

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.2.08

## ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.11.08 – радіовимірювальні прилади  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Я. О. Осадчук

Науковий керівник:

Семенов Андрій Олександрович,  
кандидат технічних наук, професор

Вінниця – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Осадчук Я. О.* Радіовимірювальні прилади на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску. – Кваліфікаційна наукова праця 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 на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.

Розроблено радіовимірювальні прилади із врахуванням впливу похибок вимірювання тиску на точність приладів моніторингу фізичної підготовки спортсменів стрільців з луку. Запропоновано класифікацію приладів вимірювання тиску за принципом перетворення тиску в електричний сигнал, фізичними і схемотехнічними способами реалізації частотних пристроїв тиску та фізичним принципом роботи.

Виявлено, що тиск вимірюється на основі тензорезистивних, п'єзоелектричних, акустоелектронних приладів та приладів на основі розподілених RC - структур. Встановлено, що тензорезистивні прилади мають низькі вихідні сигнали, високу точність і чутливість, залежність до зміни температури, п'єзоелектричні прилади мають низькі вихідні напруги, низьку точність, недостатню стабільність роботи. Ємнісні прилади тиску хоча мають високу точність та чутливість, проте не придатні працювати при високих тисках, мають високу вартість. Індуктивні прилади тиску характеризуються значними вихідними сигналами, широким діапазоном вимірювання, проте температурно нестабільні, мають високу чутливість до ударів та вібрації. Прилади на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) мають низьку точність і чутливість, які можна конструктивно підвищити за рахунок введення двох діафрагм, проте в цьому випадку зростає складність конструкції, погіршення метрологічних

характеристик внаслідок неідентичних умов поширення ПАХ у рознесених мембранах, труднощі доступу до конструкції. Обґрунтовано вибір тензорезистивних первинних перетворювачів тиску, які завдяки тензорезистивному ефекту в напівпровідникових матеріалах характеризуються високими точністю, швидкодією, стабільністю в роботі. Шляхом аналізу ряду наукових робіт з'ясовано, що використання радіовимірювальних частотних параметричних приладів перетворення тиску у частоту на основі реактивних властивостей напівпровідникових приладів дозволяє підвищити чутливість перетворення і зменшити похибки вимірювання тиску. При цьому можливо відмовитись від використання аналого-цифрових перетворювачів і підсилювальних пристроїв при подальшій обробці інформаційних сигналів.

Вперше запропоновано метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту, суть якого полягає в залежності активної і реактивної складових повного вихідного опору від тиску в тензорезистивних первинних перетворювачах, який однозначно зв'язаний з частотою генерації радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.

Вперше розроблено математичні моделі тензореактивного ефекту в напівпровідникових тензочутливих первинних елементах, що дозволило отримати залежності активної і реактивної складових повного опору первинних перетворювачів від тиску.

Розроблено математичні моделі впливу тиску на параметри елементів нелінійних еквівалентних схем радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило отримати аналітичні вирази основних характеристик перетворювачів тиску. Отримані вирази можуть бути використані для інженерного розрахунку параметрів радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та моніторингу фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука. Для реалізації методу вимірювання тиску на основі радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску з тензочутливими елементами запропоновано використати конструкції

ємнісних тензочувливих систем, що дають можливість компенсувати нелінійний характер залежності вихідної частоти від дії тиску.

Обґрунтовано використання методу опосередкованого вимірювання частоти на виході частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах тиску з тензочувливими елементами – методу, який має меншу похибку квантування вимірювального інтервалу, ніж метод прямого вимірювання, і дозволяє вибрати оптимальне співвідношення між швидкодією та похибкою вимірювання.

В дисертаційній роботі отримано такі наукові результати:

1. *Вперше запропоновано метод* вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачах тиску з тензочувливими елементами, який відрізняється від існуючих використанням залежності повного опору тензочувливих елементів від тиску, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочувливі елементи виступають і в ролі активних елементів радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тисків.

2. *Вперше розроблено* математичні моделі тензореактивного ефекту в тензочувливих напівпровідникових діодах, біполярних та польових транзисторах, які відрізняється від існуючих тим, що в них враховано залежності параметрів діодів, біполярних та польових транзисторів від тиску, що лягло в основу розрахунку повного опору тензочувливих 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 стрільців з лука з підвищеною точністю і контролем сили натягу плечей лука, розподілу навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу.

У роботі сформульовано рекомендації щодо інженерного проектування радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску з тензочутливими елементами та радіовимірювальних приладів моніторингу фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука. Запропоновано алгоритм контролю фізичної підготовки спортсменів стрільців з лука, що дозволяє зробити висновок про відповідність їх фізичного стану до участі у змаганнях на рівні світових вимог.

Здійснено оцінювання статичних похибок радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску. Виділено основні похибки розроблених приладів.

Проведено експериментальні дослідження радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску та радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та моніторингу фізичної підготовки спортсменів, що підтверджують висунуті теоретичні положення і ефективність запропонованого методу.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

1. 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 лука, розподіл навантаження на пальці спортсмена та кількості спроб сили натягу, які лежать в заданих межах  $\pm 0,025\%$ .

2. Розроблено радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі тиску на основі біполярно-польової структури, в якій тензочутливим

елементом виступав двоколекторний біполярний транзистор. Чутливість перетворювача складала  $0,65 \text{ кГц/кПа} - 1,12 \text{ кГц/кПа}$  в діапазоні тисків від 60 кПа до 140 кПа.

3. 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  $0,35 \text{ кГц/кПа} - 2,65 \text{ кГц/кПа}$  в діапазоні тисків від 10 кПа до 200 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 перетворювача складала  $1,6 \text{ кГц/кПа} - 2,85 \text{ кГц/кПа}$ , 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 фізичного стану спортсменів стрільців з луку, а також радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.

6. Отримано аналітичні вирази для функцій перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску, які можуть бути використані для інженерного розрахунку характеристик приладів тиску.

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

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

Результати дисертаційної роботи впроваджено у Федерації стрільби з луку України у Національній збірній України при підготовці команди спортсменів до

виступу на Олімпійських іграх у 2016 році, а також у навчальний процес кафедри радіотехніки при вивченні курсів «Сенсори фізичних величин», «Генерування та формування сигналів» та «Радіовимірювальні перетворювачі інформації» Вінницького національного технічного університету.

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

### **ABSTRACT**

*Osadchuk I. A.* Radio-measuring devices based on frequency parametric microelectronic pressure transducers. - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in specialty 05.11.08 "Radio-measuring devices" (Technical science). – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2018.

In this work the results of studies that aim to improve the accuracy and sensitivity of measurement of pressure by developing a new method and radiomeasuring devices on the basis of the frequency parameter microelectronic transducers, pressure, have been obtained. The radiometric devices, taking into account the impact of errors in measuring the pressure on the accuracy of devices monitoring the physical preparation of athletes archery have been developed. Classification of instruments of measuring the pressure on the conversion of pressure into an electrical signal, physical and circuit solution of realization of frequency devices and physical principle of operation has been fulfilled.

It was found that pressure is measured on the basis of strain-resistive, piezoelectric, acousto-electronic devices and devices based on distributed RC structures. It is established that the strain gauge devices have low output signals, high accuracy and sensitivity, dependence on temperature changes; piezoelectric devices have low output voltages, low accuracy, insufficient stability of work. Capacitive pressure devices, although have high accuracy and sensitivity, but not suited to work at high pressures and have a high cost. Inductive pressure devices are characterized by significant output signals and a wide range of measurements, but they are temperature insecure, have high sensitivity to shock and vibration. Devices on surface acoustic waves (SAW)

have low accuracy and sensitivity, which can be constructively increased due to the introduction of two diaphragms, but in this case, the complexity of the structure, the deterioration of metrological characteristics due to the non-identical conditions of the propagation of SAW in the spaced membranes, the difficulties of access to the construction.

That is why the choice of tensor resistive primary pressure transducers, which due to the tensoresistive effect in semiconductor materials characterized by high accuracy, speed, stability in work, is substantiated. By analyzing a number of scientific papers, it was found that the use of radio frequency parametric instruments for converting pressure to frequency based on the reactive properties of semiconductor devices can increase the sensitivity of the transformation and reduce the error of measurement of pressure. It is possible to refuse the use of analog-to-digital converters and amplifiers in the further processing of information signals.

