

ОСАДЧУК Я.О.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

ОСАДЧУК О. В.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

САДЧУК В. С.

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3142-3642>e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

АВТОГЕНЕРАТОРНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ТИСКУ

Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором з первинними тензочутливими резистором і діодом, при чому первинні тензочутливі елементи є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію сенсорів тиску. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активний індуктивний елемент на основі транзистора з фазозсуваючим RC-колом, що дає можливість розширити діапазон регулювання вихідної частоти, а також повністю виготовляти сенсори тиску за мікроелектронною технологією. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних тензочутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі сенсорів тиску на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у зміні функції перетворення вносить зміна тиску. Це викликає зміну еквівалентної ємності та від'ємного диференційного опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що у свою чергу, змінює вихідну частоту пристроїв. Чутливість сенсорів тиску змінюється від 0,365 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа. Отримані параметричні залежності функцій перетворення сенсорів тиску показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики сенсорів і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенератора на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення на основі рівнянь Кірхгофа. У сенсорах тиску з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі та підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірвальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Ключові слова: сенсор, тиск, від'ємний диференційний опір, автогенератор, тензорезистор, тензодіод.

Jaroslav OSADCHUK, Alexander OSADCHUK, Vladimir OSADCHUK

Vinnytsia National Technical University

SELF-OSCILLATING PARAMETRIC PRESSURE SENSORS

Self-oscillating parametric pressure sensors are proposed based on transistor microelectronic structures with negative differential resistance with primary strain-sensing resistor and diode, and the primary strain-sensing elements are active elements of the self-oscillator circuit, which simplifies the design of pressure sensors. It is also proposed to replace the passive inductance of the self-oscillator oscillatory circuit with an active inductive element based on a transistor with a phase-shifting RC circuit, which makes it possible to expand the range of output frequency adjustment, as well as to fully produce pressure sensors using microelectronic technology. Based on the consideration of physical processes in primary strain-sensing elements and self-oscillators, mathematical models of pressure sensors have been developed, on the basis of which parametric dependences of the conversion and sensitivity functions have been obtained. It is shown that the main contribution to the change in the conversion function is made by the change in pressure. This causes a change in the equivalent capacitance and negative differential resistance of the oscillatory system of sensor self-oscillators, which in turn changes the output frequency of the devices. The sensitivity of the pressure sensors varies from 0.365 kHz/kPa to 2.45 kHz/kPa when the pressure changes from 0 kPa to 2050 kPa. The obtained parametric dependences of the conversion functions of pressure sensors show the possibility of easier calculation of the main characteristics of the sensors and clearly show the influence of each parameter of the primary converters and the parameters of the self-oscillator on the output frequency of the sensors in comparison with the calculations of the conversion functions based on the Kirchhoff equations. Pressure sensors with a frequency output do not require analog-to-digital converters and amplifying devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment, in addition, it is possible to transmit information over a distance when the sensors operate at microwave frequencies.

Keywords: sensor, pressure, negative differential resistance, self-oscillator, strain-sensing resistor, strain-sensing diode.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Вимірювання тиску потрібно в багатьох галузях виробництва і техніки, зокрема у автомобільній промисловості, побутовій техніці, медицині, будівельній техніці, газовій та нафтовій промисловості, космічних дослідженнях, військовій техніці, дослідженнях навколишнього середовища, атомній енергетиці, що вимагає створення вимірвальних приладів високої точності та чутливості, високої швидкодії, здатність витримувати перевантаження, лінійну безінерційну характеристику [1, 2, 3, 4–8].

Для вимірювання тиску використовуються сенсори ємнісного, п'єзорезистивного, магнітопружного, індуктивного, п'єзоелектричного та акустоелектричного типів. Сенсори ємнісного типу мають високу

точність і чутливість, термостабільність, проте їх недоліками є непридатність роботи при високих тисках, а також мають високу вартість. Сенсори індуктивного типу характеризуються температурною нестабільністю, високою чутливістю до ударів та вібрацій. П'єзоелектричні сенсори мають низькі вихідні сигнали, низьку точність і чутливість, недостатню стабільність. П'єзореzystивні сенсори тиску мають низькі вихідні сигнали, чутливі до зміни температури, проте мають високу міцність, малий гістерезис, широкий температурний діапазон [9–11].

Як видно з аналізу літератури [1, 2, 3–11], одним з основних недоліків існуючих сенсорів тиску є низький вихідний сигналі, окрім індуктивних сенсорів тиску, виготовлення яких несумісне з інтегральною мікроелектронною технологією. Це приводить до значних похибок вимірювання внаслідок втрат інформації в каналі між виходом сенсора і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, що обумовлює їх низьку точність і чутливість, низьку завадостійкість і швидкодію. Усунути вище перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних параметричних сенсорів, що працюють в режимі перетворення «тиск-частота», що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [12, 13].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з перспективних наукових напрямків у створення сенсорів тиску є дослідження в області сенсорів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, що дозволяє створювати прилади з частотним вихідним сигналом. Автогенераторні параметричні сенсори тиску поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і завадостійкістю, що характеризують прилади з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення «тиск-частота» на основі автогенераторних параметричних сенсорів тиску суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масогабаритні показники сенсорів тиску, підвищити точність і чутливість перетворення тиску у частоту [14–19].

