Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.396.6:621.373.5+517.938

АВТОГЕНЕРАТОРНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА ПРИСТРОЇ НА ЇХ ОСНОВІ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ І МЕРЕЖ ЗАГАЛЬНОГО ТА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

РЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Вінниця – 2025

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Карташов Володимир Михайлович
Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

доктор технічних наук, доцент
Мичуда Леся Зиновіївна
Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри безпеки інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор
Саміла Андрій Петрович
Чернівецький національний університет
ім. Ю. Федьковича, завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки

Захист відбудеться « 26 » березня 2025 року о 14^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.01 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, Україна, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

Із дисертацією можна ознайомитися на офіційному сайті Інституту докторантури та аспірантури https://ida.vntu.edu.ua/uk/zahyst/ та в Науково-технічній бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, Україна, м. Вінниця, вулиця Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Ярослав ІВАНЧУК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Подальший розвиток науки і техніки у світі зв'язаний з розвитком комп'ютерних, інформаційно-вимірювальних та радіоелектронних систем. Фундаментом роботи цих систем є пристрої пошуку, добування, приймання, оброблення, передавання, спотворення та руйнування інформації, які ґрунтуються на використанні електромагнітних хвиль, як носіїв інформації. Таким чином, різноманітну інформацію, яка характеризує навколишнє середовище, така як температура, тиск, оптичне випромінювання, вологість, склад газового середовища, постійні магнітні і електричні поля, переміщення об'єктів, які непов'язані з електромагнітними хвилями, необхідно перетворити в частотний інформаційний сигнал. У зв'язку з цим виникає завдання розвитку нових теоретичних і практичних засад, для розбудови автогенераторних перетворювачів фізичних величин для подальшого застосування їх як компонентів у комп'ютерних системах і мережах та інформаційно-вимірювальних системах загального та спеціального призначення. Ці автогенераторні вимірювальні прилади повинні бути економічними, завадостійкими, забезпечувати високу швидкодію, чутливість і точність вимірювання, мати якомога менші габарити і вагу, бути сумісними з сучасними комп'ютерами і дозволяти кодування інформації при передачі її на відстані. Сучасні перетворювачі вимірювання фізичних величин не повністю відповідають вище зазначеним вимогам, оскільки вони містять джерело первинної інформації та комплекс апаратних і програмних засобів.

Одним із перспективних наукових напрямків у створенні автогенераторних перетворювачів вимірювання фізичних величин, що дозволяє усунути вищеперераховані недоліки, є використання залежності реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових і квантових пристроїв від впливу зовнішніх фізичних величин і створення на цій основі нового класу автогенераторних приладів вимірювання для комп'ютерних систем і мереж. У приладах такого типу відбувається перетворення фізичних величин та інших зовнішніх впливів у частотний сигнал, що дозволяє створювати автогенераторні перетворювачі вимірювання за інтегральною технологією і дає можливість зменшити апаратні затрати, підвищити швидкодію, точність і чутливість, розширити діапазон вимірювальних величин, поліпшити надійність, завадостійкість і довгочасову стабільність параметрів. Окрім того, поєднання на одному кристалі автогенераторних приладів вимірювання із схемами обробки інформації уможливлює створення інтелектуальних пристроїв.

Використання як інформативного параметру частоти дозволяє уникнути застосування підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці інформації, що зменшує апаратні затрати, а відповідно вартість комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напряму кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету, в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах» (2017-2018 р., № держреєстрації 0117U000573); «Методи та пристрої формування, оброблення й

вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об’єктів» (2017-2019 р., № держреєстрації 0117U007139); «Розроблення та дослідження радіовимірювальних частотних параметричних мікроелектронних приладів фізичних величин для військових та цивільних об'єктів» (2019-2021 р., номер держреєстрації 0119U000295); «Методи та пристрої формування й оброблення хаотичних сигналів, контролю доступу та позиціювання у робототехнічних та інфокомунікаційних системах» (2021-2022 р., номер державної реєстрації 0121U109722); «Радіовимірювальні частотні сенсори з автономним прийняттям рішення для робототехнічних пристроїв, систем телеуправління та спеціалізованих хмарних платформ» (2022-2023 р., номер держреєстрації 0122U001272); Грантова угода за рамковою програмою Horizon-2020. The EU Framework Programme for Research and Innovation Horizon 2020. Тема проєкту «Передача та валідація технології мініатюрної гнучкої антени стільникового Інтернету речей» Грантова Угода No 872614, Knowledge Transfer Experiment (KTE) Call 3 (Конкурс H2020-DT-2018-2020, у яких здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є зменшення апаратних затрат під час розробки автогенераторних вимірювальних перетворювачів як компонентів комп’ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення на основі розвитку наявних методів вимірювання фізичних величин шляхом вдосконалення та розроблення нових математичних моделей та електричних схем пристроїв, режими яких оптимізовані за принципом перетворення енергії постійного електричного поля чутливих перетворювачів у енергію змінного електричного поля на виході автогенераторних пристроїв, що дозволяє перелаштування параметрів автоколивальної системи у широких межах.

Для досягнення поставленої задачі необхідно розв’язати **наступні завдання:**

1. Здійснити аналіз сучасного стану теорії та практики створення і функціонування перетворювачів фізичних величин, систематизувати відомі принципи, методи, структури та математичні моделі, що покладено в основу їх побудови.

2. Розробити методи і теоретичні засади подальшого удосконалення наявних методів вимірювання фізичних величин та визначення основних параметрів пристроїв перетворення температури, оптичного випромінювання, тиску, магнітного поля, газу, вологості у частотний сигнал на основі квантово-розмірних і транзисторних структур з від’ємним диференціальним опором.

3. Розробити математичні моделі автогенераторних перетворювачів температури, оптичної потужності, тиску, магнітного поля, газу, вологості на основі квантово-розмірних і транзисторних структур з від’ємним диференціальним опором. Розробити нові та удосконалити відомі схеми автогенераторних перетворювачів на основі транзисторних і квантово-розмірних структур, як компонент вимірювання в комп’ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення, принцип роботи яких заснований на зміні реактивних властивостей та від’ємного диференціального опору при електричному перелаштуванню параметрів коливних систем при дії інформаційних сигналів.