For the first time a method for measuring pressure based on the tensoreactive effect is proposed, the essence of which is the dependence of the active and reactive components of the total output impedance on pressure in the tensor resistive primary converters, which is uniquely linked to the frequency of generation of radio-frequency frequency parametric microelectronic pressure transducers.

For the first time mathematical models of the tensor-reactive effect in semiconductor strain-sensitive primary elements were developed, which allowed to obtain the dependence of the active and reactive components of the complete resistance of the primary converters on pressure.

The mathematical models of pressure influence on the parameters of elements of nonlinear equivalent circuits of radio frequency parametric microelectronic pressure transducers were developed, which allowed to obtain analytical expressions of the basic characteristics of pressure transducers. The obtained expressions can be used for the engineering calculation of parameters of radio measuring devices for monitoring the physical training of athletes of archery. For the implementation of the pressure measurement method on the basis of radio-frequency parametric microelectronic pressure transducers with strain-sensitive elements, it is proposed to use capacitive tenso-sensitive systems designs, which make it possible to compensate for the nonlinear nature of the dependence of the output frequency on the action of pressure.



The use of the method of indirect measurement of frequency at the output of frequency parametric microelectronic pressure transducers with tensosensing elements - a method which has a smaller error of quantization of the measuring interval than the direct measurement method - is justified, and allows to choose the optimum correlation between speed and measurement error.

In the dissertation work the following scientific results were obtained:

1. For the first time, the method of pressure measurement on the basis of the tensor-reactive effect in the radio-frequency parametric microelectronic pressure transducers with strain-sensitive elements is proposed, which differs from the existing use of the dependence of the full resistance of tensosensitive elements from the pressure, which made it possible to convert the pressure to frequency, with the tensosensitive elements acting as active elements of frequency parametric radio-measuring transducers, which gave a fundamental opportunity to increase accuracy and sensitivity pressure measurement.

2. For the first time mathematical models of the tensoreactive effect in tensosensitive semiconductor diodes, bipolar and field transistors that are different from the ones that take into account the dependences of electrical parameters of diodes, bipolar and field transistors on pressure, which formed the basis for calculating the complete resistance of strain-sensitive elements from pressure.

3. The mathematical models of radio frequency parametric microelectronic pressure transducers were developed, in which, unlike the existing ones, the influence of pressure on elements of nonlinear equivalent circuitry of devices on the basis of transistor structures with negative differential resistance was taken into account, which gave the opportunity to get the functions of transformation and sensitivity equation.

4. The dependence of the initial frequency of radio frequency parametrical microelectronic pressure transducers with stress-sensing elements on pressure differing from the existing ones by the fact that the pressure is converted into the initial frequency, which allowed the creation of radio-measuring devices for monitoring the physical training of athletes with increased accuracy and pressure control, was theoretically established and experimentally confirmed.

The paper formulates the recommendations for the engineering design of radio-frequency parametric microelectronic pressure transducers with tensosensitive ele-

ments and radiometric monitoring devices for the physical training of athletes of archery. An algorithm for controlling the physical training of athletes of archery is proposed, which allows us to conclude that their physical fitness to participate in competitions at the level of world requirements.

The estimation of static errors of radio-measuring frequency parametric microelectronic pressure transducers has been carried out. The basic errors of developed devices are highlighted.

Experimental studies of radio frequency parametric microelectronic pressure transducers and radiometric monitoring devices for physical training of athletes have been carried out, confirming the proposed theoretical positions and the effectiveness of the proposed method.

The practical value of the work is as follows:

1. Radiometric multi-channel monitoring devices for physical training and determination of muscle memory of bow thruster athletes have been developed on the basis of developed radiometric frequency parametric microelectronic pressure transducers, which allowed to increase the determination of the strength of the shoulder strain, the distribution of the load on the athlete's finger and the amount of tensile strength samples, which lie within the specified limits  $\pm 0,025\%$ .

2. Radiometric frequency parametrical microelectronic pressure transducers on the basis of bipolar-field structure were developed, in which a two-collector bipolar transistor acted as a strain-sensitive element. The transducer sensitivity was 0.65 kHz/kPa – 1.12 kHz/kPa in the pressure range from 60 kPa to 140 kPa.

3. Radiometric frequency parametric microelectronic pressure transducers based on the bipolar-field transistors structure with passive and active inductive elements in which the primary tensosensitive elements were diodes, resistive and capacitive elements were developed, while the sensitivity of the transducers was 0.35 kHz/kPa – 2.65 kHz/kPa in the pressure range from 10 kPa to 200 kPa.

4. Radiometric frequency parametric microelectronic pressure transducers were developed based on the field transistor structure with passive and active inductance, in which the tensosensitive element was made by a two-drain field transistor, the sensitivity of the converter was 1.6 kHz/kPa – 2.85 kHz/kPa, in the range of pressures from 60 kPa to 120 kPa.

5. Basic electrical circuits, block diagrams, designs of radio measuring instruments for determining muscle memory and devices for monitoring the physical condition of archery riders, as well as radio frequency measuring parametric microelectronic pressure transducers have been developed.

6. The analytical expressions for the transformation and sensitivity functions of radio-measuring frequency transducers, which can be used for engineering calculation of characteristics of pressure devices, were obtained.

7. A package of applied applications in the computing environment "Matlab 7.1" has been developed for modeling and calculating the characteristics of radio measuring instruments developed by the press.

8. The boundary total value of the calculated measurement error of the developed devices, which is  $\pm 0.36\%$ , and the sensitivity – (0.35 kHz/kPa – 2.85 kHz/kPa), was established.

The results of the dissertation work were introduced at the Ukrainian National Archery Federation in preparation for a team of athletes to perform at the Olympic Games in 2016, as well as in the educational process of the department of radio engineering in the study of courses "Sensors of physical quantities", "Generation and formation of signals" and "Radiomeasuring transducers of information" of Vinnytsia National Technical University.

Keywords: radiomeasuring device, pressure, tensoreactive effect, autogenerator, frequency.

### **Список публікацій за темою дисертації**

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати 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).

*Автором проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску.*

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 In-

ternational Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Omsk, Russia, May 21–23, 2015.

*Автором запропоновано схему частотного перетворювача тиску на основі двостокового тензотранзистора та отримано функцію перетворення та рівняння чутливості.*

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 MEM 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).

*Автором проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни ємності MEMS конденсатора та тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску.*

4. A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I. A. Osadchuk, Piotr Kisała, 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.

*Автором удосконалено математичну модель перетворювача тиску.*

5. Osadcuk 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.

*Автором запропоновано еквівалентну схему генератора.*

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.

*Автором проведено дослідження впливу тиску на параметри МДН-транзисторних структур.*

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

*Автором експериментально досліджено вплив деформації на електричні параметри напівпровідникових структур.*

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.

*Автором запропоновано схему активного індуктивного елемента і його включення у схему перетворювача тиску.*

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.

*Автором запропоновано еквівалентну схему перетворювача і розраховано залежність функції перетворення від тиску.*

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.

*Автором проведено теоретичні та експериментальні дослідження функції перетворення сенсора тиску з частотним виходом.*

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.

*Автором розроблено математичну модель сенсора тиску на основі двоколекторного тензотранзистора.*

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.

*Автором запропоновано еквівалентну схему перетворювача тиску і оптимальне місце включення MEMS-конденсатора у схему.*

13. Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Фізичний механізм дії тиску на напівпровідники", in VIII mezin árodn ívědecko - praktick áconference «Vznik modern í vědeck é- 2012». - D í 18. Technické vědy. Praha, Czech Republic. –PP. 70-79.

*Автором проведено дослідження впливу тиску на електричні параметри напівпровідників.*

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.

*Автором проведено огляд існуючих перетворювачів тиску.*

15. Osadchuk O.V. and Osadchuk Y.O. "Transducer of pressure with a frequency output" на III Міжнародній науково-практичній конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", 24–26 жовтня 2013. - м. Чернівці, 2013. – С. 122-123.

*Автором проведено експериментальні дослідження характеристик перетворювача тиску з частотним вихідним сигналом.*

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.

*Автором запропоновано еквівалентну схему перетворювача тиску.*

17. Осадчук В.С., Осадчук О.В. та Осадчук Я.О. "Радіовимірювальний 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.

*Автором запропоновано еквівалентну схему двостокового МДН-тензотранзистора.*

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 "КПІ". – С. 106-108.