Постановка завдання

Метою роботи є створення та дослідження сенсорів тиску на основі мікроелектронних транзисторних структур, в яких тензорезистор і тензодіод виступають як первинні перетворювачі тиску, так і як активні елементи автогенераторів, в яких втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією від'ємного диференціального опору, що дозволяє перетворити тиск у частоту. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати використання мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для побудови сенсорів тиску з частотним виходом;
- 2) розробити математичні моделі сенсорів тиску, в яких враховано залежність параметрів тензочувливих елементів від дії тиску та їх вплив на вихідну частоту сенсора;
- 3) отримати параметричні залежності вихідної частоти та чутливості сенсора від дії тиску;
- 4) зробити висновки з проведення досліджень.

Математичні моделі сенсорів тиску

Сенсор тиску з частотним вихідним сигналом базується на основі мікроелектронної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій тензочувливим елементом є тензорезистор. На рис. 1 подано електричну схему мікроелектронного сенсора тиску.

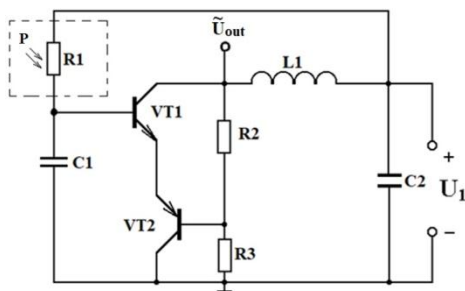


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного сенсора тиску

Вона уявляє собою інтегральну мікроелектронну схему, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності, що приводить до появи від'ємного диференціального опору на електродах колектор-колектор транзисторів. Тензочувливий резистор R1 типу Interlink Electronics FSR-400 включено у коло зворотного позитивного зв'язку. На електродах колектор-колектор VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер.

Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 і до верхнього виводу ємності C1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються енергією від'ємного диференціального опору. Ємність C1 запобігає проходженню змінного високочастотного струму через джерело постійної напруги U1, що живить схему пристрою. Резонансна частота коливального контуру залежить від дії тиску на тензочувливий резистор R1, оскільки змінюється його струм, що приводить до зміни еквівалентної ємності і від'ємного диференціального опору у коливальній системі автогенератора сенсора [20].

Перейдемо до розгляду залежності параметрів тензорезистора від дії тиску на нього. Фізична причина деформаційних ефектів полягає у зміщенні енергетичних рівнів при дії деформації і пов'язана з цим зміна енергетичного спектра електронів і дірок в залежності від деформації, а це приводить до зміни електричних характеристик напівпровідника. В однорідних напівпровідниках зміщення енергетичних рівнів

приводить до залежності опору від деформації, тобто виникає тензорезистивний ефект [21, 22]. Зміна опору напівпровідника при його деформації описується коефіцієнтом тензочутливості [21]

$$m = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} . \quad (1)$$

де $\Delta R/R$ – відносна зміна опору, $\Delta l/l$ – відносна зміна довжини у напрямку дії деформації, l – розмір напівпровідника у напрямку деформації. Тензорезистори виготовляються з домішкових напівпровідників, в яких концентрації основних носіїв дорівнює концентрації домішок, що приводить до зменшення впливу температури на опір тензорезистора. У цьому випадку концентрація носіїв не залежить від деформації, тому зміна опору при дії тиску визначається тільки змінною рухливості електронів і дірок у напівпровіднику тензорезистора. Коефіцієнт тензочутливості для германію і кремнію лежить в діапазоні від 140 до 175. Його величина суттєво залежить від провідності напівпровідника і напрямку деформації. Велику тензочутливість мають також напівпровідникові сполуки GaSb, InSb, PbTe [21, 22].

Виходячи з загального виразу фізичного закону Ома, можна визначити величину тензоструму, який протікає через напівпровідник тензорезистора

$$I_p = qn_0\mu_{ef}(P)ES , \quad (2)$$

де q – заряд електрона, n_0 – концентрація електронів, $\mu_{ef}(P)$ – ефективна рухливість електронів, яка залежить від дії тиску, E – напруженість електричного поля у напівпровіднику тензорезистора, S – площа перерізу тензорезистора. Отже, опір тензорезистора, який залежить від тиску, визначається виразом

$$R(P) = \frac{U_p}{qn_0\mu_{ef}(P)ES} , \quad (3)$$

де U_p – напруга на тензорезисторі. Згідно формули (3), зміна опору $R(P)$ при дії тиску описується формулою

$$\Delta R(P) = \frac{\partial R}{\partial \mu_{ef}(P)} \Delta \mu_{ef}(P) . \quad (4)$$

Провівши диференціювання у виразі (4), отримуємо рівняння

$$\Delta R(P) = - \frac{U_p}{qn_0\mu_{ef}^2(P)ES} \Delta \mu_{ef}(P) . \quad (5)$$

Формула (5) дозволяє аналітично визначити зміну опору тензорезистора від дії тиску.

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора тиску від параметрів тензорезистора і параметрів автогенератора. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії тиску в енергію змінного електричного поля на виході сенсора. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії сенсора. На першому етапі енергія тиску перетворюється в енергію електричного поля через зміну напруги на тензорезисторі, яка є вхідною напругою для автогенератора пристрою. В подальшому енергія електричного поля, яка визначається напругою на тензорезисторі перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора сенсора.

Коефіцієнт корисної дії сенсора тиску дорівнює

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} , \quad (6)$$

де $P_{вх}$, $P_{вих}$ – вхідна і вихідна потужність у сенсорі тиску.

