Залежність чутливості перетворювача від зміни тиску

Як видно з графіка, найбільша чутливість приладу лежить у діапазоні від 15 кг/см² до 25 кг/см² і складає 58 Гц/г/см² – 78 Гц/г/см². Розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень складає ±2,5%.

З метою визначення оптимальної конструкції приладів тиску для стрільців з лука було також досліджено характеристики частотних параметричних перетворювачів тиску на основі мостових MEMS-тензорезисторних елементів і тензочутливих конденсаторів, чутливість яких складала 0,985 кГц/кПа – 2,65 кГц/кПа в діапазоні від 50 кПа до 150 кПа.

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

Математична модель тензореактивного ефекту в біполярних транзисторах описує залежність повного опору на електродах емітер-колектор від дії тиску на транзистор. Дія тиску на біполярний транзистор відбувається через мембрану, на якій по її центру розміщено транзистор, що приводить до зміни енергії електронів і дірок в зоні провідності і в валентній зоні, а це, в свою чергу, приводить до зміни усіх параметрів транзистора. Внаслідок цього змінюється повний опір на електродах емітер-колектор, що викликає зміну резонансної частоти радіовимірювальних частотних параметричних перетворювачів тиску. Таким чином, необхідно визначити повний опір на електродах емітер-колектор транзистора і знайти залежність його складових від тиску. Для розрахунків використано схему (рис. 11). Зміна опору емітерного переходу R_e від дії тиску P має вигляд

$$\Delta R_e(P) = \frac{\partial R_e}{\partial W} \Delta W(P) + \frac{\partial R_e}{\partial p_n} \Delta p_n(P) + \frac{\partial R_e}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial R_e}{\partial U_e} \Delta U_e(P), \quad (8)$$

де W – товщина бази, μ_p , p_n – рухливість і концентрація дірок, U_e – напруга на емітерному p-n переході.

Зміна дифузійного опору R_{bd} від дії тиску визначається формулою

$$\Delta R_{bd}(P) = \frac{\partial R_{bd}}{\partial I_e} \Delta I_e(P) + \frac{\partial R_{bd}}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial R_{bd}}{\partial W} \Delta W(P), \quad (9)$$

де I_e – струм через емітерний p-n перехід.

Приріст коефіцієнта передачі струму h_{21b} від дії тиску описується рівнянням

$$\Delta h_{21b}(P) = \frac{\partial h_{21b}}{\partial W} \Delta W(P) + \frac{\partial h_{21b}}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(P) + \frac{\partial h_{21b}}{\partial T} \Delta T(P) + \frac{\partial h_{21b}}{\partial \tau_p} \Delta \tau_p(P), \quad (10)$$

де τ_p – час життя дірок, T – температура.

Залежність останніх елементів еквівалентної схеми від дії тиску визначено аналогічним чином. Визначивши зміни елементів еквівалентної схеми біполярного транзистора від тиску (рис. 11) можна розрахувати і експериментально перевірити залежності дійсної і уявної складових повного вихідного опору біполярного транзистора від тиску, тобто тензореактивний ефект транзистора. На рис. 12 і рис. 13 подано теоретичні та експериментальні залежності складових повного опору від дії тиску.

Як видно з рис. 12 і рис. 13, дійсна складова змінюється на $10 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а уявна складова на $20 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ при зміні тиску на $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що є суттєвим для використання біполярних транзисторів як тензочутливих елементів в радіовимірювальних частотних параметричних перетворювачах тиску.

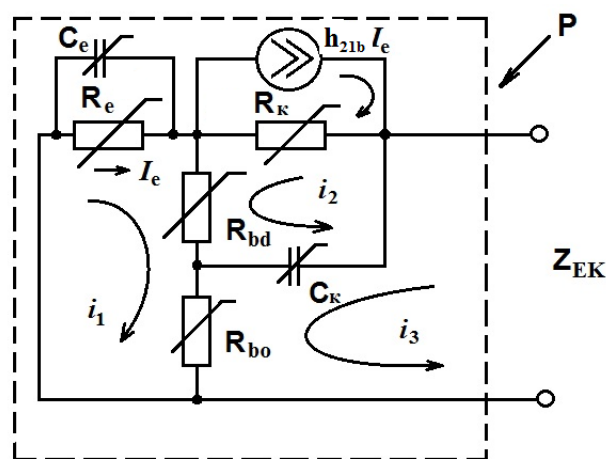


Рисунок 11 - Еквівалентна схема біполярного транзистора при дії тиску

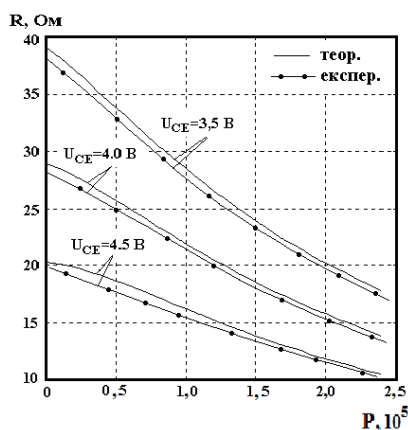


Рисунок 12 – Залежність дійсної складової повного опору біполярного транзистора від тиску