*Автором проведено експериментальні дослідження характеристик сенсора тиску.*

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.

*Автором запропоновано математичну модель двоколекторного тензотранзистора.*

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 2017р. Черкаси-Херсон. –С.70-72.

*Автором отримано аналітичні вирази функції перетворення і чутливості перетворювача тиску на основі двостокових МДН-тензотранзисторів.*

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.

*Автором розроблено структурну схему вимірювально-інформаційної системи та проведені експериментальні дослідження.*

22. Осадчук А.В., Сидорук В.В., Крыночкин Р.В., Сидорук В.В., Осадчук Я.О. та Звягин А.С. "Многоканальная измерительная система контроля физической подготовки спортсменов-стрелков из лука" in XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016», 7-15 stycznia 2016. Przemysl, Poland, –PP. 49-54.

*Автором розроблено структурну схему багатоканальної системи та проведено експериментальні дослідження.*

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.

*Автором запропоновано використання MEMS- сенсорів тиску у вимірювальній системі та досліджено функції перетворення частотних перетворювачів тиску.*

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.

*Автором розроблено структурну схему вимірювальної системи для блочного лука та проведено експериментальні дослідження.*

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

*Автором запропоновано схему активного індуктивного елемента.*

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

*Автором запропоновано схему активного індуктивного елемента.*

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

*Автором запропоновано схему живлення двостокового тензочутливого МДН- транзистора.*

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

*Автором запропоновано схему з використанням двостокового тензочутливого МДН- транзистора.*

29. Осадчук О.В., Сидорук В.В., Звягін О.С. Криночкін 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.

*Автором запропоновано структурну схему багатоканальної вимірювальної системи.*

30. Осадчук О.В., Сидорук В.В., Звягін О.С., Криночкін 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.

*Автором запропоновано використання трьох частотних перетворювачів тиску та систему обробки інформації.*



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

*Автором запропоновано схему підключення двостокового тензочутливого транзистора.*

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

*Автором запропоновано схему підключення двостокового тензочутливого транзистора в загальну схему перетворювача тиску.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ТИСКУ.....	
1.1 Методика вимірювання тиску у текучих середовищах.....	32
1.2 Тензорезистивні параметричні перетворювачі тиску.....	34
1.3 Мікроелектронні параметричні перетворювачі тиску.....	36
1.4 Ємнісні параметричні перетворювачі тиску.....	41
1.5 Радіовимірювальний прилад тиску на поверхневих акустичних хвилях....	47
1.6 Параметричні перетворювачі тиску на основі біполярних транзисторів....	49
1.7 Радіовимірювальні частотні прилади тиску.....	53
1.8 Цифрові перетворювачі тиску.....	58
1.9 Класифікація радіовимірювальних частотних перетворювачів тиску та постановка задач досліджень.....	61
1.10 Висновки до розділу 1.....	65

РОЗДІЛ 2 РАДІОВІМІРЮВАЛЬНІ ЧАСТОТНІ ПАРАМЕТРИЧНІ  
МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ З ТЕНЗОЧУТЛИВИМИ  
ДІОДНИМИ, РЕЗИСТИВНИМИ ТА ЄМНІСНИМИ  
ЕЛЕМЕНТАМИ..... 66

2.1 Тензореактивний ефект у напівпровідникових діодах..... 66

2.2 Радіовимірювальний частотний параметричний мікроелектронний  
перетворювач тиску на основі тунельно-резонансного  
діода ..... 71

2.3 Радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі  
тиску на основі мостових MEMS тензочутливих схем.....  
78

2.4 Радіовимірювальний частотний параметричний мікроелектронний  
перетворювач тиску на основі тензочутливого  
резистора..... 87

2.5 Радіовимірювальні частотні параметричні мікроелектронні перетворювачі  
тиску з чутливим MEMS конденсатором ..... 90

2.6 Висновки до розділу 2..... 109

РОЗДІЛ 3 РАДІОВІМІРЮВАЛЬНІ ЧАСТОТНІ ПАРАМЕТРИЧНІ  
МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТИСКУ З ТЕНЗОЧУТЛИВИМИ  
БІПОЛЯРНИМИ ТА ПОЛЬОВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ ..... 111

3.1 Тензореактивний ефект в біполярних транзисторах..... 111

3.2 Тензореактивний ефект у польових транзисторах..... 120

3.3 Радіовимірювальний частотний параметричний мікроелектронний  
перетворювач тиску на основі біполярної транзисторної структури з активним  
індуктивним  
елементом ..... 132

3.4 Радіовимірювальний частотний параметричний мікроелектронний  
перетворювач тиску на основі двоколекторного  
тензотранзистора ..... 140

3.5	Радіовимірювальний частотний параметричний мікроелектронний перетворювач тиску на основі двостокового МДН тензотранзистора .....	144
3.6	Радіовимірювальний частотний параметричний мікроелектронний перетворювач тиску з активним індуктивним елементом на основі двостокового МДН тензотранзистора .....	148
3.7	Опис експериментальної установки.....	155
3.8	Висновки до розділу 3.....	157

#### РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

#### МОНІТОРИНГУ ФІЗИЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

	М'ЯЗОВОЇ ПАМ'ЯТІ СПОРТСМЕНІВ-СТРІЛЬЦІВ З ЛУКА.....	158
4.1	Комп'ютерні системи для радіовимірювання та радіоконтролю.....	158
4.2	Радіовимірювальний прилад визначення м'язової пам'яті спортсменів-стрільців з лука.....	160
4.3	Радіовимірювальний прилад моніторингу фізичної підготовки спортсменів-стрільців з лука.....	166
4.4	Оцінювання метрологічних параметрів радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.....	172
4.5	Висновки до розділу 4.....	187

	ВИСНОВКИ.....	188
--	---------------	-----

	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	191
--	---------------------------------	-----

	ДОДАТКИ .....	206
--	---------------	-----

	Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	207
--	--	-----

	Додаток Б. Фрагменти програм в обчислювальному середовищі “Matlab 7.1” для моделювання та розрахунків характеристик радіовимірювальних	
--	--	--

	20
частотних параметричних мікроелектронних приладів тиску.....	210
Додаток В. Схеми та експериментальні характеристики частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.....	212
Додаток Г. Залежності еквівалентної ємності радіовимірювальних приладів на основі частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.....	221
Додаток Д. Фрагменти програмного забезпечення для мікроконтролерів у складі радіовимірювальних приладів моніторингу фізичної підготовки та визначення м'язової пам'яті спортсменів-стрільців з лука.....	222
Додаток Ж. Фрагменти лістингів програм для розрахунку статичних метрологічних характеристик частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску.....	227
Додаток З. Основні показники технічного рівня перетворювачів тиску.....	247
Додаток Е. Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію матеріалів дисертації.....	248

## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми дослідження

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 приладів механічних величин з огляду їх подальшого розвитку в напрямках: малі малогабаритні 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 ринку сенсорів фізичних величин представлені прилади та засоби вимірювання та контролю тиску різних типів та конструкцій, проте важливу роль у цій галузі відіграють напівпровідникові перетворювачі, тому що вони мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації [1] – [6].

Серед зарубіжних фірм, що займаються розробкою та промисловим застосуванням засобів вимірювання та контролю тиску, слід відзначити «Motorola» (США), «Honeywell» (США), «Analog Devices» (США), «Interlink Electronics» (США), «NXP Semiconductors» (Нідерланди), «Infineon Technologies» (ФРН), «Siemens» (ФРН), «Bosh» (ФРН), «Alps Electric» (Японія), «Murata Electronics» (Японія), «Chery» (КНР), «Rosemount» (КНР), «Hope Microelectronics» (КНР), «Rossmann electronic GmbH» (ФРН), «Melexis» (Бельгія) та ін., а серед закордонних вчених Арутюнян В. М. [7], Аша Ж. [8], Бутурліна А.І [9], Віглеба Г. [10], Ваганова В.І. [11], Зейферта К. [12], Малова В.В. [13], Новицького П.В [14], Стафєєва В.І. [15], Шаумбург Г. [2] Ейдукаса Ю.Ю [16].

Одну з провідних позицій в науковому світі по розробці первинних перетворювачів займає Україна. Це, насамперед, стало можливим завдяки роботі відомих українських вчених Вікуліна І. М.[17], Готри З. Ю.[18], Кошового М. Д.[19], Костенка В. Л.[20], Кухарчука В.В [21], Манойлова В.П. [22] Луцика Я.Т. [23], Осадчука В.С. [24]–[27], Осадчука О.В. [28]–[32], Пістуна Е. П. [33], Поджаренко В.О. [34], Романова В.О. [35], Стадника Б.І. [36], Скрипника Ю.О [37], Шарاپова В.М. [38], Яненка О.П. [39].