Вихідна потужність описується виразом

$$P_{вих} = \frac{C_{екв}U_{\sim}^2}{2t} , \quad (7)$$

де $C_{екв}$ – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, U_{\sim} – вихідна змінна напруга, t – період коливань змінної вихідної напруги без дії тиску. Вхідна потужність описується формулою

$$P_{вх} = qn_0U_p\mu_{ef}(P)ES . \quad (8)$$

Таким чином, коефіцієнт корисної дії пристрою приймає вид

$$\eta = \frac{C_{екв}U_{\sim}^2}{2tqn_0U_p\mu_{ef}(P)ES} . \quad (9)$$

З формули (9) визначається $C_{екв}$, яка описується виразом

$$C_{екв} = \frac{2\eta tqn_0U_p\mu_{ef}(P)ES}{U_{\sim}^2} . \quad (10)$$

З другого боку, еквівалентну ємність $C_{екв}$ можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \left[\frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

де R_g – від’ємний диференційний опір коливального контуру, L – індуктивність контуру. З виразу (11) отримаємо квадратне рівняння, з якого визначаємо $C_{екв}$

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0. \quad (12)$$

Введемо позначення

$$a_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (13)$$

$$a_2 = R_g^2, \quad (14)$$

$$a_3 = L, \quad (15)$$

$$a_4 = C_{екв} = \frac{2\eta t q n_0 U_p \mu_{эф}(P) E S}{U_{\sim}^2}. \quad (16)$$

Тоді $C_{екв}$ з рівняння (12) дорівнює

$$C_{екв} = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1}. \quad (17)$$

Прирівнявши вираз (17) до виразу (10), отримаємо рівняння для визначення F_0 , яке має вигляд

$$a_1 = \frac{a_2}{a_4} - \frac{a_3}{a_4^2}. \quad (18)$$

Підставивши значення виразів (13)-(16) у формулу (18), отримуємо рівняння

$$(4\pi^2 R_g^2 L) F_0^2 = \frac{R_g^2 U_{\sim}^2}{2\eta t q n_0 U_p \mu_{эф}(P) E S} - \frac{L U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 q^2 n_0^2 U_p^2 \mu_{эф}^2(P) E^2 S^2 R_g^2}. \quad (19)$$

З рівняння (19) визначаємо параметричну залежність резонансної частоти сенсора від параметрів первинного перетворювача тиску і параметрів автогенератора, отже

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta t q n_0 U_p \mu_{эф}(P) E S L} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 q^2 n_0^2 U_p^2 \mu_{эф}^2(P) E^2 S^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (20)$$

Отримана формула (20) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення сенсора, ніж складним шляхом з еквівалентної схеми сенсора на основі рівнянь Кірхгофа, які можна вирішити на комп’ютері чисельним шляхом.

На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення сенсора тиску.

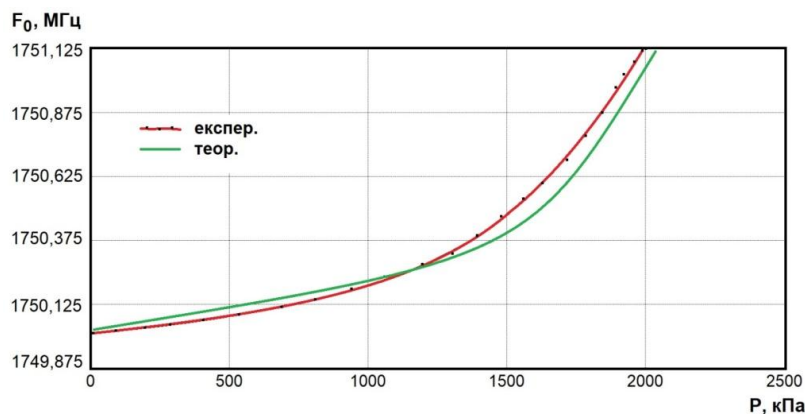


Рис. 2. Залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення від тиску

Чутливість сенсора визначається похідною функції (20) за параметром тиску P . Як показують експериментальні дослідження, вихідна змінна напруга U_{\sim} залежить від тиску, що необхідно врахувати при визначенні функції чутливості. З врахуванням цього зауваження функція (20) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_{\sim}^2(P) \mu_{эф}^{-1}(P) a_5 - U_{\sim}^4(P) \mu_{эф}^{-2}(P) a_6 \right]^{1/2}. \quad (21)$$

де

$$a_5 = \frac{1}{2\eta t q n_0 U_p ESL}, \quad (22)$$

$$a_6 = \frac{1}{4\eta^2 t^2 q^2 n_0^2 E^2 S^2 R_g^2}. \quad (23)$$

Чутливість описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(P) \mu_{ef}^{-1}(P) a_5 - U_{\sim}^4(P) \mu_{ef}^{-2}(P) a_6 \right]^{-1/2} \times \left[\left(2U_{\sim}(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} \mu_{ef}^{-1}(P) a_5 - U_{\sim}^2(P) \mu_{ef}^{-2}(P) a_5 \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} \right) - \left(4U_{\sim}^3(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} \mu_{ef}^{-2}(P) a_6 - 2\mu_{ef}^{-3}(P) \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} U_{\sim}^4(P) a_6 \right) \right]. \quad (24)$$

Графік чутливості сенсора від тиску подано на рис. 3.