4. Провести експериментальні дослідження параметрів і характеристик автогенераторних перетворювачів фізичних величин в широкому діапазоні частот і зміни управляючих постійних напруг. Провести експериментальні дослідження

функцій перетворення і чутливості розроблених автогенераторних перетворювачів температури, оптичного випромінювання, магнітного поля, тиску, газу та вологості, визначити оптимальні режими роботи.

5. Розробити теоретичні засади, принципи роботи, схеми та конструкції багатоканальних пристроїв одночасного вимірювання частотної і цифрової інформації, параметри яких узгоджено з комп'ютерними та інформаційно-вимірювальними системами і мережами загального та спеціального призначення.

6. Розробити багатоканальну комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему моніторингу параметрів потужних масло-наповнених енергетичних установок на основі розроблених автогенераторних вимірювальних приладів.

7. Розробити комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему фізичних параметрів весляра при його роботі та режим руху човна на основі розроблених автогенераторних вимірювальних приладів.

8. Розробити комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему вимірювання і контролю параметрів газового середовища на базі запропонованих автогенераторних приладів.

9. Розробити теоретичні засади, принципи роботи, схеми та конструкції багатоканальних підривних пристроїв наземного та повітряного типів на основі розроблених автогенераторних приладів.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення фізичних величин таких як температура, оптичне випромінювання, магнітне поле, тиск, гази та вологість у частотний сигнал на основі біполярних, біполярно-польових, польових транзисторних і квантово-розмірних структур з від'ємним диференціальним опором в автогенераторних перетворювачах для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем загального та спеціального призначення.

Предметом дослідження є функції перетворення та функції чутливості автогенераторних перетворювачів фізичних величин та формування частотних сигналів у приладах, що базуються на основі транзисторних і квантово-розмірних структур з від'ємним диференціальним опором, характеристики та параметри розроблених пристроїв для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем і мереж загального та спеціального призначення.

Методи дослідження базуються на використанні рівнянь математичної фізики при розгляді автогенераторних систем при їх роботі в нелінійному і лінійному режимах, теорії чисел та чисельних методів, теорії диференціально-інтегрального числення, лінійної алгебри, системи алгебраїчних рівнянь при визначенні функцій перетворення і чутливості, теорії радіотехнічних кіл для аналізу динамічних процесів в електричних схемах автогенераторів автогенераторних вимірювальних перетворювачах, теорії функцій комплексної змінної при розрахунках вольт-амперних характеристик приладів, теорії ймовірності при визначенні похибок вимірювання, а також комп'ютерного моделювання для аналізу та перевірки отриманих теоретичних положень.

Наукова новизна отриманих результатів. У ході виконання дисертаційної роботи отримано такі наукові результати:

1. Вперше запропоновано принцип побудови автогенераторних перетворювачів фізичних величин для принципово нових та вдосконалення існуючих комп'ютеризованих, комп'ютерних систем і компонент, який відрізняється від

існуючих тим, що він базується на перетворенні енергії постійного електричного поля первинних перетворювачів у енергію змінного електричного поля у квантових і транзисторних структурах за рахунок від'ємного диференціального опору, що визначає зміну частоти інформаційного сигналу.

2. Запропоновано метод розрахунку параметрів автогенераторів на основі тунельно-резонансного діода з від'ємним диференціальним опором для побудови автогенераторних перетворювачів фізичних величин для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем загального та спеціального призначення, який відрізняється від існуючих тим, що на основі його еквівалентної схеми в режимі стану рівноваги нелінійної системи на базі розв'язку диференціального рівняння другого порядку, що визначає умови стійкості роботи автогенератора і залежність вихідної напруги від часу.

3. Вперше запропоновано і розроблено методи розрахунку основних характеристик автогенераторних перетворювачів фізичних величин, як компонент комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, на відміну від існуючих, базуються на основі принципу перетворення енергії постійного електричного поля у енергію змінного електричного у квантових і транзисторних структурах пристроїв з від'ємним диференціальним опором.

4. Вперше розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів температури для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, в яких на відміну від існуючих, на основі методу перетворення енергії отримано параметричні залежності функцій перетворення і чутливості, які враховують вплив температури і кожного параметра первинних перетворювачів та параметрів автогенераторів на вихідну частоту приладів у порівнянні з розрахунками функцій перетворення і чутливості з еквівалентних схем приладів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа, що значно зменшує апаратні затрати при розрахунках.

5. Вперше розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів вимірювання оптичної потужності випромінювання для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, в яких на відміну від існуючих, на основі методу перетворення енергії, значно простіше розраховано аналітичні формули параметричної залежності функцій перетворення і чутливості, які враховують вплив оптичної потужності та кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту приладів у порівнянні з існуючими розрахунками функцій перетворення та чутливості з еквівалентних схем приладів.

6. Вперше розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів тиску для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, в яких на відміну від існуючих, на основі методу перетворення енергії отримано аналітичні формули параметричної залежності функцій перетворення та чутливості, які враховують вплив тиску і кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту приладів у порівнянні з існуючими методами розрахунку функцій перетворення та чутливості з еквівалентних схем приладів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа, що значно зменшує апаратні затрати при розрахунках.

7. Вперше розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів індукції магнітного поля для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, в яких на відміну від існуючих, на основі методу перетворення енергії, значно простіше розраховано аналітичні формули параметричної залежності функцій

перетворення і чутливості, які враховують вплив індукції магнітного поля і кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту приладів у порівнянні з існуючими методами розрахунку функцій перетворення і чутливості з еквівалентних схем приладів.