Розроблення теорії та практичного застосування сенсорів в Україні займаються такі наукові центри як Інститут фізики напівпровідників НАН України (м. Київ), Інститут кібернетики НАН України (м. Київ), Національний технічний університет «Львівська політехніка», Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ), Національний технічний університет України «КПІ» імені І. Сікорського, Інститут метрології, Харківський національний технічний університет, Одеський національний університет імені І.І Мечникова, Науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування України (м. Київ), Державний науково-дослідний інститут індикаторних приладів Міністерства промислової політики України (м. Вінниця), Вінницький національний технічний університет.

Дослідження теоретичних засад реактивних властивостей і від'ємного опору у напівпровідникових приладах, що покладено в основу створення сенсорів фізичних величин, проводиться в науковій школі Вінницького національного технічного університету. Результати цієї роботи подано у монографіях проф. Осадчука В.С. [24] – [27], розвиток теорії від'ємного опору і оцінки ефективності пристроїв його використання розглянуто у монографіях проф. Філінюка М.А. [40] –[42], розроблення теорії мікроелектронних частотних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором подано у працях проф. Осадчука О.В. [28] –[30].

На теперішній час більшість сенсорів фізичних величин, 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, чутливість і низький вихідний сигнал, паразитній вплив вимірювальних каналів один на другий, значні масогабаритні показники, тощо. Проте характеристики

сенсорів визначають точність і надійність систем керування і регулювання, приладів контролю технологічних процесів, характеристик навколишнього середовища, безпеку роботи промислових установок і т.д. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальні габарити, вагу та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ, та мати можливість виготовлення за стандартною груповою інтегральною технологією.

Перспективним науковим напрямком, що дозволяє усунути недоліки аналогових сенсорів тиску, є створення радіовимірювальних частотних мікроелектронних приладів, 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 прилади в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та первинного перетворювача. Тому необхідність розроблення теоретичних засад до створення радіовимірювальних мікроелектронних приладів тиску на основі функціональної залежності реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором від тиску, а також розробки схем, конструкцій, експериментальне дослідження параметрів, оцінювання їх метрологічних характеристик, розроблення мікропроцесорної системи вимірювання тиску в промисловості 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 науково-дослідними роботами: 32-Д-348 «Розробка радіовимірювальних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур» (2013–2014 р.р.), № державної реєстрації 0113U002287С; 32-Д-354 «Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором» (2013–2014 р.р.), № державної реєстрації 0113U003133; 32-Д-373 «Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових

структур» (2015–2016 р.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 також згідно програм розвитку електронної промисловості України на 2015-2020 рр. "Електроніка України - 2015".

### **Мета і завдання дослідження**

*Метою роботи є* підвищення точності, чутливості та 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 луку, 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.

### **Методи дослідження**

Методи дослідження ґрунтуються на використанні:

- Диференціального та інтегрального числення при розробці математичних моделей тензочутливих діодних та транзисторних структур;
- Основних положень теорії функцій комплексної змінної для визначення функцій перетворення та рівняння чутливості радіовимірювальних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску;
- Теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення повного опору тензочутливих елементів, функцій перетворення та рівнянь чутливості радіовимірювальних частотних мікроелектронних перетворювачів тиску;
- Теорії імовірності для оцінювання похибок вимірювання.

### **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 відрізняється 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 стрільців з лука з підвищеними метрологічними показниками.

### **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

розроблених радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних перетворювачів тиску, що дозволило підвищити визначення силу натягу плечей лука, розподілу навантаження на пальцях спортсменів, кількість спроб сили натягу, які лежать 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 до 120 кПа.

5. Розроблено принципові електричні схеми, блок-схеми, конструкції радіовимірювальних приладів визначення м'язової пам'яті та приладів моніторингу фізичного стану спортсменів стрільців з луку, 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 значення граничної 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: [43] – проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску; [44] – розроблено схему частотного перетворювача тиску на основі двохстокового тензотранзистора та отримано функцію перетворення та рівняння чутливості; [45] – проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни ємності MEMS конденсатора та тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску; [46] – удосконалено математичну модель перетворювача тиску; [47] – запропонована еквівалентна схема генератора; [48] – проведено дослідження впливу тиску на параметри МДН-транзисторних структур; [49] – експериментально досліджено вплив деформації на електричні параметри напівпровідникових структур; [50] – запропоновано схему активного індуктивного елемента і його включення у схему перетворювача тиску; [51] – розроблено еквівалентну схему перетворювача і розраховано залежність функції перетворення від тиску; [52] – проведено теоретичні експериментальні дослідження функції перетворення сенсора тиску з частотним виходом; [53] – розроблено математичну модель сенсора тиску на основі двоколекторного тензотранзистора; [54] – розроблено еквівалентну схему перетворювача тиску і оптимальне місце включення MEMS-конденсатора у схему; [55] – проведено дослідження впливу тиску на електричні параметри напівпровідників; [56] – проведено огляд існуючих перетворювачів тиску; [57] –

проведено експериментальні дослідження характеристик перетворювача тиску з частотним вихідним сигналом; [58] – розроблено еквівалентну схему перетворювача тиску; [59] – запропоновано еквівалентну схему двостокового МДН-тензотранзистора; [60] – проведено експериментальні дослідження характеристик сенсора тиску; [61] – розроблено математичну модель двоколекторного тензотранзистора; [62] – отримано аналітичні вирази функції перетворення і чутливості перетворювача тиску на основі двостокових МДН-тензотранзисторів; [63] – розроблено структурну схему вимірювально-інформаційної системи та проведені експериментальні дослідження; [64] – розроблено структурну схему багатоканальної системи та проведені експериментальні дослідження; [65] – запропоновано використання MEMS сенсорів тиску у вимірювальній системі та досліджено функції перетворення частотних перетворювачів тиску; [66] – розроблено структурну схему вимірювальної системи для блочного лука та проведені експериментальні дослідження; [67], [68] – запропоновано схему активного індуктивного елемента; [69] – запропоновано схему живлення двостокового тензочутливого МДН- транзистора; [70] – запропоновано схему з використання двохстокового тензочутливого МДН- транзистора; [71] – запропоновано структурну схему багатоканальної вимірювальної системи; [72] – запропоновано використання трьох частотних перетворювачів тиску та систему обробки інформації; [73] – запропоновано схему підключення двостокового тензочутливого транзистора; [74] – 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:

1. VIII Mezinárodní vědecko - praktická konference Vznik moderní vědecké - 2012», 2012. Praha (Чехія).
2. VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka i inowacja - 2012», 2012. Przemyśl (Польща).

3. III Міжнародна науково-практична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки", 2013. м. Чернівці (Україна).
4. III Всеукраїнської науково-практична конференція "Інтелектуальні технології в системному програмуванні 2014", 2014. м. Хмельницький (Україна).
5. XIII Міжнародна науково-технічна конференція "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах", ВОТТП-2014, м. Одеса. (Україна).
6. Міжнародні НТК "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" РТПСАС 2015, 2016, 2017 р.р. м. Київ. (Україна).
7. П'ята міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія", м. Івано-Франківськ, 2015. (Україна).
8. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). Proceedings. – Omsk. Russia
9. XII International scientific and practical conference, «Areas of scientific thought», 2016. Sheffield, United Kingdom.
10. XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016», 2016. Przemysl. (Польща).
11. XIIIth International Conference TCSET'2016. " Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science", 2016. Lviv-Slavsko, Ukraine.
12. Vth International Scientific-Practical Conference "Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Infocommunication Systems" PREDT-2016. 2016, Chernivtsi, Ukraine.
13. VI Міжнародної НТК "Датчики, прилади та системи – 2017". ДПС-2017. 2017. Черкаси-Херсон (Україна).
14. VI Міжнародної НТК "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (СПРТП-2017). 2017. Вінниця (Україна).

### **Публікації**

Результати дисертації опубліковано у 32 наукових працях. Серед яких 5 статей у науково метричній базі Scopus, 7 статтях у фахових виданнях зі списку ВАК 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 і 4 розділів, списку використаних джерел і 8 додатків. Загальний обсяг дисертації 252 сторінок, 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.