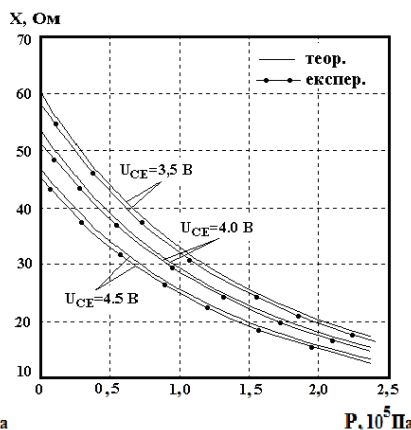


Рисунок 13 – Залежність уявної складової повного опору біполярного транзистора від тиску

Тензореактивний ефект в польових транзисторах, тобто залежність його повного вихідного опору від дії тиску, визначаємо на основі залежності елементів еквівалентної схеми від тиску, які є складовими повного опору. Залежність дійсної і уявної складових повного опору від тиску визначає зміну резонансної частоти частотного перетворювача. Еквівалентна схема польового транзистора, який виступає первинним перетворювачем тиску, подана на рис. 14.

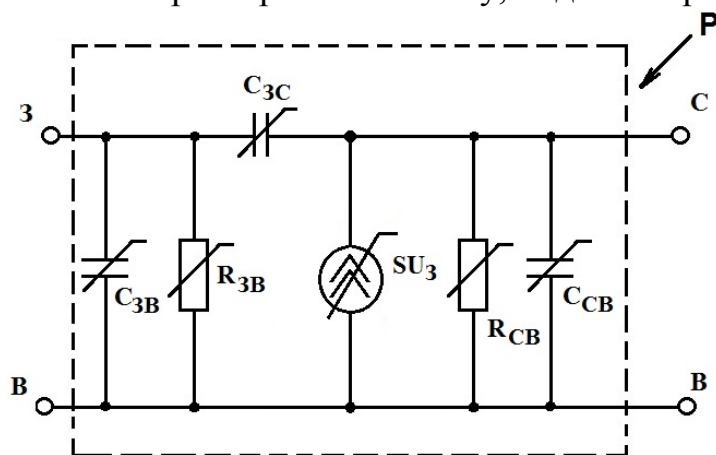


Рисунок 14 – Еквівалентна схема польового транзистора при дії тиску

Оскільки польовий транзистор працює в лінійному режимі, коли $U_{CB} < U_{3B}$, і нелінійному режимі, тобто в режимі насичення, коли $U_{CB} > U_{3B}$, то математичну модель тензореактивного ефекту розроблено для цих двох режимів. Розглянемо зміну параметрів транзистора від тиску в режимі насичення. Зміна опору каналу R_{CBH} в режимі насичення від дії тиску описується формулою

$$\Delta R_{CBH}(P) = \frac{\partial R_{CBH}}{\partial L} \Delta L(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial R_{CBH}}{\partial U_{CB}} \Delta U_{CB}(P), \quad (11)$$

де Z – ширина каналу; L – довжина каналу польового транзистора; U_{nop} – порогова напруга; μ_n – рухливість електронів у каналі; C_0 – ємність під затворного діелектрика на одиницю площі; U_{3B} – напруга затвор-витік; U_{CB} – напруга стік-витік.

Приріст крутості при дії тиску в режимі насичення визначається виразом

$$\begin{aligned} \Delta S(P) = & \frac{\partial S}{\partial Z} \Delta Z(P) + \frac{\partial S}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial S}{\partial C_0} \Delta C_0(P) + \frac{\partial S}{\partial L} \Delta L(P) + \\ & + \frac{\partial S}{\partial U_{3B}} \Delta U_{3B}(P) + \frac{\partial S}{\partial U_{nop}} \Delta U_{nop}(P). \end{aligned} \quad (12)$$

Прирости усіх останніх параметрів польового транзистора від дії тиску визначено аналогічним чином. Визначивши деформаційні прирости елементів еквівалентної схеми польового транзистора з індуктованим каналом, можна розрахувати і експериментально перевірити залежності дійсної і уявної складових вихідного опору від тиску, тобто дослідити тензореактивний ефект. На рис. 15 подано залежність дійсної складової повного вихідного опору польового тензотранзистора від тиску, а на рис. 16 подано залежність уявної складової від тиску.

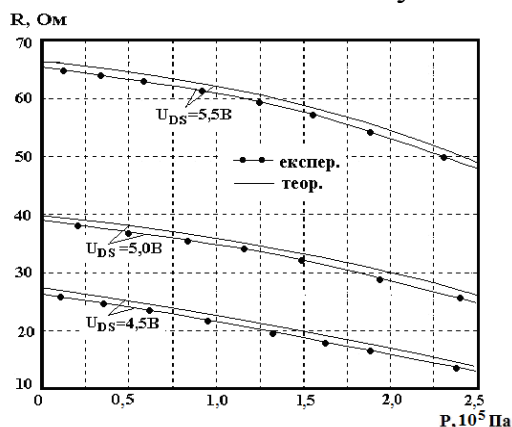


Рисунок 15 – Теоретичні і експериментальні залежності дійсної складової повного опору МДН-тензотранзистора від тиску

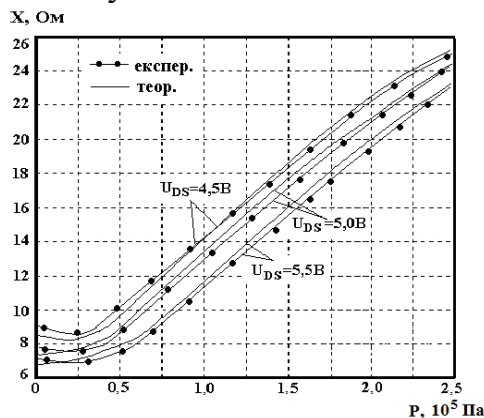


Рисунок 16 – Теоретичні і експериментальні залежності уявної складової повного опору МДН-тензотранзистора від тиску

Як видно з рис. 15 і рис. 16, зміна дійсної складової дорівнює $10 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$, а уявної складової $20 \text{ Ом}/10^5 \text{ Па}$ в діапазоні тисків від $0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $2,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$, що доводить їх можливість використовувати як первинні перетворювачі тиску в частотних пристроях тиску.