8. Вперше розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів концентрації газів і вологості для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, в яких на відміну від існуючих, на основі методу перетворення енергії, значно простіше отримано аналітичні формули функцій перетворення і чутливості, які враховують вплив концентрації газів і вологості та кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на вихідну частоту приладів у порівнянні з існуючими методами розрахунку функцій перетворення і чутливості з еквівалентних схем приладів, що значно зменшує апаратні затрати при розрахунках.

9. Розроблено теоретичні засади, принципи роботи, схеми та конструкції багатоканальних пристроїв одночасного вимірювання частотної і цифрової інформації, параметри яких узгоджено з комп'ютерними та інформаційно-вимірювальними системами і мережами загального та спеціального призначення.

10. Розроблено теоретичні засади, принципи роботи, схеми та конструкції багатоканальної комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів потужних масло-наповнених енергетичних установок на основі розроблених автогенераторних вимірювальних приладів. Розроблено комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему фізичних параметрів весляра при його роботі та режим руху човна на основі розроблених автогенераторних вимірювальних приладів. Розроблено комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему вимірювання і контролю параметрів газового середовища на базі запропонованих автогенераторних приладів. Розроблено теоретичні засади, принципи роботи, схеми та конструкції багатоканальних підривних пристроїв наземного та повітряного типів на основі розроблених автогенераторних приладів для цивільної та військової техніки.

Практичне значення отриманих результатів. У ході виконання дисертаційної роботи одержано такі практичні результати:

1. Розроблено схеми, конструкції, методики та способи реалізації автогенераторних перетворювачів температури на основі тунельно-резонансного діода в області надвисоких частот як компонентів комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем. При зміні температури від -150^0 С до $+50^0$ С відбувається нелінійне зростання частоти від $4{,}02\cdot10^9$ Гц до $4{,}09\cdot10^9$ Гц, при цьому чутливість складала від 220 кГц/^{0}С до 480 кГц/^{0}С. Розроблено та досліджено автогенераторні перетворювачі вимірювання температури для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем з первинним напівпровідниковими термочутливими резистором, термочутливим напівпровідниковим діодом, а також розроблено автогенераторні перетворювачі для вимірювання температури з термочутливим біполярним і польовим транзистором. Як показали експериментальні дослідження, вихідна частота перетворювача з біполярним термочутливим транзистором зменшувалась від 1525,1 МГц до 1523, 81 МГц при зміні температури від 0^0С до 100^0С, а для перетворювача з термочутливим польовим транзистором, вихідна частота зменшувалась від 1585,05 МГц до 1554,86 МГц при зміні температури в тому ж діапазоні, при цьому чутливість перетворювача з термочутливим біполярним транзистором змінювалась від 11,25 кГц/^{0}С до 21,5 кГц/^{0}С, а для перетворювача з

термочутливим польовим транзистором чутливість складала від 2,77 кГц/^{0}С до 4,25 кГц/^{0}С в діапазоні вимірюваної температури від 0 ^{0}С до 100 ^{0}С.

2. Розроблено схеми, конструкції, методики та способи реалізації автогенераторних перетворювачів оптичної потужності на основі квантової двобар'єрної гетероструктури, базовим елементом якої є тунельно-резонансний діод, причому він виступає як первинний фоточутливий перетворювач і як автогенератор, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення. Чутливість перетворювача змінюється від 15,27 кГц/мкВт/см^2 до 16,37 кГц/мкВт/см^2 в діапазоні зміни оптичної потужності від 0 до 100 мкВт/см^2. Розроблено та досліджено автогенераторні перетворювачі вимірювання оптичної потужності на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода, причому первинні фоточутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів. Чутливість перетворювачів змінюється від 125,2 кГц/мкВт/см^2 до 134,8 кГц/мкВт/см^2.

3. Розроблено схеми, конструкції, методики та способи реалізації автогенераторних перетворювачів індукції магнітного поля на основі тунельно-резонансного діода. Показано, що прилади такого типу мають суттєві переваги перед існуючими приладами вимірювання магнітної індукції, які полягають у можливості працювати у надвисокочастотному діапазоні, мікромініатюризації перетворювача до нанорозмірів з бездротовою передачею виміряної інформації на відстань, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Чутливість перетворювача вимірювання магнітної індукції змінюється від 250 кГц/мТ до 350 кГц/мТ в діапазоні зміни індукції магнітного поля від нуля до 3 тесла, вихідна частота при цьому змінювалась від $5{,}4\cdot10^9$ Гц до $6{,}3\cdot10^9$ Гц. Також розроблено та досліджено автогенераторні перетворювачі вимірювання індукції магнітного поля з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з магніточутливими резистором та діодом, магніточутливими елементами Холла і біполярним двоколекторним магніточутливим транзистором, причому первинні магніточутливі елементи є активними елементами схеми автогенератора що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Чутливість розроблених автогенераторних приладів змінюється від 9,255 кГц/мТ до 12,40 кГц/мТ при зміні індукції магнітного поля від 0,1 мТ до 120 мТ.

4. Розроблено схеми, конструкції, методики та способи реалізації автогенераторних перетворювачів тиску на основі квантової гетероструктури в якому базовим елементом є тунельно-резонансний діод. Чутливість перетворювача для вимірювання тиску змінюється від 1,15 кГц/Па$\cdot10^5$ до 14,16 кГц/Па$\cdot10^5$ в діапазоні зміни тиску від $50\cdot10^5$ Па до $350\cdot10^5$ Па, при цьому вихідна частота змінювалась від 1,48 МГц до 1,52 МГц. Розроблено та досліджено автогенераторні перетворювачі тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинним тензочутливими елементами на базі тензорезистора і тензодіода, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах.. Чутливість приладів зростає від 0,365 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа.