Автор вдячний д.т.н., професору Осадчуку О. В. за консультації під час виконання дисертаційної роботи.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

- [1] Р. Г. Джексон, *«Новейшие датчики»*, Москва: Техносфера, 2007.
- [2] Н. Schaumburg, *«Sensoren»*, Stuttgart.: Teubner, 1992.
- [3] З. Ю. Готра, *«Микроэлектронні сенсори фізичних величин»*. В 3 томах, Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.2.
- [4] В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, *«Датчики: Справочное пособие»*, Москва: Техносфера, 2012.
- [5] М. В. Богущ, *«Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей»*, Москва: Техносфера, 2014.
- [6] Дж. Фрайден, *«Современные датчики. Справочник»*, Москва: Техносфера, 2005.
- [7] В. М. Арутюнян, *«Микроэлектронные технологии – магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров»*, Микроэлектроника, №4, 1991, С. 337-355.
- [8] Ж. Аш, *«Датчики измерительных систем. В 2 томах»* Том 1, Москва: Мир, 1992.
- [9] А. И Бутурлин, Г. А Габузян, Н. А Голованов, *«Полупроводниковые датчики на основе металлооксидных полупроводников»*, Зарубежная электроника, 1983.
- [10] Г. Виглеб, *«Датчики»*, Москва: Мир, 1989.
- [11] В. И. Ваганов, *«Интегральные тензопреобразователи»*, М.: Энергоатомиздат, 1983.
- [12] К. Зейферт, *«Измерительные преобразователи механических величин для систем автоматизации»*, Экспресс-информация: Контрольно-измерительная техника. Москва: ВИНТИ. – 1990. - №39. - С. 1 - 10.
- [13] В. В. Малов, *«Пьезорезонансные датчики»*, М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [14] П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников, *«Цифровые приборы с частотными датчиками»*, Ленинград: Энергия, 1970.
- [15] И. М. Викулин и В. И. Стафеев, *«Полупроводниковые датчики»*, Москва, СССР: Советское радио, 1975.
- [16] А. Н Литовский, Д. Ю. Эйдукас и Б. В. Орлов, *«Измерение параметров цифровых интегральных микросхем»*, Москва: Радио и связь, 1982.



- [17] И. М. Викулин, «Физика полупроводниковых приборов», М. : Радио и связь, 1990.
- [18] З. Ю. Готра, «Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник», Львів : Ліга-Прес. – Т. 1. – 2002.
- [19] М. Д. Кошовий, «Пристрої та системи для вимірювання тиску», *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2005. – № 3.– С. 157–158.
- [20] В. Л. Костенко та Р. В. Нягу «Исследование твердотельных структур для датчиков специализированных информационно-измерительных систем», *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. – 2007. – Спецвипуск. – С.185–187.
- [21] В. В. Кухарчук «Елементи контролю динамічних параметрів електронних машин», Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998.
- [22] В. Ф. Манойлов та Т. Н. Никитчук, «Не инвазивный метод определения вязкостных свойств крови по параметрам пульсовой волны» *СВЧ техника и телекоммуникационные Б. І. технологии. 15-я международная Крымская конференция*. – Севастополь, 12–16 сентября 2005 г. – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 902–903.
- [23] А. Т. Луцик, Л. К. Буняк, Ю. К. Рудавський та Б. І. Стадник, «Енциклопедія термометрії», Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2003.
- [24] В. С. Осадчук «Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах», Киев: Вища школа, 1987.
- [25] В. С. Осадчук та О. В. Осадчук «Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем», Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999.
- [26] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький, «Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі», Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2001.
- [27] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, «Сенсори вологості», Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003.
- [28] А. В. Осадчук, «Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением», Винница: Континент, 1998.

- [29] О. В. Осадчук, *«Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором»*, Вінниця: УНІВЕРСУМ – ВІННИЦЯ, 2000.
- [30] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль *«Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором»*, Вінниця: ВНТУ, 2011.
- [31] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов *«Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором»*, Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2009.
- [32] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук *«Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом»*, Вінниця: ВНТУ, 2013.
- [33] Е. П. Пістун, Л. В. Лесовой *«Нормування витрат змінного перепаду тиску»*, Львів: Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв, 2006.
- [34] В.О. Поджаренко, В.В. Кухарчук та В.Ю. Кучерук *«Оцінка статистичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань»*, *Вісник державного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування.* – 2001. – № 420. – С. 37 – 47.
- [35] Г.Г. Бабичев, С.И. Козловский та В.А. Романов *«Вертикальний двухколлекторный транзистор с ускоряющими электронными полями в базе и эмиттере»*, *Физика и техника полупроводников.* – 1999. –Т.33, №3.
- [36] А. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник *«Вимірювання температури: теорія та практика»*, Львів: Бескід БІТ, 2006.
- [37] Ю.А. Скрипник, Д.Б. Головка, К.Л. Шевченко *«Частотно-дисперсійні аналізатори складу та властивостей матеріалів та речовин»* Київ: МП ЛЕСЯ, 2002.
- [38] В.М. Шарапов, А.Н. Гурский, Н.Ю. Плосконос *«Трехкоординатный пьезоэлектрический акселерометр»*, *Вісник Черкаського державного технологічного університету.* – 2007. – Спецвипуск. – С. 258 – 260.
- [39] Ю. О. Скрипник, В. Ф. Манойлов, О. П. Яненко *«Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону»*, Житомир : ЖІТІ, 2001.
- [40] М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв, *«Аналіз впливу зворотнього зв'язку на параметри негatronу на польовому транзисторі»*, *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2000. – № 6. – С. 94 – 97.

- [41] Н. А. Филинюк, «Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 1999. – № 3. – С.38–43.
- [42] М.А. Філінюк, О.О. Лазарєв, «Дослідження енергетичних властивостей нелінійної індуктивності», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 1999. – № 2. – С.44–46.
- [43] Alexander Osadcuk, Iaroslav Osadchuk, Andrzej Smolarz, Nazym Kussambayeva «Pressure transducer of the on the basis of reactive properties of transistor structure with negative resistance», *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications 2015, 98161C* (December 18, 2015).
- [44] A.V. Osadchyk, I.A. Osadchyk “Frequency Transducer of the Pressure on the Basis of Reactive Properties of Transistor Structure with Negative Resistance” *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Proceedings. – Omsk: Siberian Federal University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.
- [45] Aleksandr V. Osadchuk, I. A. Osadchuk, Batyrbek Suleimenov, Tomasz Zyska, Abenov Arman, Akmaral Tleshova, Żaklin Grądz “Frequency pressure transducer with a sensitivity of MEM capacitor on the basis of transistor structure with negative resistance” *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 1044559* (August 7, 2017)
- [46] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I. A. Osadchuk, Piotr Kisała, Tomasz Zyska, Azamat Annabaev, Kanat Mussabekov, “Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor”, *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Poland, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 3/2017*. –P.113-116.
- [47] A.V. Osadchuk, V.S.Osadchuk, I.A.Osadchuk “The Generator of Superhigh Frequencies on the Basis Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors” *Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET’2016. " Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science"*. Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. –P.336-338.
- [48] Осадчук О.В., Осадчук Я.О. «Теоретичні основи деформаційного ефекту в МДН-транзисторних структурах», *Науковий вісник КВЕІТУ. Нові технології*. – № 3-4 (41-42) – 2013. – С. 64-72.

- [49] Осадчук О.В., Осадчук Я.О. «Деформаційні ефекти у напівпровідникових структурах», *Вісник Хмельницького національного університету*. –2014. – №2 (211). –С. 146-150.
- [50] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Частотний перетворювач тиску з активним індуктивним елементом на основі двостокового МДН тензотранзистора», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. –№6, 2014. – С. 144-147.
- [51] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Мікроелектронний перетворювач тиску з частотним виходом на основі тунельно-резонансного діода», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – №1, 2015. – С. 97-101.
- [52] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Микроэлектронный радиоизмерительный сенсор давления с частотным выходом», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2015. – №1.– С. 48–53.
- [53] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Радіовимірювальний сенсор тиску з частотним виходом на основі двоколекторного тензотранзистора», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2015. – №3(120). – С. 135–141.
- [54] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук та Я.О. Осадчук, «Радіовимірювальний перетворювач тиску з чутливим MEMS конденсатором». *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. –№2, 2016. –С.7-13.
- [55] О.В. Осадчук та Я.О. Осадчук, «Фізичний механізм дії тиску на напівпровідники» *Materiály VIII mezinárodní vědecko - praktická conference Vznik moderní vědecké - 2012* » - D I 18. *Technické vědy. Moderní informační technologie*: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o. – 70-79 stran.
- [56] О.В. Осадчук та Я.О. Осадчук, «Мікроелектронні перетворювачі тиску», *Materiały VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka i inowacja - 2012» Volume 21*. *Techniczne nauki.: Przemysł. Nauka i studia*. – 63-71 str.
- [57] Osadchuk O.V., Osadchuk Y.O. «TRANSDUCER OF PRESSURE WITH A FREQUENCY OUTPUT» *Збірник наукових праць III Міжнародна науково-практична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки"*, 24–26 жовтня 2013 р. - м. Чернівці, 2013. – С. 122-123.