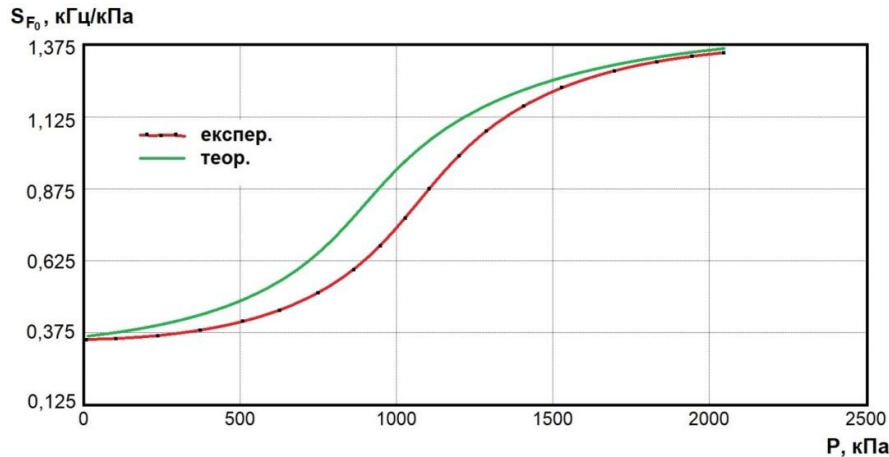


Рис. 3. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості від тиску

Як видно з графіка (рис. 3), чутливість в діапазоні від 0 кПа до 2050 кПа складала від 0,365 кГц/кПа до 1,370 кГц/кПа.

Подальше покращення метрологічних параметрів сенсорів тиску можливо отримати на основі автогенераторних параметричних пристроїв з використанням у якості первинного перетворювача тиску тензорезистивного діода. Електрична схема сенсора тиску подано на рис. 4.

Вона аналогічна схемі сенсора тиску, що подано на рис. 1, окрім того, що замість ємності C1 включено тензочутливий діод типу SS316L, а також замість пасивної індуктивності L1 включено активний індуктивний елемент на основі біполярного транзистора VT3 з фазозсуваючим колом R4C1. Виникнення індуктивних властивостей у біполярних транзисторах обумовлено кінцевою швидкістю руху носіїв заряду у базовій області. Сигнал, що прикладений до емітера, не може з'явитися на колекторному переході, доки носії заряду проходять базу, в результаті чого виникає затримка у часі. Отже, струм колектора відстає у часі від напруги на емітері, яка викликала цей струм, що відповідає індуктивній реакції на електродах емітер-колектор біполярного транзистора. Величина індуктивності та її добротності визначається на основі нелінійної моделі біполярного транзистора. Включення зовнішнього R4C1 кола до транзистора VT3 дозволяє збільшити як індуктивність, так і добротність активного елемента з однієї сторони, а з іншої сторони – повністю реалізувати увесь пристрій за мікроелектронною технологією [19]. Резонансна частота пристрою залежить від тиску за рахунок зміни еквівалентної ємності та від'ємного диференційного опору у коливальній системі автогенератора сенсора.

Тензочутливий діод включено у зворотному режимі, тобто його зворотний струм залежить повністю від дії тиску. З врахуванням співвідношення Ейнштейна, яке дорівнює $D_p/\mu_p = D_n/\mu_n = kT/q$, зворотний струм p⁺-n переходу при дії тиску описується виразом [21]

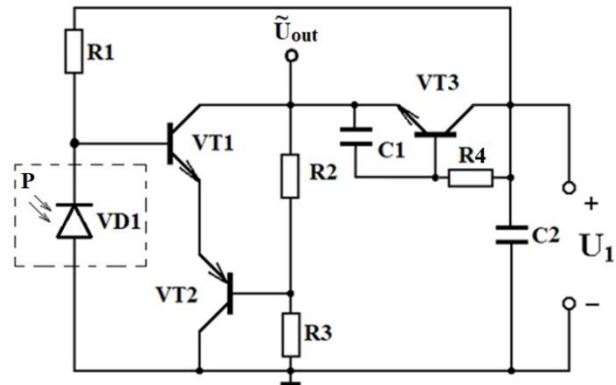


Рис. 4. Електрична схема мікроелектронного сенсора тиску з активним індуктивним елементом

$$I(P) = S \left[\frac{qkT \mu_{pe\phi}(P)}{\tau_p} \right]^{1/2} \cdot p_{n0} \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT} \right), \quad (25)$$

де τ_p – час життя неосновних носіїв, які в домішкових напівпровідниках не залежить від дії тиску, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, p_{n0} – концентрація неосновних носіїв (дірок) без дії тиску, $E_{ge\phi}(P)$ – ширина забороненої зони напівпровідника тензодіода, яка змінюється з тиском, S – площа перерізу напівпровідника тензодіода. Таким чином, при дії тиску на тензодіод змінюється рухливість носіїв заряду і ширина забороненої зони напівпровідника. Максимальну тензочутливість можна отримати при узгодженій зміні рухливості $\mu_{pe\phi}(P)$ і зміни ширини $\Delta E_{ge\phi}(P)$ забороненої зони відносного струму, тобто якщо $\Delta E_{ge\phi}(P)$ збільшується, то $\mu_{pe\phi}(P)$ повинно зменшуватися і навпаки [21]. Тензодіоди мають більшу чутливість у порівнянні з тензорезисторами, оскільки у них змінюються два параметри від тиску, а в тензорезисторах тільки один.