5. Розроблено схеми, конструкції, методики та способи реалізації автогенераторних перетворювачів концентрації газів на основі напівпровідникових структур з диференціальним від'ємним опором з газочутливими елементами на базі резистора і діода Шотткі з бездротовою передачею виміряної інформації на відстань, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Чутливість автогенераторнних перетворювачів змінюється від 1,48 кГц/ppm до 6,35 кГц/ppm при зміні концентрації газу від 0 ppm до 2000 ppm в діапазоні частот від 1,036 ГГц до 1,033 ГГц. Запропоновано та досліджено надвисокочастотні автогенераторні перетворювачі для вимірювання концентрації газів на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними газочутливими елементами МДН-ємнісних структур та МДН-польових транзисторів з ізольованим каналом. Чутливість приладів складає 1,63 кГц/ppm в діапазоні частот від 438,8 МГц до 434,975 МГц.

6. Запропоновано та досліджено автогенераторні перетворювачі вологості з частотним виходом, конструкція яких базується на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором. В якості первинних елементів перетворення вологості виступають МДН-конденсатор і МДН-польовий транзистор. Конструкція перетворювача спрощена за рахунок використання первинних перетворювачів як активних елементів автогенератора, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Чутливість приладів змінюється від 6,75 кГц/% до 9,18 кГц/% при зміні вологості від 0,1% до 99,9% в діапазоні частот від 525,1 МГц до 577,1 МГц. Розроблено автогенераторний перетворювач вологості з первинними ємнісними вологочутливими елементами на основі сполук NaCl+полімер, $BaCl_2$+полімер, а також ємнісних елементів на основі комплексних сполук. Чутливість приладів складала від 62 кГц/% до 107 кГц/% в діапазоні частот від 0,2 МГц до 4,5 МГц. Запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач вологості на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором з вологочутливим резистором. Чутливість розробленого перетворювача складала від 332,8 кГц/% до 130 кГц/% в діапазоні частот від 822 МГц до 807 МГц.

7. З використанням розроблених автогенераторних приладів вимірювання фізичних величин вперше розроблено конструкцію, структурну схему пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища для спеціалізованих хмарних платформ. В даному рішенні за використанням FPGA Altera Cyclone IV кількість підключених автогенераторних перетворювачів може досягти 256, а при використані FPGA Intel Cyclone 10 складає до 1000 одиниць перетворювачів.

8. Розроблено конструкцію, принцип роботи і структурну схему комп'ютерної системи моніторингу потужних маслонаповнених енергетичних установок, які працюють в реальному масштабі часу. Розроблено принцип роботи, конструкцію, структурну схему багатоканальної комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів спортсмена-весляра академічного веслування, яка призначена для аналізу і визначення основних характеристик системи «човен-весляр» в реальному масштабі часу. Вимірювання проводяться кожні 8-12 мілісекунд паралельно по 50 каналам. На основі багатофакторного аналізу шляхом обробки

даних визначається значимість впливу кожного фактору на фізичну підготовку спортсмена.

9. Розроблено і досліджено багатоканальний пристрій розпізнавання запахів і вимірювання концентрації газів у реальному часі. Прилад має розміри 340x140x180мм, вага складає 2,8 кг разом із батареєю, що дозволяє працювати з приладом як в лабораторії, так і в польових умовах. Пристрій можна підключати до різних мережевих ресурсів як до мережі 220 В, так із використанням батареї. Підключення перетворювача до комп'ютера забезпечується через стандартний роз'єм USB.

10. Розроблено і досліджено схеми, конструкції багатоканальних підривних пристроїв наземного і повітряного типу.

Впровадження результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджено: нові конструктивні та схемотехнічні рішення автогенераторних приладів вимірювання температури, оптичного випромінювання, магнітного поля, концентрації газів, тиску, вологості на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором є базовими елементами радіовимірювальної системи моніторингу маслонаповнених енергетичних установок, що працюють у реальному масштабі часу впроваджено ТОВ «НВП Укртерм», багатоканальний пристрій розпізнавання запахів та концентрації газів у реальному часі впроваджено "Koenig E.Technical Consulting" м. Гамбург ФРН, радіокеровані підриваючі пристрої RKV_6_Ver-1, RKV_6_Ver-2, RKV_6_Ver-3 впроваджено в/ч А7379 та в/ч А7084, радіокеровані боєприпаси на основі автогенераторних перетворювачів впроваджено в/ч А7084, а також у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету на кафедрі Інформаційних радіоелектронних технологій і систем у навчальних дисциплінах «Радіовимірювання», «Радіотехнічні прилади з від'ємним опором», «Сенсори фізичних величин», «Генерування та формування сигналів», «Радіоелектронні системи», а також при виконані курсових, дипломних робіт бакалаврами і магістрами спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, 175 – Інформаційно-вимірювальні технології, 176 – мікро- та наносистемна техніка.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях опублікованих у співавторстві, авторові належать такі результати: [1] – проведено дослідження фотореактивного ефекту в напівпровідникових діодах в динамічному режимі на основі розв'язку рівняння переносу під дією оптичного випромінювання; отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. [2] – отримано аналітичні співвідношення, які описують параметри пилкоподібних і прямокутних імпульсів напруги генераторів Ван-дер-Поля релаксаційного типу, побудованих на біполярних і польових транзисторних структурах з від'ємним диференціальним опором. [3] – досліджено автогенератори на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором для засобів інфокомунікаційних систем, а також розроблена математична модель. [4] – досліджені мікроелектронні частотні перетворювачі магнітного поля на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором. [5] – схемотехнічні рішення перетворювачів газу та розроблено їх математичні моделі. [6] – розроблено лінійні та нелінійні мультифакторні математичні моделі. [7] – досліджено та розроблено магніточутливі перетворювачі. [8] – запропоновано оптимізаційні методи нанесення