- [58] О.В. Осадчук та Я.О. Осадчук, «Частотний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора» *Збірник наукових праць III Всеукраїнської НПК "Інтелектуальні технології в системному програмуванні 2014"*, м. Хмельницький, 23-25 квітня 2014 р. – С. 176-182.
- [59] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Радіовимірювальний мікроелектронний перетворювач тиску на основі двостокового МДН тензотранзистора», *Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах"*, ВОТТП-2014, 6-12 червня. – С. 165-167.
- [60] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Радиоизмерительный сенсор давления с частотным выходом», *Міжнародна НТК "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" РТПСАС 2015*. 16-22 березня 2015. м. Київ. НТУ України "КП". – С. 106-108.
- [61] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук О.В. та Я.О. Осадчук, «Радіовимірювальний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора», *Матеріали статей п'ятої міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та компютерна інженерія"*, м. Івано-Франківськ, 27-29 травня 2015. – С. 8-9.
- [62] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук та Я.О. Осадчук, «Радіовимірювальний перетворювач тиску на основі тензочутливих двостокових МДН-транзисторів», *Матеріали VI Міжнародної НТК "Датчики, прилади та системи – 2017"*. ДПС-2017. 18-22 вересня 2017 р. Черкаси-Херсон. –С.70-72.
- [63] А.В. Осадчук, В.В. Сидорук, Р.В. Крыночкин, В.В. Сидорук, Я.О.Осадчук та А.С. Звягин, «Измерительно-информационная система мониторинга физической подготовки и определения мышечной памяти спортсменов-стрелков из лука», *Materials of the XII International scientific and practical conference, «Areas of scientific thought», December 30, 2015 - January 7, 2016*. Volume 18. Technical sciences. Construction and architecture. Agriculture. Sheffield, United Kingdom. –Science and education LTD. – P.15-19.
- [64] А.В. Осадчук, В.В. Сидорук, Р.В. Крыночкин, В.В. Сидорук, Я.О.Осадчук та А.С. Звягин, «Многоканальная измерительная система контроля физической подготовки спортсменов-стрелков из лука», *Materiały XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016»*, 7-15 stycznia 2016. Przemysl, Nauka i studia, 2016. –С. 49-54.

- [65] А.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, Р.В. Криночкин, 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.
- [66] А. V. Osadchuk, I. A. Osadchuk, «Information Measuring System Monitoring Training Athletes Arrow Compound Bow», *SWorld Journal. Technical sciences. Issue №11, Volume 10*. 2016.
- [67] Патент на корисну модель №83354 України, МПК H01R 19/00. Сенсор тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. // Заявка № u201300303; Заяв. 09.01.2013; Опубл.10.09.13 Бюл. 17.
- [68] Патент на корисну модель №83356 України, МПК G01R 31/315. Вимірювач тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. // Заявка № u201300303; Заяв. 09.01.2013; Опубл.10.09.13 Бюл. 17.
- [69] Патент на корисну модель №87762 України, МПК H01R 19/00. Мікроелектронний сенсор тиску / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. // Заявка на винахід №u201214140 від 11.12.12 Пр.26.03.13. Опубл.25.02.14 Бюл. 4.
- [70] Патент на корисну модель №87763 України, МПК H01R 19/00. Мікроелектронний вимірювач тиску / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. // Заявка на винахід №u201214141 від 11.12.12 Пр. 26.03.13. Опубл.25.02.14 Бюл. 4.
- [71] Патент на корисну модель №109031 України, МПК F41B 5/00. Багатоканальна вимірювальна система контролю фізичної підготовки спортсменів-стрілків з лука. / Осадчук О.В., Сидорук В.В., Звягин О.С. Криночкин Р.В., Осадчук Я.О., Сидорук В.В. Заявка на винахід №u201601128 від 10.02.16. Заяв. 10.02.16; Пр. 10.08.16. Опубл.10.08.16 Бюл.15.
- [72] Патент на корисну модель № 112645 України, МПК F41B 5/00. Радіовимірювальна інформаційна система моніторингу фізичної підготовки та визначення м'язової пам'яті спортсменів - стрілків з лука / Осадчук О.В., Сидорук В.В., Звягин О.С., Криночкин Р.В., Осадчук Я.О., Сидорук В.В./Заявка на винахід №u201606342 від 10.06.16. Заяв. 10.06.16; Пр. 26.12.16. Опубл. 26.12.16. Бюл. №24.

- [73] Патент на корисну модель № 112804 України, МПК H04R 19/04. Мікроелектронний перетворювач тиску / Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. // Заявка на винахід № u201607617 від 11.07.2016. Заяв. 11.07.2016; Пр.26.12.2016. Опубл. 26.12.2016. Бюл.24.
- [74] Патент на корисну модель № 113378 України, МПК H04R 19/04. Мікроелектронний пристрій для вимірювання тиску / Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. // Заявка на винахід № u201607619 від 11.07.2016. Заяв. 11.07.2016; Пр.26.12.2016. Опубл. 25.01.2017. Бюл.2.
- [75] Датчики фирмы MOTOROLA. Обзор продукции фирмы MOTOROLA. –М.: ОДЭКА, 1998.
- [76] <https://www.engineersgarage.com/articles/pressure-sensors-types-working?page=1>
- [77] Како Н., Яманэ Я. «Датчики и микро-ЭВМ»: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- [78] В.Н. Седалищев, «Методы и средства измерений неэлектрических величин. Учебное пособие», Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008.
- [79] В.В. Денисенко, «Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием», М.: Горячая линия–Телеком, 2014.
- [80] С. Сысоева, «Технология PICOSTRAIN компании АСАМ. По материалам официального дистрибьютора в России - компании "Галант Электроникс" // Компоненты и технологии». №11, 2013г. <http://www.galant-e.ru>, <http://www.acam-e.ru>
- [81] В.А. Мехеда «Тензометрический метод измерения деформаций», Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011.
- [82] Voronin V., Maryamova I., Zaganyach Y. et al. “Silicon whiskers for mechanical sensors. Sensors and Actuators”, 1992. Vol. A 30. № 1-2. P. 27-33.
- [83] Патент РФ 2367062. Полупроводниковый резистор / Лобцов В.А., Щепихин А.И. Публикация патента: 10.09.2009.
- [84] Патент РФ 2463686. Наклеиваемый полупроводниковый тензорезистор / Володин Николай Михайлович (RU), Каминский Владимир Васильевич (RU), Мишин Юрий Николаевич (RU), Павлинова Елена Евгеньевна (RU). Публикация патента: 10.10.2012
- [85] Патент №5405786 США, МКИ H01 L021/04. Stress sensitive p-n junction devices formed from porous silicon and methods for producing the same: Патент