Згідно формули (25), опір тензодіода при дії тиску описується формулою

$$R(P) = \frac{U_g \tau_p^{1/2}}{\left[qkT \mu_{e\phi} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) S}, \quad (26)$$

де U_g – напруга на тензодіоді. Приріст опору тензодіода при дії тиску має вигляд

$$\Delta R(P) = \frac{\partial R}{\partial \mu_{e\phi}} \Delta \mu_{e\phi}(P) + \frac{\partial R}{\partial E_{de\phi}} \Delta E_{de\phi}(P). \quad (27)$$

Виконавши диференціювання у формулі (27), отримаємо

$$\Delta R(P) = -\frac{U_g \tau_p^{1/2} \mu_{e\phi}^{-3/2}}{2 \left[qkT \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) S} \Delta \mu_{e\phi}(P) + \frac{U_g \tau_p^{1/2} \exp \left(\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right)}{\left[q \mu_{e\phi} \right]^{1/2} p_n S (kT)^{3/2}} \Delta E_{ge\phi}(P), \quad (28)$$

Визначивши залежності зміни опору тензочутливого діода від тиску, перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти сенсора при дії тиску. Ця залежність визначається аналогічним чином як і для сенсора з тензорезистором, яка розглянута вище. Вхідна потужність для автогенератора сенсора визначається на основі виразів (25) і (26)

$$P_{ex} = \left[\frac{qkT \mu_{e\phi}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) U_g S. \quad (29)$$

Вихідна потужність визначається формулою (7). Отже, виходячи з формул (7) і (29), коефіцієнт корисної дії сенсора дорівнює

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2t \left[\frac{qkT \mu_{e\phi}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) U_g S}. \quad (30)$$

З рівняння (30) визначається $C_{екв}$, яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{2\eta t \left[\frac{qkT \mu_{e\phi}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) U_g S}{U_{\sim}^2}. \quad (31)$$

З другого боку, еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора зв'язана з резонансною частотою виразом (11).

Підставивши у формулу (11) вираз (31) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти від тиску, а також від параметрів тензодіода і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta t \left[\frac{qkT \mu_{e\phi}}{\tau_p} \right]^{1/2} p_n \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) L U_g S} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 \left[\frac{qkT \mu_{e\phi}}{\tau_p} \right] p_n^2 \exp \left(-\frac{\Delta E_{ge\phi}}{kT} \right) R_g^2 U_g^2 S^2} \right]^{1/2}. \quad (32)$$

Вираз (32) є функцією перетворення сенсора тиску. На рис. 5 надано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії тиску на сенсор. Відносна похибка між розрахунками і експериментом складає 5 % при вимірюванні тиску величиною від 0 до 2100 кПа.

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота змінюється від 1750 МГц до 1752 МГц при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа.

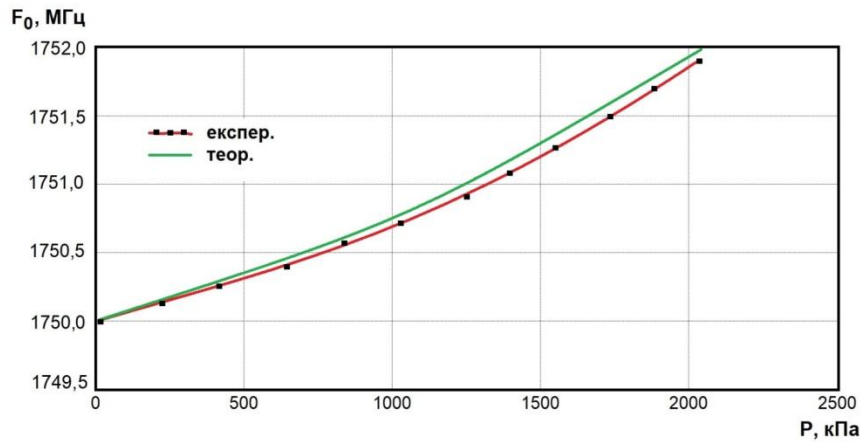


Рис. 5. Розрахункова і експериментальні залежності функції перетворення від тиску

Функція чутливості визначається на основі виразу (32), при цьому вважається, що вихідна напруга сенсора також залежить від тиску. Отже, функція чутливості описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(P) e^{\frac{\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} \mu_{ef}^{-1/2}(P) a_7 - U_{\sim}^4(P) e^{\frac{2\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} \mu_{ef}^{-1}(P) a_8 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times a_7 \left[-\frac{1}{2} \mu_{ef}^{-3/2}(P) U_{\sim}^2(P) \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} e^{\frac{\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} + \left(2U_{\sim}(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} e^{\frac{\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} + \right. \right. \quad (33)$$

$$\left. \left. + \frac{1}{kT} e^{\frac{\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} \frac{dE_{ge\phi}(P)}{dP} U_{\sim}^2(P) \right) \mu_{ef}^{-1/2}(P) \right] + a_8 \left[\left[4U_{\sim}^3(P) \frac{dU_{\sim}(P)}{dP} e^{\frac{2\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + 2e^{\frac{2\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} \frac{1}{kT} \frac{dE_{ge\phi}(P)}{dP} \right] \mu_{ef}^{-1}(P) - \mu_{ef}^{-2}(P) \frac{d\mu_{ef}(P)}{dP} U_{\sim}^4(P) e^{\frac{2\Delta E_{ge\phi}(P)}{kT}} \right],$$