фоторезистивних плівок. [9], [10], [11], [12], [13], [14] – розроблено схемотехнічні рішення та отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівнянь чутливості частотних перетворювачів. [15] – розроблено математичну модель магніточутливого тунельно-резонансного діода. [16], [17], [37] – розроблено математичні моделі оптико-частотних перетворювачів з від'ємним опором та проведено експериментальні дослідження. [18], [46] – проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску. [19], [20], [21] – удосконалено математичні моделі частотних перетворювачів та оптимізовано схемотехнічні рішення. [22], [34], [36], [39], [41], [55], [63] – досліджено та розроблено сенсори вологості з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним опором. [23] – досліджено та розроблено сенсори тиску та магнітного поля з частотним виходом. [24] – розроблено схему та удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску на основі тунельно-резонансного діода. [25], [26], [27] – розроблено та досліджено квантові структури з від'ємним опором. [28], [29], [30], [31], [56], [57] – розроблено математичні моделі газореактивного ефекту та просторового заряду та проведені експериментальні дослідження. [32], [33] – досліджено реактивні властивості тунельно-резонансного діода. [35] – розроблено схемотехнічне рішення багатоканального частотоміра на програмованій логічній інтегральній схемі для радіовимірювальної системи. [38] – удосконалено математичну модель сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури. [42], [43], [44], [45], [51], [52], [53], [54] – розроблено математичні моделі та проведені експериментальні дослідження автогенераторних параметричних приладів магнітного поля, температури, оптичного випромінювання, концентрації газу. [47], [48] – запропоновано та досліджено використання негативного зворотного зв'язку на змінному струмі для стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності. [49], [50], [68], [69] – удосконалено багатоканальну радіотехнічну систему на основі FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин. [58] – розроблено математичну модель радіовимірювального частотного параметричного перетворювача тиску з MEMS тензочутливим резистивним елементом. [59] – розроблено схемотехнічне рішення пристрою генерування сигналів з регулярною та хаотичною динамікою. [60], [61] – проведено дослідження залежностей функції перетворення від зміни ємності MEMS- конденсатора та тиску, удосконалено математичну модель частотного перетворювача тиску. [62] – досліджено індуктивності НВЧ діапазону на основі реактивних властивостей транзисторних структур. [63], [64], [65], [66], [67] – удосконалено математичні моделі автогенераторних перетворювачів фізичних величин. [70], [73], [86], [87], [88], [89] – запропоновано застосування принципу перетворення «вологість-частота», введення фазозсувного кола. [71], [72] – запропоновано застосування принципу перетворення «тиск-частота». [74], [75] – запропоновано застосування принципу перетворення «індукція магнітного поля-частота». [76] – запропоновано використання оптичного методу для вимірювання концентрації газу в перетворювачі з частотним виходом. [77], [78], [79], [80] – запропоновано та досліджено схемотехнічне рішення автогенераторних пристроїв. [81], [82] – запропоновано та досліджено введення фазозсувного ланцюга в схемне рішення приладів. [83] – запропоновано використання та схемотехнічне рішення активного індуктивного елементу для

вимірювання рідких і газоподібних речовин. [84], [85] – введено активний елемент в електрично-керовані фільтри низьких та високих частот.

Апробація матеріалів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертації представлені, доповідались та обговорювались на таких міжнародних науково-технічних конференціях: 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine; 10TH International Kharkiv symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves MSMW'2020, UkrMW 2020; 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, Lviv-Slavske, Ukraine; Міжнародна НПК "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання", 2019, м. Івано-Франківськ; Міжнародних науково-технічних конференціях "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВОТТП-2019, ВОТТП-2020, ВОТТП-2021), м.Одеса; International Scientific-Practical Conference "Physical and Technological Problems of Transmission, Processimg and Storage of Information in Infocommunication Systems, PREDT-2019, Chernivtsi; NANO-2019: Limits of Nanoscience and Nanotechnologies (Chisinau, Moldova). Conferința "SPINTECH Summer school “S/F Hybrid Structures for Spintronics”" Chişinău, Moldova; Міжнародних НТК «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектронних наносистем» (СПІРН-2019, СПІРН-2021), м.Вінниця; XXI міжнародна конференція з математичного моделювання, 2020, м. Херсон; Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», 2023, м.Вінниця; Регіональних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів підрозділів університету з участю працівників підприємств м. Вінниці та Вінницької області (ВНТУ-2019, 2020, 2021, 2022, 2023), м.Вінниця.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлено у 89 наукових працях. Серед опублікованих праць: 10 розділів монографії у закордонних виданнях; 28 статей у наукових фахових виданнях України; 14 публікацій у матеріалах, у наукових конференціях, що не входять до переліку фахових видань України з напряму, за яким підготовлено дисертацію; 12 статей у журналах, що включені до міжнародних науковометричних баз даних Scopus; 6 патентів на винахід; 14 патентів на корисну модель; 5 публікацій у матеріалах конференцій, що включені до міжнародних наукометричних баз даних.

Структура та загальний обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу, восьми розділів, висновків по роботі, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 432 сторінок, із них дисертації без додатків – 298 сторінок, 295 рисунків та 10 таблиць, посилання на літературні джерела включає 358 найменувань та займає 32 сторінки, а також 9 додатків на 55 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність проблеми досліджень, показано зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, дається характеристика наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, а також їх впровадження.

У першому розділі зроблено аналіз відомих методів та засобів створення вимірювальних перетворювачів фізичних величин та теоретичних підходів, які покладені в основу їх роботи. На теперішній час бездротові сенсорні мережі (WSN) та віддалені сенсорні системи використовуються як частина важливих галузей таких як соціальне обслуговування населення, військова сфера, моніторинг критичної інфраструктури, моніторинг навколишнього середовища, а також системах збору і обробки інформації. На даний час у світовій практиці практично відсутні автогенераторні вимірювальні пристрої, які одночасно вимірювали та бездротово передавали інформативні сигнали про стан фізичних величин. Це спонукає науковців і дослідників розробляти теоретичні засади, принципи роботи, схеми та конструкції автогенераторних перетворювачів фізичних величин і на їх основі створити пристрої з одночасним вимірюванням у реальному масштабі часу та з бездротовою передачею сигналів про стан тиску, вологості, температури, оптичного випромінювання, магнітного поля, концентрації газового складу тощо. Проведений аналіз відомих методів і засобів створення автогенераторних вимірювальних перетворювачів дозволив визначити мету і задачі досліджень.