- №5405786 США, МКИ H01 L021/04 / Kurtz, Anthony D. (США). -№ 237011; Заявлено 29.04.94; Оpubл. 11.04.95. – 6 с.
- [86] Schubert D., Schwabe F., Uhlig T. “*Drucksensor mit piezoresistiven Widerstanden aus polykristallinem Silizium*”, Berlin 31. –1988.
- [87] Пат. №11226 С1 України, МКИ G 01 L 21/12. Датчик тиску / С.С. Варшава, В.О. Воронін, А.С. Островська, К.С. Щербай. -№94321814; Заявлено 15.10.90; Оpubл. 25.12.96. Бюл. №4. –3 с.
- [88] Патент України № 96250. Датчик тиску для середовищ з нестационарними температурами / Тихан Мирослав Олексійович. а201101318; Заявлено 07.02.2011. Опубліковано 10.10.2011, Бюл.№ 19
- [89] Патент РФ 2464538. Датчик давления / Полуниин Владимир Святославович (RU), Шараева Вера Петровна (RU), Вологина Валентина Николаевна (RU), Купоросова Наталья Ивановна (RU), Моисеева Светлана Борисовна (RU), публикация патента: 20.10.2012
- [90] Shwetha Meti et.al. MEMS Piezoresistive Pressure Sensor: A Survey Int. Journal of Engineering Research and Applications ISSN: 2248-9622, Vol. 6, Issue 4, (Part - 1) April 2016, pp.23-31
- [91] Датчик давления: PCT (WO). МКИ G01 L 9/08 / Seiko Epson Corporation, JP (Япония). Заявлено 06.08.91; Оpubл. 20.02.92. №5 (РЖ ИСМ 82-09-93)
- [92] Патент РФ 2147119. Датчик давления. Неаполитанский А.С., Хромов Б.В., Григорян Э.А. публикация патента: 27.03.2000
- [93] Патент РФ 2251087. Емкостной датчик давления. Величко А.А. (RU), Илюшин В.А. (RU), Филимонова Н.И. (RU). публикация патента: 27.04.2005
- [94] P. Eswaran and S. Malarvizhi. “Design Analysis of MEMS Capacitive Differential Pressure Sensor for Aircraft Altimeter”, *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, Vol. 2, No. 1, January 2012. –P.14-20
- [95] Giulio Fragiaco, Kasper Reck, Lasse Lorenzen and Erik V. “Thomsen. Novel Designs for Application Specific MEMS Pressure Sensors”, *Sensors 2010*, 10, – P.9541-9563; doi:10.3390/s101109541
- [96] Ali E. Kubba1, Ahmed Hasson1, Ammar I. Kubba2, and Gregory Hall1. “A micro-capacitive pressure sensor design and modeling”, *J. Sens. Sens. Syst.*, 5, 95–112, 2016. –P.95-112



- [97] Патент РФ 2526788. Высокотемпературный полупроводниковый преобразователь давления / Волков Вадим Сергеевич (RU), Баринов Илья Николаевич (RU). Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт физических измерений" (RU). Публикация патента: 27.08.2014
- [98] Патент РФ 2516375 Датчик давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы для прецизионных измерений/ Белозубов Е. М., Васильев В.А., Хованов Д.М., Чернов П.С. Публикация патента: 20.05.2014.
- [99] Патент РФ № 2398195. Способ изготовления нано- и микроэлектромеханической системы датчика давления и датчик давления на ее основе / Е.М.Белозубов, В.А.Васильев, П.С.Чернов. Бюл. № 24 от 27.08.10.
- [100] Патент РФ № 2345341. Датчик давления / Е.М.Белозубов, Н.Е.Белозубова. Бюл. № 3 от 27.01.09.
- [101] Патент на корисну модель України 77113. Сенсор на поверхневих акустичних хвилях для вимірювання тиску. Черненко Денис Віталійович (UA), Жовнір Микола Федорович (UA). Номер заявки: u 2012 09622 Від 08.08.2012. Пріоритет 25.01.2013, Бюл.№ 2
- [102] Патент України № 53153 «Датчик миттєвих значень швидкозмінного тиску» Крюков Олександр Михайлович, Александров Олександр Анатолійович від 27.09.2010.
- [103] О. М. Крюков, О. А. Александров. «Розробка та математичне моделювання засобу вимірювання імпульсного тиску в каналах стволів стрілецької зброї», *Електротехнічні та комп'ютерні системи № 06(82)*, 2012. –С. 55 – 61.
- [104] Lung-Tai Chen, Jin-Sheng Chang, Chung-Yi Hsu, and Wood-Hi Cheng. “Fabrication and Performance of MEMS-Based Pressure Sensor Packages Using Patterned Ultra-Thick Photoresists”, *Sensors 2009*, 9, –P. 6200-6218; doi:10.3390/s90806200
- [105] В.И. Ваганов, П.П. Поливанов, «Интегральный транзисторный преобразователь давления», *Электронная техника. Серия 11*. Вып.4. – С.89-92.
- [106] Г.Г. Бабичев, В.И. Гузь, И.П. Жадько, С.И.Козловский, В.А. Романов, «Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе», *Физика и техника полупроводников*. –1992. –Т.26. Вып.7. – С.1244-1250.

- [107] В.И. Гузь, И.П. Жадько, С.И. Козловский, В.А. Романов, «Перераспределение электрического потенциала в искусственно анизотропной полупроводниковой пластине с кольцевыми электродами», *Физика и техника полупроводников*. –1990. –Т.24, №3. –С.409-412.
- [108] Патент на корисну модель України 99093. ДАТЧИК ТИСКУ НА ОСНОВІ РЕЛАКСАЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА / Смирний Михайло Федорович (UA). )  
Номер заявки: а 2015 00761 Від 30.01.2015. Пріоритет 25.05.2015, Бюл.№ 10.
- [109] Тензочувствительный интегральный преобразователь: А.с. 1393265 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/84. / Беклемишев В.В., Бритвин С.О., Ваганов В.И. (СССР). №4030218/31-25; Заявлено 07.01.86; Опубл. 1988. – 3 с.
- [110] Патент РФ 2502970. Преобразователь давления / Куролес Владимир Кириллович (RU). публикация патента: 27.12.2013
- [111] Патент РФ 2398680. Система контроля состояния шин / Жеджианг Джили холдинг групп КО., ЛТД. (CN) . Публикация патента: 10.09.2010
- [112] Патент РФ 2189910. Устройство для автоматического контроля давления воздуха в шинах колес сельскохозяйственного трактора // Полежаев А.А., Викторов А.И., Загинайлов В.И., Судник Ю.А., Борулько В.Г., Забалуев И.А. Публикация патента: 27.09.2002
- [113] Патент WO 2013157979 A1. Система дистанционного измерения и контроля физических величин и способ дистанционного измерения и контроля физических величин / Andrey Alekseevich TERENCEV Номер заявки PCT/RU2012/000305 от 19 апр. 2012. Дата публикации 24 окт. 2013.
- [114] Li Qin, Dandan Shen, Tanyong Wei, Qiulin Tan, Tao Luo, Zhaoying Zhou and Jijun Xiong. “A Wireless Passive LC Resonant Sensor Based on LTCC under High-Temperature/Pressure Environments”, *Sensors* 2015, 15(7), 16729-16739; doi:10.3390/s150716729
- [115] Патент РФ 2523754 Датчик давления. Коноводов Юрий Анатольевич (RU), Лурье Геннадий Ирзайлевич (RU), Митюнин Александр Владимирович (RU) Федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова" (ФГУП "ВНИИА") (RU). публикация патента: 20.07.2014.
- [116] Патент на корисну модель України 91062. Сенсор тиску та температури / Дружинін Анатолій Олександрович (UA), Кутраков Олексій Петрович (UA),

- Вуйцик Андрій Михайлович (UA), Ховерко Юрій Миколайович (UA) Заявка  
и 2013 13685 від 25.11.2013. Пріоритет 25.06.2014 Бюл.12
- [117] Патент РФ 2515079. Способ измерения давления и интеллектуальный датчик  
давления на его основе/ Белозубов Евгений Михайлович (RU), Васильев  
Валерий Анатольевич (RU), Чернов Павел Сергеевич (RU). Публикация  
патента: 10.05.2014
- [118] Патент РФ 2421344. Система автоматического поддержания давления  
воздуха в бескамерных пневматических шинах / Титков Александр  
Геннадьевич (RU). Публикация патента: 20.06.2011
- [119] . С. Осадчук, О. В. Осадчук, *«Сенсори тиску і магнітного поля»*, Вінниця:  
«УНІВЕРСУМ–Вінниця», 2005.
- [120] В.С. Гольдман, Ю.И. Сахаров, *«Индуктивно-частотные преобразователи  
неэлектрических величин»*, М.: Энергия, 1968.
- [121] Н.Е. Конюхов, Ф.М. Медников, М.Л. Нечаевский, *«Электромагнитные  
датчики механических величин»*, М.: Машиностроение, 1987.
- [122] Е.С. Левшина, П.В. Новицкий, *«Электрические измерения физических  
величин: Измерительные преобразователи»*, Л.: Энергоатомиздат, 1983.
- [123] Л.Н. Степанова, *«Принципы построения управляемых устройств с  
отрицательным и нулевым дифференциальным сопротивлением»*,  
*Электронная техника. Сер 3. Микроэлектроника*. М.: ЦНИИ «Электроника»,  
1990. – Вып. 3. – С. 60-65.
- [124] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Н.Л.Білоконь, *«Математична модель  
перетворювача тиску на основі МДН-транзисторів»*, *Вимірювальна та  
обчислювальна техніка в технологічних процесах. Збірник наукових праць*. –  
Хмельницький: ТУП. - 2001. - № 8. - С. 208-215.
- [125] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, *«Математична модель частотного  
перетворювача деформації на основі біполярно-польової структури»*, *Вісник  
ВПП (Вінниця)*. – 1999. – № 6. – С. 82 – 88.
- [126] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Б.Г. Кадук, *«Дослідження характеристик  
частотних перетворювачів тиску на основі транзисторної структури з  
від'ємним опором»*, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в  
технологічних процесах*. – 1999, № 2. – С. 68 – 73.