де

$$a_7 = \frac{\tau_p^{1/2}}{2\eta t (qkT)^{1/2} p_n L U_g S}, \quad (34)$$

$$a_8 = \frac{\tau_p}{4\eta^2 t^2 qkT p_n^2 R_g^2 U_g^2 S^2}. \quad (35)$$

На рис. 6 надано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості від тиску

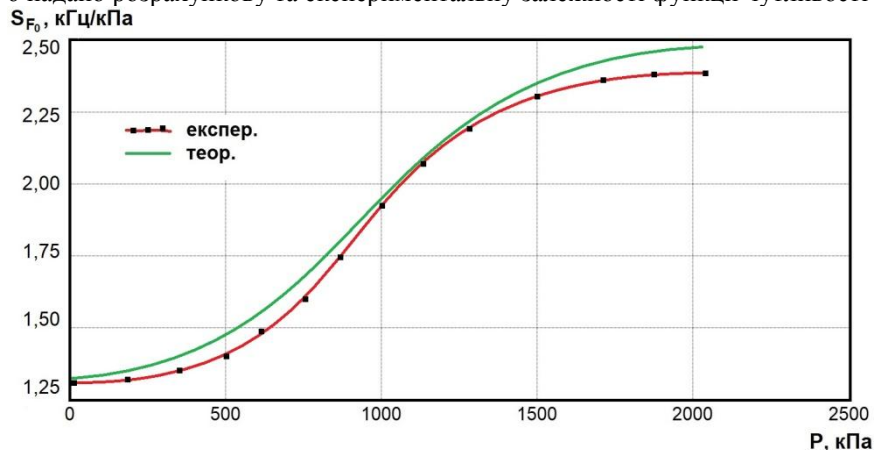


Рис. 6. Розрахункова та експериментальна залежності функції чутливості від тиску

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість сенсора змінювалась від 1,31 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа в діапазоні тисків від 0 кПа до 2050 кПа.

Частотний діапазон автогенераторних параметричних сенсорів тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором з первинними тензочутливими елементами типу тензорезистора і тензодіода вибраний в LTE Band 3 (DCS-1800) Uplink: 1710–1785 МГц. Стандарт використовує частотний діапазон 1800 МГц, що збігається із діапазоном GSM-мереж. При створенні 4G-мережі на базі вже побудованої 2G-інфраструктури оператори зазвичай зберігають вихідну мережу і виділяють частину діапазону під нову 4G-мережу. LTE Band 3 зустрічається як у містах, так і у сільській місцевості [23]. Даний вид зв'язку працює в дуплексному режимі FDD з частотним поділом низхідного та висхідного каналу.

Інтернет речі (IoT) перевизначить спосіб взаємодії людей один з одним і з об'єктами, які їх оточують, з метою створення глобальної мережі, що з'єднає всіх і все. Очікується, що використання Інтернет речей дозволить використовувати масовий зв'язок типу машин (mMTC), за допомогою якого пристрої передають та отримують невелику кількість даних, з метою покращення промислових і вимірювальних процесів [24]. Технології радіозв'язку малої потужності (LPWA) з'явилися як рішення для розробки mMTC, що задовольняє вимогам низького енергоспоживання, низької швидкості передачі даних, масштабованості та великої дальності. Використання вузькосмугових Інтернет речей (NB-IoT), як абсолютно нової стільникової технології, дозволить зробити крок вперед у реалізації IoT на основі 5G, а також NB-IoT буде сумісний із системою 4G Long Term Evolution (LTE) та з глобальними системами мобільного зв'язку 2G (GSM) [24–26]. Ця перевага, додана до більш високої ефективності використання спектру, ставить технологію та привілейоване положення для впровадження мереж LPWA [25].

Експериментальні дослідження проведено за допомогою спектроаналізатора Arinst SSA TG-LC. На рис. 7 представлено спектр автогенераторного параметричного сенсора тиску на основі транзисторної мікроелектронної структури в діапазоні DCS-1800 Uplink, частота передачі складає 1750,0 МГц.