Другий розділ присвячено розробці математичних моделей, схем, конструкцій автогенераторних перетворювачів температури на основі квантових і транзисторних структур пристроїв з термочутливими перетворювачами для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем.

Автогенераторні перетворювачі температури з частотним вихідним сигналом базується на основі квантової двобар'єрної гетероструктури, що лежить в основі роботи тунельно-резонансного діода. В таких структурах використовують хвильову природу руху носіїв заряду, тобто явище резонансного тунелювання електронів через послідовно розташовані напівпрозорі потенціальні бар'єри, які розділені квантовими ямами. Основною структурою тунельно-резонансного діода є типова квантова гетероструктура AlAs-GaAs-AlAs.

Математична модель автогенераторного перетворювача температури на базі тунельно-резонансного діода описує залежність резонансної частоти перетворювача від зміни температури. При дії температури на діод змінюється енергія електронів у потенціальних бар'єрах структури і квантовій ямі, що приводить до зміни ефективної маси електронів, а також зміни квантових станів електронів. При зміні температури діода змінюються всі параметри еквівалентної схеми діода, що викликає зміну вихідної частоти автогенераторного перетворювача. Функція перетворення автогенераторного перетворювача, тобто, резонансна частота автогенератора визначається на основі вхідного імпедансу, яка має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(T)}{L^2}}, \qquad (1)$$

Чутливість перетворювача визначається першою похідною функції перетворення (1) за зміною температури. Її розмірність відповідає Гц/^{0}С. Аналітичний вираз функції чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = -\left(R_g(T)\left(\frac{\partial R_g(T)}{\partial T}\right)\right) \Bigg/ \left(2\pi L^2\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_g^2(T)}{L^2}}\right). \qquad (2)$$

Величина чутливості має нелінійний характер і зменшується від 480 кГц/^{0}С до 320 кГц/^{0}С при зміні температури в діапазоні від -150^{0}С до +50^{0}С. В області низьких температур автогенераторний перетворювач має більшу чутливість внаслідок більш різкої зміни від'ємного диференціального опору із зменшенням температури.

Побудовано автогенераторний перетворювач температури з частотним виходом для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем, що складається з транзисторної структури з диференціальним від'ємним опором, в якій термочутливим елементом є біполярний транзистор VT2, одночасно транзистор VT2 виступає як і активний елемент автогенератора, що значно зменшує апаратні затрати. На рис. 1 подано електричну схему перетворювача. Коливальний контру перетворювача утворений ємнісною складовою повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та пасивної індуктивності L1. Енергія від'ємного диференціального опору компенсує втрати енергії в коливальному контурі автогенераторного перетворювача. При зміні температури, яка діє на термочутливий біполярний транзистор VT2 відбувається зміна ємнісної складової повного опору на виводах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та диференціального від'ємного опору, що змінює вихідну частоту перетворювача температури.

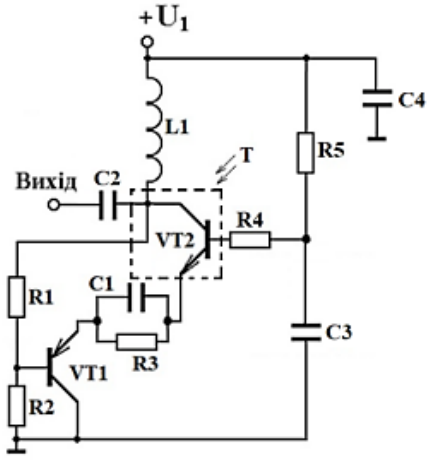


Рисунок 1 – Електрична схема автогенераторного перетворювача

Розроблено математичну модель автогенераторного перетворювача температури (рис.1), на базі якої отримано аналітичну залежність функції перетворення, яка описується формулою (3) і має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2}\left[\frac{U_{\sim}^2 W_p p_p e^{\frac{E_g - qU}{k_B T}}}{\eta A S \mu_n t k_B T^4 U_B L} - \frac{U_{\sim}^4 W_p^2 p_p^2 e^{\frac{2(E_g - qU)}{k_B T}}}{\eta^2 A^2 S^2 \mu_n^2 t^2 k_B^2 T^8 U_B^2 R_g^2}\right]^{1/2}, \quad (3)$$

де $U_{\sim}$ – змінна вихідна напруга, W_p – товщина бази біполярного термочутливого транзистора VT2, p_p – концентрації носіїв заряду (дірок) у базі VT2, E_g – заборонена зона напівпровідника VT2, q – заряд електрона, U – постійна напруга живлення емітера VT2, k_B – стала Больцмана, T – температура, η – коефіцієнт корисної дії перетворювача, A – стала величина, яка залежить від добутку квантових станів електронів у зоні провідності напівпровідникового матеріалу і дірок валентній зоні VT2, S – площа перерізу бази VT2, t – період коливань вихідної напруги, μ_n – рухливість електронів, U_B – напруга на базовій області VT2, L – індуктивність контуру, R_g – від'ємний диференціальний опір у робочій точці структури перетворювача. Теоретичні та експериментальні дослідження функції перетворення показано на рис. 2. Функція чутливості перетворювача визначається першою похідною за параметром температури функції перетворення (3) і описується виразом (4)