Використання тензочутливого двоколекторного біполярного транзистора як чутливого, так і підсилювального елемента дозволило значно спростити схему пристрою тиску і підвищити його чутливість. Електрична схема радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску наведена на рис. 17. Вона являє собою інтегральну схему, що складається із двоколекторного тензочутливого транзистора і польового двозатворного транзистора, які разом з індуктивністю і джерелом постійної напруги, утворюють автогенераторний пристрій, частота генерації якого залежить від зміни тиску.

На електродах першого колектора тензочутливого біполярного транзистора VT1 і стоці польового двозатворного транзистора VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер.

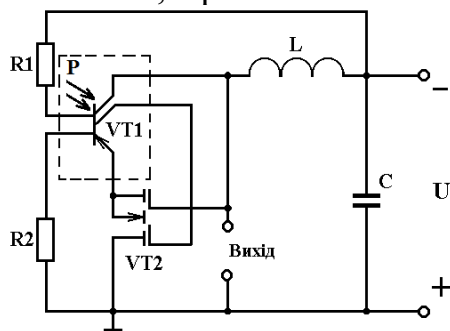


Рисунок 17 – Електрична схема радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску

Підключення зовнішньої індуктивності L до першого колектора тензочутливого транзистора $VT1$ і стоку польового транзистора $VT2$ через блокуючу ємність C створює коливальний контур автогенератора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються від'ємним опором. Резистори $R1$ і $R2$, а також джерело постійної напруги U забезпечують режим живлення з постійного струму досліджуваної схеми. При дії тиску на транзистор $VT1$ відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру, що викликає зміну резонансної частоти.

Функція перетворення, тобто залежність резонансної частоти сенсора від дії тиску, описується виразом

$$F(P) = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}(P)} \sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}^2(P)}{L} - 1}. \quad (13)$$

Чутливість визначається на основі виразу (13) і має вигляд

$$S_P^{F_p} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}^2(P)}{L} - 1} \left(\frac{dC_{ekv}(P)}{dP} \right)}{\pi R_g C_{ekv}^2(P)} + \frac{1}{4} \frac{R_g \frac{dC_{ekv}(P)}{dP}}{\pi L C_{ekv}(P) \sqrt{\frac{R_g^2 C_{ekv}^2(P)}{L} - 1}}. \quad (14)$$

На рис. 18 подано залежність резонансної частоти від тиску. Як видно з графіка, її залежність від тиску є нелінійною, це пояснюється нелінійною залежністю еквівалентної ємності коливальної системи автогенератора від тиску.

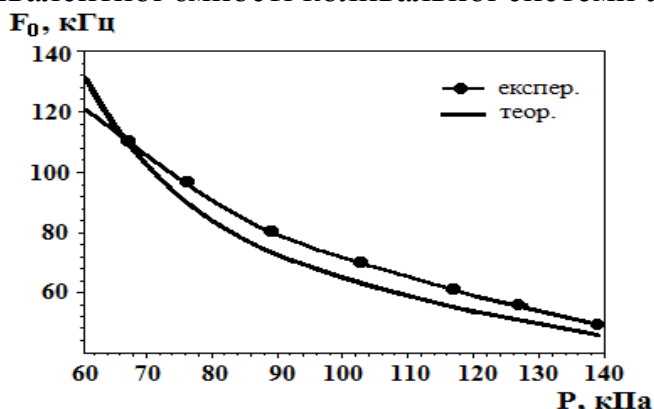


Рисунок 18 – Залежність резонансної частоти від тиску

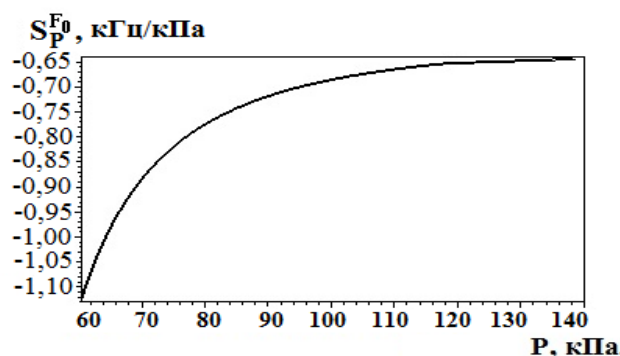


Рисунок 19 – Залежність чутливості перетворювача від тиску

На рис. 19 представлено залежність чутливості радіовимірювального частотного параметричного перетворювача від дії тиску. Аналіз графіка показує, що чутливість має максимальне значення 1,12 кГц/кПа і змінюється від 1,12 кГц/кПа до 0,65 кГц/кПа.