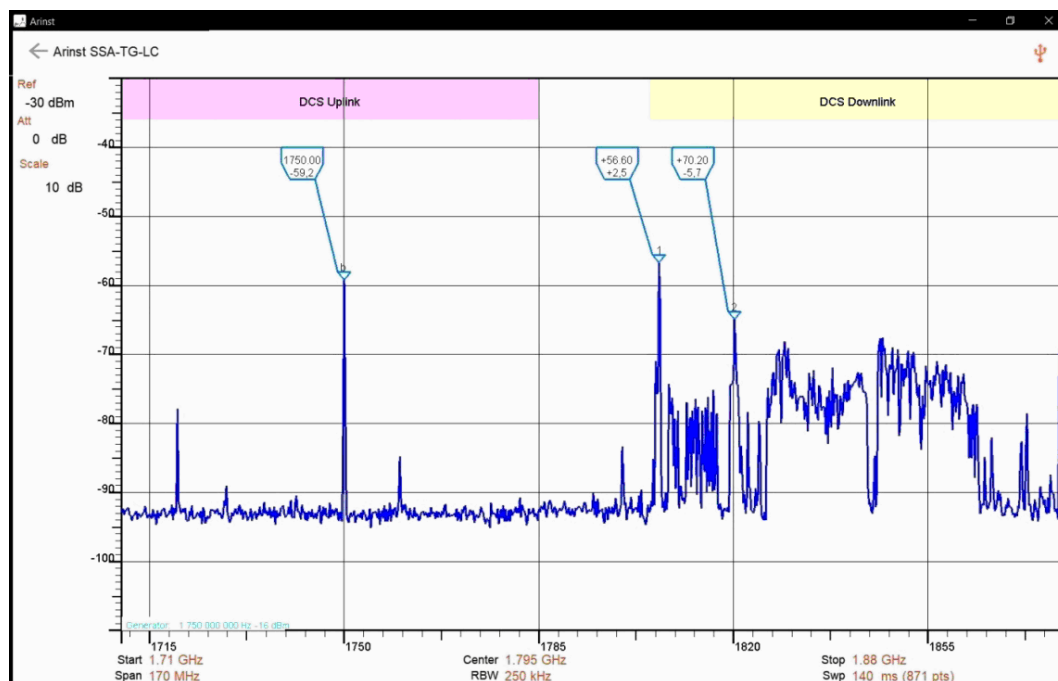


Рис. 7. Спектр автогенераторного параметричного сенсора тиску на основі транзисторної мікроелектронної структури

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Запропоновано автогенераторні параметричні сенсори тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференційним опором з первинними тензочутливими елементами на базі тензорезистора і тензодіода, причому первинні тензочутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію сенсорів тиску.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних тензочутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі сенсорів в тиску, на основі яких отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у змінні функції перетворення вносить зміна тиску. Це викликає зміну еквівалентної ємності і від'ємного диференційного опору коливальної системи автогенераторів сенсорів, що у свою чергу, змінює вихідну частоту пристроїв. Чутливість сенсорів тиску змінюється від 0,365 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа.

3. Отримані параметричні залежності функцій перетворення сенсорів тиску показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики сенсорів і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту сенсорів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення з еквівалентних схем пристроїв на основі рівнянь Кірхгофа.

У сенсорах тиску з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі та підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того можлива передача інформації на відстань при роботі сенсорів у надвисоких частотах.

Література

1. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я.І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич [та ін.] ; за ред. Я. І. Лепіха, В. О. Романова. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
3. Датчики : [справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука]. – М. : Техносфера, 2012. – 624 с.
4. Невлюдов І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева. – Київ : НАУ, 2018. – 200 с.
5. Dorothee Grieshaber, Robert MacKenzie, Janos V and Erik Reimhult. Electrochemical Biosensors - Sensor Principles and Architectures. *Sensors* 2008, 8, P. 1400–1458.
6. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / [під ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-прес, 2002. – Т. 2. – 475 с.
7. Guo Y., Li B., Zhang Q., He X.T., Sun J.Y. A Further Theoretical Study of Capacitive Pressure Sensors Based on Thin Film Elastic Deflection and Parallel Plate Capacitor: Refined Closed-Form Solution and Numerical Calibration. *Sensors* 2022, 22, 2848. <https://doi.org/10.3390/s22082848>
8. Tai G., Wei D., Su M., Li P., Xie L., Yang J. Force-Sensitive Interface Engineering in Flexible Pressure Sensors: A Review. *Sensors* 2022, 22, 2652.
9. Czako Z., Surdea-Bлага T. Sebestyen G., Hangan A., Dumitrascu D.L., David L., Chiarioni G., Savarino E., Popa S.L. Integrated Relaxation Pressure Classification and Probe Positioning Failure Detection in High-Resolution Esophageal Manometry Using Machine Learning. *Sensors* 2022, 22, 253.
10. Jang J., Jun Y.S., Seo H., Kim M., Park J.U. Motion Detection Using Tactile Sensors Based on Pressure-Sensitive Transistor Arrays. *Sensors* 2020, 20, 3624.
11. Deng F., He Y., Li B., Zuo L., Wu X., Fu, Z. A CMOS Pressure Sensor Tag Chip for Passive Wireless Applications. *Sensors* 2015, 15, 6872-6884.
12. Oleksander V. Osadchuk, Iaroslav O. 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. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 1044559*
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I. A., Piotr Kisała, Tomasz Zyska, Azamat Annabaev and Kanat Mussabekov Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Poland, R. 93 NR 3/2017. P. 113–116.*
14. Khutorenko S., Osadchuk O., Osadchuk I., Vasilchuk D., Semenets D., Lukin V. Mathematical Model of Piezoelectric Oscillating System with Electrodes of Variable Nonlinear and Constant Linear Air Gap. *Telecommunications and Radio Engineering. 2017. No 76(18). P. 1639–1648. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.50.*
15. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018; 108086P, 2018, pp. 1–14.*
16. Осадчук О.В. Тензорективний ефект в біполярних транзисторах / Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 1 (281). – С. 164–170.
17. Осадчук О.В. Тензорективний ефект у польових транзисторах / Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 2 (283). – С. 163–170.
18. Osadchuk I. A., Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Semenov A. O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 452-457.
19. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 212-237.
20. Осадчук В.С. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем / Осадчук В.С., Осадчук А.В. – Вінниця : «Універсум-Вінниця», 1999. – 275 с.
21. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / Викулин И.М., Стафеев В.И. – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
22. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / Полякова А.Л. – М. :

Энергия, 1979. – 168 с.