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[U_{\sim}^2(T)T^{-4}\mu_n^{-1}(T)e^{\frac{E_g-qU}{k_BT}}b_5 - U_{\sim}^4(T)T^{-8}\mu_n^{-2}(T)e^{\frac{2(E_g-qU)}{k_BT}}b_6\right]^{-1/2} \times$$

$$\times\left[\left(2U_{\sim}(T)\frac{dU_{\sim}(T)}{dT}T^{-4} - 4T^{-5}U_{\sim}^2(T)\right)\mu_n^{-1}(T)e^{\frac{E_g-qU}{k_BT}} + \left(-\mu_n^{-2}(T)\frac{d\mu_n(T)}{dT}e^{\frac{E_g-qU}{k_BT}} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - e^{\frac{E_g-qU}{k_BT}}\frac{E_g-qU}{k_B}\mu_n^{-1}(T)U_{\sim}^2(T)T^{-4}\right)\right]b_5 - \left[\left(U_{\sim}^3(T)\frac{dU_{\sim}(T)}{dT}T^{-8} - 8U_{\sim}^4(T)T^{-9}\mu_n^{-2}(T)e^{\frac{2(E_g-qU)}{k_BT}}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(-2\mu_n^{-3}(T)\frac{d\mu_n(T)}{dT}e^{\frac{2(E_g-qU)}{k_BT}} - e^{\frac{2(E_g-qU)}{k_BT}}\frac{2(E_g-qU)}{k_B}T^{-2}\mu_n^{-2}(T)U_{\sim}^4(T)T^{-8}\right)\right]b_6 . \quad (4)$$

Графіки теоретичної та експериментальної залежності функції чутливості від зміни температури подано на рис. 3. Як видно з графіка (рис. 3), чутливість автогенераторного перетворювача температури складає від 11,25кГц/^{0}С до 21,5кГц/^{0}С в діапазоні вимірюваної температури від 0^{0}С до 100^{0}С.

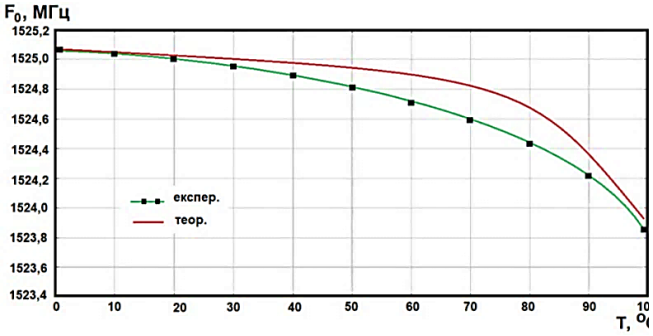


Рисунок 2 – Теоретична та експериментальна залежність функції перетворення перетворювача від температури

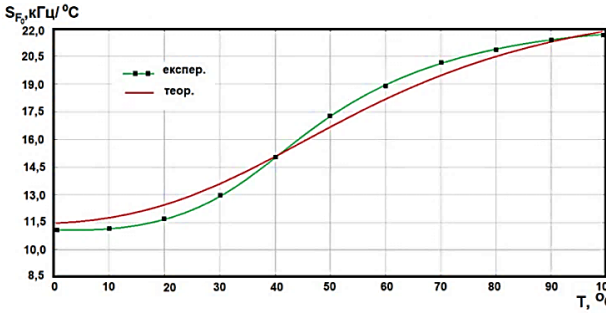


Рисунок 3 – Теоретична та експериментальна залежність функції чутливості перетворювача від температури

Оскільки автогенераторний перетворювач температури побудований на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором і може працювати в широкому діапазоні частот, було проведено експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач під час побудови комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем загального та спеціального призначення.

В роботі запропоновано електричні схеми, конструкції, розроблено математичну модель і досліджено основні характеристики автогенераторного перетворювача для вимірювання температури на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором з використанням в якості первинного перетворювача температури терморезистора для зменшення апаратних затрат при побудові комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем і мереж. Як показали теоретичні і експериментальні дослідження чутливість складала від 1,58 кГц/^{0}С до 1,2 кГц/^{0}С. Також було розроблено і досліджено автогенераторний перетворювач вимірювання температури на основі транзисторних структур з

термочутливим діодом. Проведені дослідження показали, що чутливість перетворювачів змінювалась від 1,81 кГц/^{0}С до 2,35 кГц/^{0}С.

Третій розділ присвячено розробці математичних моделей, електричних схем, конструкцій, опису їх роботи, експериментальних та теоретичних досліджень основних характеристик і вплив параметрів первинних оптичних перетворювачів і параметрів автогенераторів на функції перетворення і чутливості автогенераторних перетворювачів оптичної потужності випромінювання для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем.

Запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач для вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі двобар'єрних квантових гетероструктур, які є базою створення тунельно-резонансних діодів, що дозволяє значно зменшити апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Квантова двобар'єрна гетероструктура складається з епітаксіальних шарів напівпровідникових матеріалів InGaAs/AlAs товщиною 10нм. На квантову двобар'єрну структуру з двох сторін напилюються нелеговані фотопровідні шари InAlAs і InGaAs. При дії світлового імпульсу, який падає на тунельно-резонансну структуру, що працює у режимі пікової напруги, утворюються додаткові фотозаряди: дірки у валентній зоні і електрони у зоні провідності.

Математична модель опису роботи оптичного перетворювача базується на принципі перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача, що дозволяє отримати параметричну залежність вихідної частоти перетворювача від параметрів тунельно-резонансного діода і параметрів автогенератора. Для цього визначено коефіцієнт корисної дії перетворювача. Спочатку енергія оптичного випромінювання перетворюється в енергію постійного електричного поля, яка є вхідною енергією для автогенератора. В подальшому енергія постійного електричного поля в тунельно-резонансному діоді перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю коливального контуру автогенератора. Коефіцієнт корисної дії оптичного перетворювача визначається відношенням

$$K = \frac{P_{out}}{P_{in}} \ , \tag{5}$$

де P_{in} і P_{out}, відповідно вхідна і вихідна потужність оптичного перетворювача. Вхідна потужність визначається виразом

$$P_{in} = I_{\Phi}^2 R_g = \frac{q^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g}{(h\nu)^2} \ , \tag{6}$$

q – заряд електрона, η_i – квантовий вихід фотоіонізації фотоелектронів і фотодірок, Φ – оптичне випромінювання, b – коефіцієнт поглинання фотонів, V – об'єм тунельно-резонансного діода, $h\nu$ – енергія фотонів. Вихідна потужність перетворювача описується формулою

$$P_{out} = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2}{2t} \ , \tag{7}$$

де C_{ekv} – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, t – період коливань вихідної напруги. Коефіцієнт корисної дії перетворювача приймає вигляд

$$K = \frac{C_{ekv} U_{\sim}^2 (h\nu)^2}{2tq^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g} \ . \tag{8}$$

З формули (8) визначаємо C_{ekv}, яке описується виразом

$$C_{ekv} = \frac{2Ktq^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g}{U_{\sim}^2 (h\nu)^2} \ . \tag{9}$$

Параметрична залежність резонансної частоти F_0 від параметрів самого тунельно-резонансного діода і автогенератора описується виразом

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_{\sim}^2 (h\nu)^2}{2LKtq^2 \eta_i^2 \Phi^2 b^2 V^2 R_g} - \frac{R_g^2}{L^2} \right]^{1/2} \ . \tag{10}$$

На рис. 4 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення оптичного перетворювача. Чутливість автогенераторного перетворювача визначається похідною функції (10) за параметром інтенсивності світла Ф.