- [127] Пат. Российской федерации №2104619. Электростатический микрофон / В.С.Осадчук, Е.В.Осадчук, А.В.Осадчук // Гос. реестр изобр. - 1998. - Бюл. №4.
- [128] Пат. 33403 України, МКИ G 01L7/00. Пристрій для виміру тиску. / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Н.Л. Білоконь (Україна) - № 99020934; Заявл. 18.02.1999; Опубл. 15.02.2001; Бюл. №1.
- [129] Н.Н. Вознесенский, Б.М. Коломывцев, Л.Н. Сыркин, «Туннельный диод в режиме генератора, как пьезочувствительный элемент», *Приборы и техника эксперимента*. – 1968. – № 1. – С. 135 - 137.
- [130] Б.А. Малахов, С.А. Терёмин, В.И. Покалякин, «Влияние деформации на свойства туннельных МДП-структур», *Микроэлектроника*. – 1982. – Вып. 4. – С. 369 – 371.
- [131] В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин, «Полупроводниковые приборы», – М.: Высшая школа, 1987.
- [132] Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков, «Полупроводниковые приборы», М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [133] И.П. Степаненко, «Основы микроэлектроники», М.: Сов. радио, 1980.
- [134] Ю.А. Овечкин, «Полупроводниковые приборы», М.: Высшая школа, 1979.
- [135] Управляемый генератор гармонических колебаний: А.с. 1385241 СССР, МКИ Н03 С3/12 / В.С. Осадчук, С.И. Одобецкий, В.Ф. Яремчук (СССР). - № 4053917/24-09; Опубл. 30.03.88.
- [136] А.Л. Полякова, «Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов», Москва: Энергия, 1979. - 168 с.
- [137] Багдасарян А.В., Шермергор Г.Д., Захаров Н.П., Сергеев В.С. Оценка влияния напряжённо деформированного состояния кремниевых пластин на смещение экстремумов энергетических зон // *Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*. - 1986. - Вып. 5 (184). - С. 21 - 30.
- [138] С.А. Гаряинов, М.Д. Абезгауз, «Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением», Москва: Энергия, 1970.
- [139] Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р. Дж. Мартин-Палма, Ф. Атумао-Русда, «Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники» Москва: Техносфера, 2007.
- [140] K. Fobelets, R. Vounckx, and Borghs, “A GaAs pressure sensor based on resonant tunneling diodes”, *J. Micromech. Microeng.* 4. pp.123-128, 1994.

- [141] A. Di Cario and P. Lugli, "Valley mixing in resonant tunneling diodes with applied hydrostatic pressure", *Semicond. Sci. Technol.*, vol.10, pp.1673-1679, 1995.
- [142] K. Mutamba, M. Flath, A. Sigurdardottir and A. Vogt. A GaAs Pressure Sensor with Frequency Output based on Resonant Tunneling Diodes. The Institute of Highfrequency Technic of Technical University of Dresden. 1997, p.p. 10-13.
- [143] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, «Радіовимірювальний перетворювач тиску з MEMS чутливим елементом», *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання"* Івано-Франківськ – Яремче, 23-28 травня 2016 р. –С.7-9.
- [144] В.Д. Разевиг, «Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2», Модели компонент аналоговых устройств / В.Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992.
- [145] User's Guide includes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpice. Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved, 2000.
- [146] О.В. Осадчук та Я.О. Осадчук, «Частотний перетворювач тиску з чутливим MEMS конденсатором», *Міжнародна НТК "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" РТПСАС 2016*. 14-20 березня 2016. м.Київ. НТУ України "КПІ". –С.94-96.
- [147] И.М. Викулин, В.И. Стафеев, «Физика полупроводниковых приборов», Москва: Радио и связь, 1990.
- [148] Р. Маллер, Т. Кейминс, «Элементы интегральных схем», Москва: Мир, 1989.
- [149] С. Зи, «Физика полупроводниковых приборов. Том 1.», Москва: Мир, 1984.
- [150] Г.П. Морозова, В.Д. Силин, Е.А. Чахмахсазян, «Математическое моделирование биполярных элементов электронных схем», Москва: Радио и связь, 1985.
- [151] Полевые транзисторы. Физика, технология и применение. Перевод с англ. под ред. С.А. Майорова. Москва: Советское радио, 1971.
- [152] М.Г. Крутякова, Н.А. Чарыков, В.В. Юдин, "Полупроводниковые приборы и основы их проектирования", Москва: Радио и связь, 1983.
- [153] С. Зи, «Физика полупроводниковых приборов. Том 2», Москва: Мир, 1984.
- [154] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Н.Л. Білоконь, «Математична модель перетворювача тиску на основі МДН-транзисторів», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Збірник наукових праць*. – Хмельницький: ТУП. - 2001. - № 8. - С. 208-215.

- [155] Л. Росадо, «Физическая электроника и микроэлектроника», Под ред. В.А. Терехова. – Москва: Высшая школа, 1991.
- [156] В. П. Дьяконов, «MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель», Москва: ДМК Пресс, 2008.
- [157] A.V. Osadchuk, Y.A. Osadchuk, «The Transducer of Pressure With The Frequency Output», *Материалы 8-Международной научно-технической конференции РТ-2012 «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» 23-27 апреля 2012 года, г.Севастополь. 2012.* – С. 290.
- [158] Г.Г. Бабичев, С.И. Козловский, В.А. Романов, Н.Н. Шаран, «Кремниевые двухстоковые полевые тензотранзисторы», *Журнал технической физики.* – 2000. – Т.70. – № 10. – С. 45–49.
- [159] А.В. Валов, «Микропроцессоры и их применение в системах управления: Учебное пособие», Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – Ч.2.
- [160] В.Ф. Нефедова, «Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебное пособие», Москва: Высшая школа, 2001.
- [161] Г. Я. Мирский, «Электронные измерения», Москва: Радио и связь, 1986.
- [162] В. С. Яценков, «Микроконтроллеры Microchip с аппаратной поддержкой USB», М. : Горячая линия - Телеком, 2008. - ISBN 978-5-9912-0030-1.
- [163] Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, Б. І. Стадник та ін., «Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник», Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2008.
- [164] А.Ю. Попов, «Проектирование цифровых устройств с использованием ПЛИС: Учеб. пособие», Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
- [165] В.Т. Пятков-Мельник, «Стрілецько-спортивна наука України (2001–2005) Спортивна наука України. Науковий вісник Львівського державного інституту фізичної культури», Електронне наукове фахове видання. : Львів, ЛДІФК, 2006.
- [166] Ю.Н. Шилин, Е.Н. Белевич, «Спортивная стрельба из лука. Теория и методика обучения: Учебное пособие», М.: ТВТ Дивизион, 2014.
- [167] Р.Т. Раєвський, «Сучасна стратегія та інноваційні технології фізичного вдосконалення студентської молоді», наук. монографія за матеріалами Міжнар. симп. Одеса 16-17 вер. 2010. / За ред.. – Одеса : Наука і техніка, 2010.

- [168] Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк, *«Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб»*, Вінниця: ВДТУ, 2001.
- [169] В.Д. Кукуш, *«Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов»*, М.: Радио и связь, 1985.
- [170] В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, В.П. Долгополов, Л.В. Грумінська, *«Метрологія та вимірювальна техніка»*, Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004.
- [171] В.О. Пождаренко, В.В. Кухарчук, *«Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка»* Київ: НМК ВО, 1991.