Також розроблено і досліджено характеристики радіовимірювального частотного параметричного мікроелектронного перетворювача тиску на основі двостокового МДН-тензотранзистора та двозатворного МДН-транзистора. Чутливість перетворювача на частоті 300 кГц при напрузі живлення 5 В складає 2,1 кГц/кПа.

Для реалізації радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску, виготовленого повністю за інтегральною технологією, було запропоновано і досліджено схему, що складається з чотирьох біполярних транзисторів з однаковими типами провідності, два з яких є тензочутливими елементами. Чутливість радіо-

вимірювального 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 дисертаційної роботи подано результати дослідження радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та моніторингу фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука на основі розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, описано структуру приладів, схемотехнічні та програмні рішення, проведено оцінювання метрологічних параметрів перетворювачів тиску.

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 по осях з частотним перетворювачем і сенсора кутових прискорень також по осях з частотним перетворювачем; 3 мікроконтролерів і радіомодуля передачі інформації на частоті $2,4 \text{ ГГц}$. Блок-схема і фотографія радіовимірювального приладу визначення м'язової пам'яті спортсменів стрільців з лука подано на рис. 20.

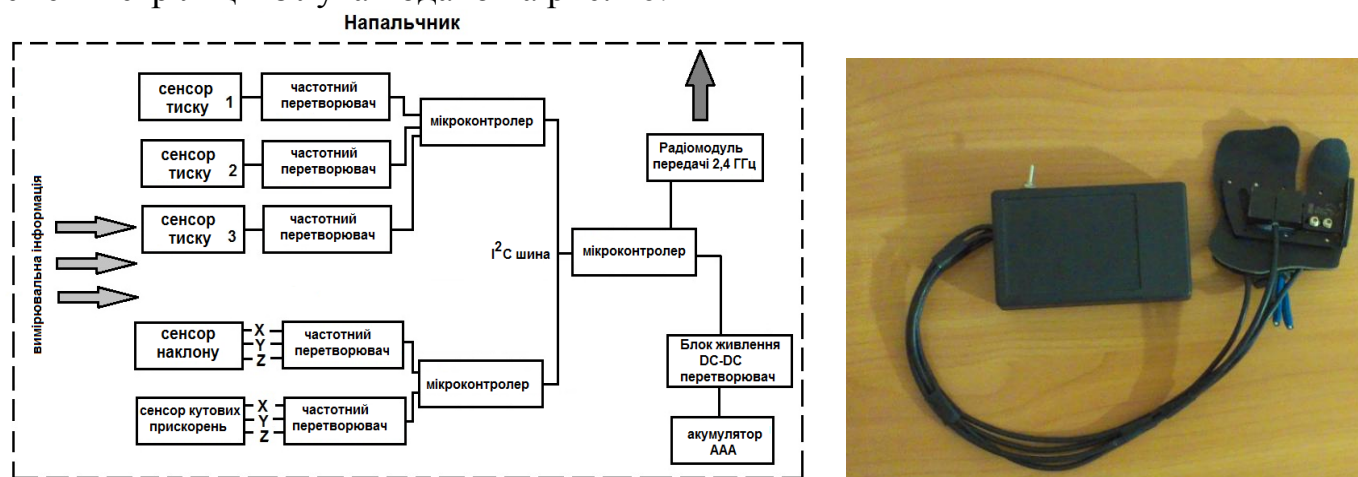


Рисунок 20 – Блок-схема і фотографія радіовимірювального приладу

За допомогою розробленого радіовимірювального приладу можна визначити основні характеристики механіко-біологічної системи "лук-стрілок":

- визначення сили натягу плечей лука – $10 \dots 25 \text{ кг} \pm 0,005 \text{ кг}$;
- можливість визначення розподілу навантаження на пальці – $10 \dots 25 \text{ кг}, \pm 0,005 \text{ кг}$;
- визначення зміни положення кисті руки, яка розтягує лук – по трьох осях (x, y, z) $\pm 0,1^\circ$;
- визначення прискорення або уповільнення тяги – $0,001 \text{ g}$;
- визначення м'язової пам'яті спортсмена при виконанні 10-20 повторень. Попередньо дається спроба до 5 разів з подачею звукового сигналу;
- фіксується динаміка і сила натягу лука;
- визначення кількості спроб, які збігалися з силою натягу спортсмена і спроби, які знаходяться в межах 10, 20, 30, 40, 50 гр.;
- час утримання лука в статичному положенні до втрати стабільності і появи тремору м'язів.

Розроблено оригінальне програмне забезпечення роботи радіовимірювального приладу. Програма iArch проста у використанні і не вимагає особливої підготовки і навчання. На рис. 21 подано розміщення сенсорів на напальчнику спортсмена.