23. Jayantkumar Dorave, Ritesh Sadiwala Uplink and Downlink Variation in Drone Technology for Cloud, Edge, Fog and Smart Dust Integrated IoT Architecture: Demonstrated Over WSNs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2089 (2021) 012023. doi:10.1088/1742-6596/2089/1/012023

24. Mikko Valkama, Jarno Niemelä SAINJU, PRABHAT MAN: LTE performance analysis on 800 and 1800 MHz Bands. Master of Science Thesis. Tampere university of technology, 2012. 82 p.

25. Maria-Gabriella di Benedetto, Pol Serra i Lidón Analysis of the NB-IoT technology towards massive Machine Type Communication / Maria-Gabriella di Benedetto. University Sapienza di Roma, 2018. 69 p.

26. Wang Y.-P. E. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017.

References

1. J. Freiden. Modern sensors. Directory. M.: Technosphere, 2005. 592 p.
2. Intelligent measuring systems based on microelectronic sensors of the new generation / Ya. I. Lepikh, Yu. O. Gordienko, S.V. Dzyadevich [etc.]; for ed. J.I. Lepikha, V.O. Romanov. Odesa: Astroprint, 2011. 352 p.
3. Sensors: Reference manual / Under common. ed. V.M. Sharapov, E.C. Polishchuk. M.: Technosphere, 2012. 624 p.
4. Nevyudov I.S., Tokarev O.V. Automatic control of technological objects. Kyiv: NAU, 2018. 200 p.
5. Dorothee Grieshaber, Robert MacKenzie, Janos V and Erik Reimhult. Electrochemical Biosensors - Sensor Principles and Architectures. *Sensors* 2008, 8, P. 1400–1458.
6. Microelectronic sensors of physical quantities. Ed. Z. Yu. Gotri. Lviv: Liga-press, Vol.2, 2002. 475 p.
7. Guo Y., Li B., Zhang Q., He X.T., Sun J.Y. A Further Theoretical Study of Capacitive Pressure Sensors Based on Thin Film Elastic Deflection and Parallel Plate Capacitor: Refined Closed-Form Solution and Numerical Calibration. *Sensors* 2022, 22, 2848. <https://doi.org/10.3390/s22082848>
8. Tai G., Wei D., Su M., Li P., Xie L., Yang J. Force-Sensitive Interface Engineering in Flexible Pressure Sensors: A Review. *Sensors* 2022, 22, 2652.
9. Czako Z., Surdea-Blaga T. Sebestyen G., Hangan A., Dumitrascu D.L., David L., Chiarioni G., Savarino E., Popa S.L. Integrated Relaxation Pressure Classification and Probe Positioning Failure Detection in High-Resolution Esophageal Manometry Using Machine Learning. *Sensors* 2022, 22, 253.
10. Jang J., Jun Y.S., Seo H., Kim M., Park J.U. Motion Detection Using Tactile Sensors Based on Pressure-Sensitive Transistor Arrays. *Sensors* 2020, 20, 3624.
11. Deng F., He Y., Li B., Zuo L., Wu X., Fu, Z. A CMOS Pressure Sensor Tag Chip for Passive Wireless Applications. *Sensors* 2015, 15, 6872-6884.
12. Oleksander V. Osadchuk, Iaroslav O. 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. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 1044559
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I. A., Piotr Kisala, Tomasz Zyska, Azamat Annabaev and Kanat Mussabekov Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, Poland, R. 93 NR 3/2017. P. 113–116.
14. Khutornenko S., Osadchuk O., Osadchuk I., Vasilchuk D., Semenets D., Lukin V. Mathematical Model of Piezoelectric Oscillating System with Electrodes of Variable Nonlinear and Constant Linear Air Gap. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. No 76(18). P. 1639–1648. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.50.
15. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018; 108086P, 2018, pp. 1–14.
16. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Tensoreactive effect in bipolar transistors. *Herald of the Khmelnytsky National University*, 2020. № 1 (281). P. 164-170.
17. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Tensoreactive effect in field-effect transistors. *Herald of the Khmelnytsky National University*, 2020. № 2 (283). P. 163-170.
18. Osadchuk I. A., Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Semenov A. O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 452-457.
19. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3: [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. P. 212-237.
20. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. 275 p.
21. Vikulin I.M., Stafeev V.I. Physics of semiconductor devices. Moscow: Radio and communication, 1990. 264 p.
22. Polyakova A.L. Deformation of semiconductors and semiconductor devices. M.: Energy, 1979. 168 p.
23. Jayantkumar Dorave, Ritesh Sadiwala Uplink and Downlink Variation in Drone Technology for Cloud, Edge, Fog and Smart Dust Integrated IoT Architecture: Demonstrated Over WSNs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 2089 (2021) 012023. doi:10.1088/1742-6596/2089/1/012023
24. Mikko Valkama, Jarno Niemelä SAINJU, PRABHAT MAN: LTE performance analysis on 800 and 1800 MHz Bands. Master of Science Thesis. Tampere university of technology, 2012. 82 p.
25. Maria-Gabriella di Benedetto, Pol Serra i Lidón Analysis of the NB-IoT technology towards massive Machine Type Communication / Maria-Gabriella di Benedetto. University Sapienza di Roma, 2018. 69 p.
26. Wang Y.-P. E. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017.