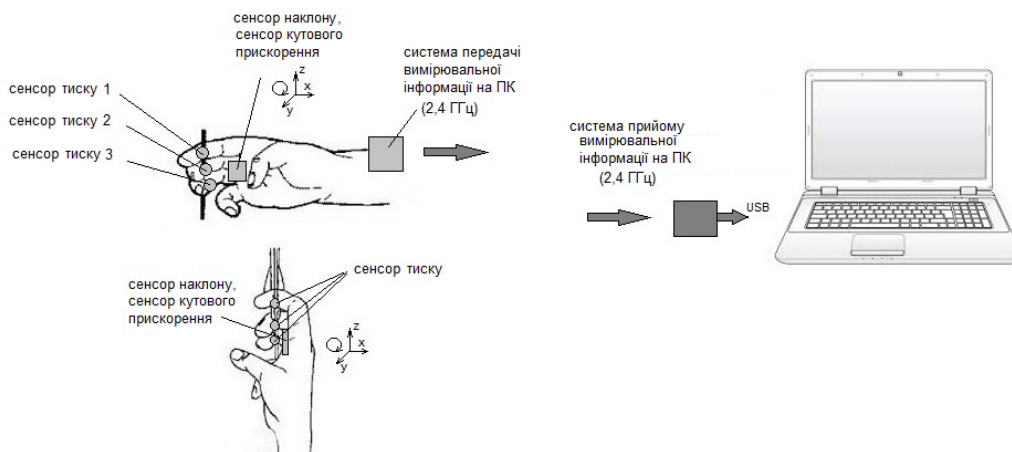


Рисунок 21 – Розміщення сенсорів на напальчику спортсмена

Розроблено принципові схеми, блок-схема, конструкція багатоканального радіовимірального приладу контролю фізичної підготовки спортсменів, який призначений для аналізу і визначення основних характеристик системи "лук-стрілок" в реальному масштабі часу (80 - 100 вимірювань за 1 сек.) по 9 паралельним каналам. На рис. 22 і рис. 23 представлено блок-схему і фотографію багатоканального радіовимірального приладу контролю фізичної підготовки спортсмена стрільця з лука.

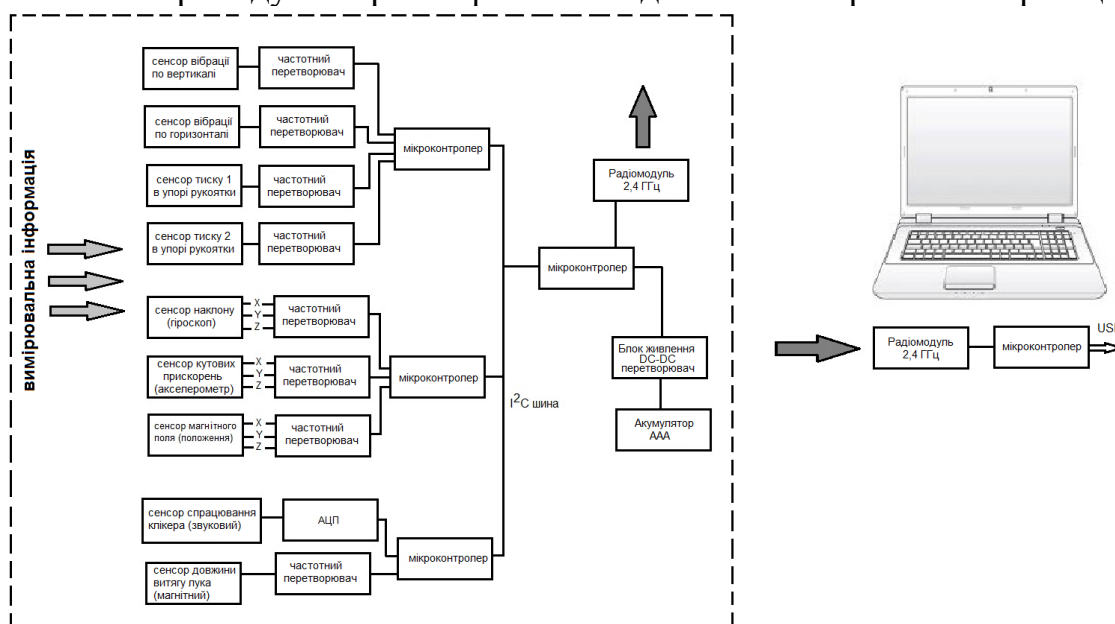


Рисунок 22 – Блок-схема багатоканального радіовимірального приладу контролю фізичної підготовки спортсмена стрільця з лука



Рисунок 23 – Фотографія багатоканального радіовимірального приладу контролю фізичної підготовки спортсмена стрільця з лука

За допомогою розробленого приладу можна вимірювати і контролювати 11 параметрів спортсмена при його стрільбі з лука. Створено програмне забезпечення роботи радіовимірювального приладу. Розроблені радіовимірювальні прилади дозволили підвищити визначення сили натягу плечей луку, розподіл навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу, які знаходяться в заданих межах $\pm 0,025\%$.

У роботі виділено основні похибки радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, встановлено значення максимальної сумарної похибки вимірювання тиску, яка складає $\pm 0,36\%$.

У **додатках** наведено додаткові результати розрахунків, експериментальні характеристики схем, фрагменти програмного забезпечення, таблиці, акти впровадження результатів роботи, список публікацій, відомості про апробацію.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення чутливості і точності вимірювання тиску шляхом розроблення методу і радіовимірювальних частотних параметричних перетворювачів тиску на основі тензореактивного ефекту в тензочутливих елементах.

Результатом виконаних досліджень є такі висновки:

1. Проведено аналіз методів і приладів вимірювання тисків, запропоновано їх класифікацію за ефектами перетворення, за типом фізичної системи, за механізмом дії. Виявлено, що існуючі сенсори тиску мають низьку точність і чутливість, низький рівень вихідного сигналу, паразитні впливи каналів вимірювання один на інший, тому вимагають додаткових підсилювальних пристроїв, аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці вихідних сигналів. Обґрунтовано вибір частотного методу вимірювання тиску на основі залежності реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором від дії тиску. Радіовимірювальні прилади, які побудовано на цьому методі, дозволяють усунути недоліки існуючих приладів тиску, тобто значно підвищити точність і чутливість, відмовитись від підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів.
2. Запропоновано метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах тиску з тензочутливими елементами, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочутливі елементи виступають і в ролі активних елементів радіовимірювальних частотних параметричних перетворювачів, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тисків.
3. Розроблено математичні моделі тензореактивного ефекту в тензочутливих напівпровідникових діодах, біполярних та польових транзисторах, що лягло в основу розрахунку повного опору тензочутливих елементів від тиску.
4. Створено математичні моделі радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором, що дало можливість отримати функції перетворення і рівняння чутливості.
5. Встановлено і експериментально підтверджено залежності вихідної частоти радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів від тиску, які відрізняються від існуючих тим, що тиск перетворюється у вихідну частоту, що дозволило створити радіовимірювальні прилади визначення м'язової пам'яті та монітори-

нгу фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука з підвищеною точністю і контролем сили натягу плечей луку, розподілу навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу.

6. Розроблено радіовимірювальні багатоканальні прилади моніторингу фізичної підготовки та визначення м'язової пам'яті спортсменів стрільців з лука на основі розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило підвищити визначення сили натягу плечей луку, розподіл навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу, які знаходяться в заданих межах $\pm 0,025\%$.

7. Побудовано радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з тензочутливими резисторами, тензочутливим ємнісним елементом, тензочутливим тунельно-резонансним діодом, тензочутливими резистивними мостами в діапазоні тисків від 10 кПа до 200 кПа з чутливістю від 0,35 кГц/кПа до 2,65 кГц/кПа. Досліджено характеристики радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з тензочутливими біполярними і двоколекторними транзисторами, тензочутливими двохстоковими польовими транзисторами з пасивними та активними індуктивними елементами коливального контуру перетворювачів з чутливістю від 0,65 кГц/кПа до 2,85 кГц/кПа в діапазоні тисків від 60 кПа до 120 кПа.

8. Розроблено принципіві електричні схеми, блок-схеми, конструкції радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та приладів моніторингу фізичного стану спортсменів стрільців з лука, а також частотних параметричних перетворювачів тиску, максимальна сумарна похибка вимірювання тиску яких складає $\pm 0,36\%$.

9. Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі "Matlab 7.1" для моделювання та розрахунків характеристик розроблених радіовимірювальних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску з врахуванням залежності параметрів елементів нелінійних еквівалентних схем від дії тиску.

10. Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень показав, що математичні моделі описують поведінку перетворювачів з похибкою $\pm 2,5\%$.

ОСНОВНІ РОБОТИ ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Alexander Osadchuk, Iaroslav Osadchuk, Andrzej Smolarz and Nazym Kussambayeva "Pressure transducer of the on the basis of reactive properties of transistor structure with negative resistance", in Proc. *SPIE* 9816, Optical Fibers and their Applications 2015, 98161C (December 18, 2015).

2. A.V. Osadchuk and I.A. Osadchuk "Frequency Transducer of the Pressure on the Basis of Reactive Properties of Transistor Structure with Negative Resistance", in 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, Russia, May 21–23, 2015.

3. Aleksandr V. Osadchuk, I. A. Osadchuk, Batyrbek Suleimenov, Tomasz Zyska, Abenov Arman, Akmaral Tleshova and Żaklin Grądz. "Frequency pressure transducer with a sensitivity of MEMS capacitor on the basis of transistor structure with negative resistance", in Proc. *SPIE* 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 1044559 (August 7, 2017).

4. A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I. A. Osadchuk, Piotr Kisafa, Tomasz Zyska, Azamat Annabaev and Kanat Mussabekov. "Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor" in PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Poland, R. 93 NR 3/2017. – P.113-116.

5. Osadchuk A.V., V.S.Osadchuk and I.A.Osadchuk. "The Generator of Superhigh Frequencies on the Basis Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors", in XIIIth International Conference TCSET'2016, "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science". Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016. –P.336-338.

6. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Теоретичні основи деформаційного ефекту в МДН-транзисторних структурах. Науковий вісник КУЕІТУ. Нові технології. – № 3-4 (41-42), 2013. – С. 64-72.

7. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Деформаційні ефекти у напівпровідникових структурах. Вісник Хмельницького національного університету. – №2(211), 2014. –С. 146-150.

8. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Частотний перетворювач тиску з активним індуктивним елементом на основі двостокового МДН- тензотранзистора. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –№6, 2014. – С. 144-147.

9. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Мікроелектронний перетворювач тиску з частотним виходом на основі тунельно-резонансного діода. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –№1, 2015. – С. 97-101.

10. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Микроэлектронный радиоизмерительный сенсор давления с частотным выходом. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – №1, 2015. – С. 48–53.

11. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Радиовимірювальний сенсор тиску з частотним виходом на основі двоколекторного тензотранзистора. Вісник вінницького політехнічного інституту. – №3(120), 2015. – С. 135–141.

12. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. Радиовимірювальний перетворювач тиску з чутливим MEMS- конденсатором. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –№2, 2016. –С.7-13.

13. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Фізичний механізм дії тиску на напівпровідники", in VIII mezinárodní vědecko - praktická conference «Vznik moderní vědecké - 2012». - Díl 18. Technické vědy. Praha, Czech Republic. –PP. 70-79.

14. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Мікроелектронні перетворювачі тиску", in VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka i inowacja - 2012» Volume 21. Techniczne nauki. Przemysł, Poland. – PP. 63-71.

15. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Радиовимірювальний перетворювач тиску з MEMS чутливим елементом" в матеріалах Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання", Івано-Франківськ – Яремче, 23-28 травня 2016 р. –С.7-9.

16. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Частотний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора" на III Всеукраїнській НПК "Інтелектуальні технології в системному програмуванні 2014", м. Хмельницький, 23-25 квітня 2014. – С. 176-182.

17. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Радиовимірювальний мікроелектронний перетворювач тиску на основі двостокового МДН- тензотранзистора" на XIII міжнародній науково-технічній конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах", ВОТТП-2014, 6-12 червня 2014. – С. 165-167.

18. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Радиоизмерительный сенсор давления с частотным выходом" на Міжнародній НТК "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" РТПСАС 2015. 16-22 березня 2015. м. Київ. НТУ України "КП". – С. 106-108.

19. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Радіовимірювальний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора" на п'ятій міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", м. Івано-Франківськ, 27-29 травня 2015. – С. 8-9.

20. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Радіовимірювальний перетворювач тиску на основі тензочутливих двостокових МДН-транзисторів" на VI Міжнародній НТК "Датчики, прилади та системи – 2017". ДПС-2017. 18-22 вересня 2017 р. Черкаси-Херсон. –С.70-72.

21. Осадчук А.В., Сидорук В.В., Крыночкин Р.В., Сидорук В.В., Осадчук Я.О. та Звягин А.С. "Измерительно-информационная система мониторинга физической подготовки и определения мышечной памяти спортсменов-стрелков из лука" in XII International scientific and practical conference, «Areas of scientific thought», January 1-7, 2016. Volume 18. Technical sciences. Sheffield, United Kingdom. – PP.15-19.

22. Осадчук А.В., Сидорук В.В., Осадчук Я.А. и Крыночкин Р.В. "Радиоизмерительный прибор мониторинга физической подготовки спортсменов в стрельбе из лука" в матеріалах Міжнародної науково-технічної конференції "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи ". 14-20 березня 2016 року. м. Київ, Україна. –С.97-99.

23. А.В. Осадчук, В.В. Сидорук, Я.О. Осадчук, Р.В. Крыночкин та А.С. Звягин Измерительная система определения мышечной памяти спортсменов-стрелков из лука. Научные труды SWorld. – Выпуск 46. Том 1. – Иваново: Научный мир, 2017 – С.38-45.

24. A. V. Osadchuk and I. A. Osadchuk Information Measuring System Monitoring Training Athletes Arrow Compound Bow. SWorld Journal. Technical sciences. Issue №11, Volume 10. 2016.

25. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. «Сенсор тиску з активним індуктивним елементом», Патент України №83354, Вересень 10.2013.

26. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. «Вимірювач тиску з активним індуктивним елементом», Патент України №83356, Вересень 10.2013.

27. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. «Мікроелектронний сенсор тиску», Патент України №87762, Лютий 25.2014.

28. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. «Мікроелектронний вимірювач тиску» Патент України №87763, Лютий 25.2014.

29. Осадчук О.В., Сидорук В.В., Звягин О.С. Крыночкин Р.В., Осадчук Я.О. та Сидорук В.В. «Багатоканальна вимірювальна система контролю фізичної підготовки спортсменів-стрілків з лука», Патент України №109031, Серпень 10.2016.

30. Осадчук О.В., Сидорук В.В., Звягин О.С., Крыночкин Р.В., Осадчук Я.О. та Сидорук В.В. «Радіовимірювальна інформаційна система моніторингу фізичної підготовки та визначення м'язової пам'яті спортсменів - стрілків з лука», Патент України № 112645, Грудень 26.2016.

31. Осадчук О.В., Осадчук В.С. та Осадчук Я.О. «Мікроелектронний перетворювач тиску», Патент України № 112804, Грудень 26.2016.

32. Осадчук О.В., Осадчук В.С. та Осадчук Я.О. «Мікроелектронний пристрій для вимірювання тиску», Патент України № 113378, січень 25.2017.

АНОТАЦІЯ

Осадчук Я. О. Радіовимірювальні прилади на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 «Радіовимірювальні прилади» (Технічні науки). – Вінницький національний технічний університет, Вінниця. 2018.

У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, які спрямовані на підвищення точності і чутливості вимірювання тиску шляхом розроблення нового методу та радіовимірювальних приладів. Запропоновано метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах з тензочутливими елементами, який відрізняється від існуючих використанням залежності повного опору тензочутливих елементів від тиску, що дозволило перетворити тиск у частоту і принципово підвищити чутливість і точність вимірювання тисків.

Вперше розроблено математичні моделі тензореактивного ефекту в тензочутливих напівпровідникових діодах, біполярних та польових транзисторах, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано залежності параметрів діодів, біполярних та польових транзисторів від тиску, що лягло в основу розрахунку повного опору тензочутливих елементів від тиску.

Створено математичні моделі радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, в яких на відміну від існуючих враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем приладів на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що дало можливість отримати функції перетворення і рівняння чутливості.

Розроблено радіовимірювальні багатоканальні прилади визначення м'язової пам'яті та фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука на основі розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило підвищити точність визначення сили натягу плечей лука, розподіл навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу плечей лука, які знаходяться в заданих межах $\pm 0,025\%$.

Розроблено радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі біполярно-польової і польової транзисторних структур з пасивними і індуктивними елементами, в яких тензочутливими елементами виступали біполярні і польові транзистори, діоди, резистивні та ємнісні елементи, при цьому чутливість перетворювачів складала 0,35 кГц/кПа - 2,85 кГц/кПа в діапазоні тисків від 10 кПа до 200 кПа.

Встановлено значення максимальної сумарної похибки вимірювання тиску розроблених приладів, яка складає $\pm 0,36\%$.

Ключові слова: радіовимірювальний прилад, тиск, тензореактивний ефект, автогенератор, частота.

АННОТАЦИЯ

Осадчук Я. А. Радиоизмерительные приборы на основе частотных параметрических микроэлектронных преобразователей давления. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 "Радиоизмерительные приборы" (Технические науки). – Винницкий национальный технический университет. Винница. 2018.

В диссертационной работе изложены результаты исследований, направленных на повышение чувствительности и точности измерений давления путем создания нового метода и радиоизмерительных приборов. Предложен метод измерения давлений на основе тензореактивного эффекта в радиоизмерительных частотных параметрических микроэлектронных преобразователях с тензочувствительными элементами, который отличается от существующих использованием зависимости полного сопротивления тензочувствительных элементов от давления, что позволило преобразовать давление в частоту и принципиально повысить чувствительность и точность измерения давлений.

Впервые разработаны математические модели тензореактивного эффекта в тензочувствительных полупроводниковых диодах, биполярных и полевых транзисторах, которые отличаются от существующих тем, что в них учтена зависимость параметров диодов, биполярных и полевых транзисторов от давления, что положено в основу расчета полного сопротивления тензочувствительных элементов от давления.

Созданы математические модели радиоизмерительных частотных параметрических микроэлектронных преобразователей давления, в которых в отличие от существующих учтено влияние давления на элементы нелинейных эквивалентных схем приборов на основе транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что позволило получить функции преобразования и уравнения чувствительности.

Разработаны радиоизмерительные многоканальные приборы определения мышечной памяти и физической подготовки спортсменов стрелков из лука, на основе разработанных частотных параметрических микроэлектронных преобразователей давления, что позволило повысить точность определения силы натяжения плечей лука, распределения нагрузки на пальцы спортсмена и количество проб силы натяжения плечей лука, которые лежат в заданных пределах $\pm 0,025\%$.

Разработаны радиоизмерительные частотные параметрические микроэлектронные преобразователи давления на основе биполярно-полевой и полевой транзисторных структур с пассивными и активными индуктивными элементами, в которых тензочувствительными элементами выступали биполярные и полевые транзисторы, диоды, резистивные и емкостные элементы, при этом чувствительность преобразователей составляла 0,35 кГц/кПа – 2,85 кГц/кПа в диапазоне давлений от 10 кПа до 200 кПа.

Определено значение максимальной суммарной ошибки измерения давления разработанных приборов, которое составляет $\pm 0,36\%$.

Ключевые слова: радиоизмерительный прибор, давление, тензореактивный эффект, автогенератор, частота.

ABSTRACT

Osadchuk I. A. Radiomeasuring devices based on frequency parametric microelectronic pressure transducers. - On the rights of the manuscript.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in specialty 05.11.08 "Radiomeasuring devices" (Technical sciences). – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018.

In the dissertation work results of the researches directed on increasing sensitivity and accuracy of measurements of pressure by creation of a new method and radiomeasur-

ing devices are stated. A method for measuring pressure on the basis of the tensoreactive effect in radiomeasuring frequency parametric microelectronic transducers with tensosensitive elements is proposed. It differs from existing ones by using the dependence of the impedance of the tensosensing elements on the pressure, which make it possible to convert the pressure into a frequency and, in principle, to increase sensitivity and accuracy of the pressure measurement.

For the first time mathematical models of the tensoreactive effect in tensosensitive semiconductor diodes, bipolar and field-effect transistors have been developed, which differ from existing ones in that the parameters of diodes, bipolar and field-effect transistors are taken into account, which is the basis for calculating the total resistance of tensosensitive elements from pressure.

Mathematical models of radiomeasuring frequency parametric microelectronic pressure transducers have been created, in which, unlike the existing ones, the influence of pressure on elements of nonlinear equivalent circuits of devices based on transistor structures with negative differential resistance has been taken into account, which allowed obtaining the transformation functions and the sensitivity equation.

The radiomeasuring multichannel instruments for determining muscular memory and physical training of archery riders were developed on the basis of the developed frequency parametric microelectronic pressure transducers, which made it possible to increase the accuracy of the determination of the leverage force of the shoulders, the distribution of the load on the fingers of the athlete. The number of tensile strengths of the shoulders set limits of $\pm 0.025\%$.

The radiomeasuring frequency parametric microelectronic pressure transducers based on bipolar field and field transistor structures with passive and active inductive elements were developed, in which bipolar and field transistors, diodes, resistive and capacitive elements were the tensosensitive elements, while the sensitivity of the converters was 0.35 kHz/kPa - 2.85 kHz/kPa in the pressure range from 10 kPa to 200 kPa.

The value of the maximum total pressure measurement error of the developed instruments was determined to be $\pm 0.36\%$.

Key words: radiomeasuring frequency parametric transducer, pressure, tensoreactive effect, autogenerator, frequency.