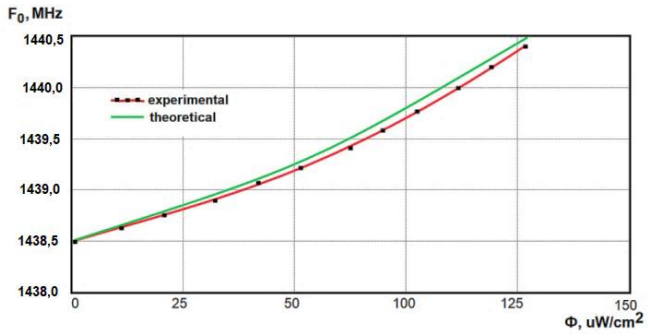


Рисунок 4 – Залежність функції перетворення перетворювача від оптичної потужності

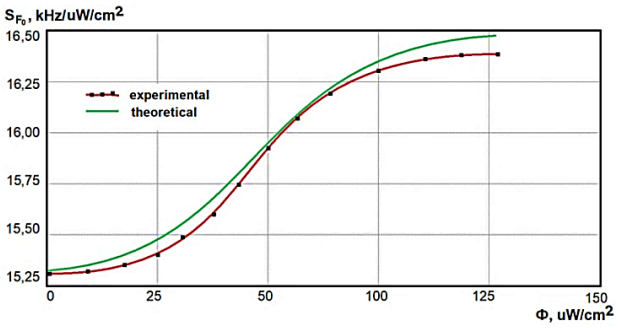


Рисунок 5 – Залежність функції чутливості перетворювача від оптичної потужності

Як показують експериментальні дослідження вихідна змінна напруга $U_{\sim}$ також залежить від інтенсивності світла, що необхідно врахувати при визначенні чутливості. Отже, функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_{\sim}^2(\Phi) \Phi^{-2} R_g^{-1}(\Phi) m_1 - R_g^2(\Phi) m_2 \right]^{-1/2} \times \left\{ \left[(2U_{\sim}(\Phi) \frac{dU(\Phi)}{d\Phi} \Phi^{-2} - 2\Phi^{-3} U_{\sim}^2(\Phi)) \times \right. \right.$$
$$\left. \left. \times R_g^{-1}(\Phi) - R_g{}^{-2}(\Phi) \frac{dR_g(\Phi)}{d\Phi} U_{\sim}^2(\Phi) \Phi^{-2} \right] m_1 - 2R_g(\Phi) \frac{dR_g(\Phi)}{d\Phi} m_2 \right\}. \tag{11}$$

На рис. 5 подано розрахункову та експериментальну залежність функції чутливості від дії оптичної потужності на прилад. Як видно з графіка (рис. 5), чутливість перетворювача змінюється від 15,27 кГц/мкВт/см^2 до 16,37 кГц/мкВт/см^2 при зміні вимірювальної потужності від 0 мкВт/см^2 до 100 мкВт/см^2 в діапазоні частот від 1438,5 МГц до 1440,5 МГц.

В роботі запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач для вимірювання оптичної потужності, в якій фоточутливим елементом є фоторезистор, що також зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. На рис. 6 представлено електричну схему автогенераторного оптичного перетворювача. Вона складається з біполярного

транзистора VT1 і арсінід-галійового польового транзистора VT2. На електродах колектор-стік існує від'ємний диференціальний опір, що відповідає спадній ділянці вольт-амперної характеристики перетворювача.

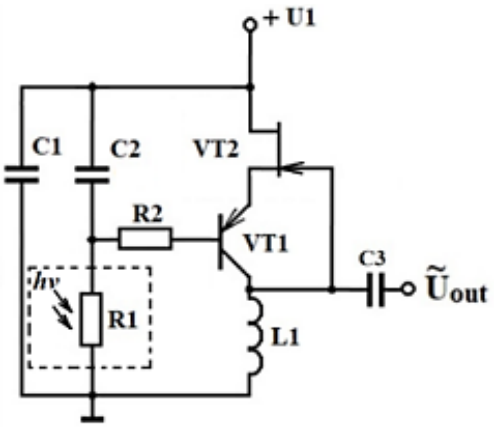


Рисунок 6 – Електрична схема автогенераторного оптичного перетворювача

Коливальний контур утворений пасивною індуктивністю L1 і ємністю повного опору, який існує на електродах колектора біполярного транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2. Під час дії світла на фоторезистор R1 здійснюється зміна активної та реактивної складових повного опору на електродах колектор-стік пристрою, що викликає зміну вихідної частоти автогенераторного оптичного перетворювача. На основі принципу перетворення енергії оптичного випромінювання в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача розроблено математичну модель, з якої отримано функцію перетворення і чутливості. Функція перетворення описується формулою

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2 h\nu}{2Ktq\eta_i A\Phi aLVU_\Phi} - \frac{U_{\sim}^4 (h\nu)^2}{4K^2t^2q^2\eta_i^2A^2\Phi^2R_g^2a^2V^2U_\Phi^2}\right]^{1/2}. \qquad (12)$$

На рис. 7 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення оптичного перетворювача.

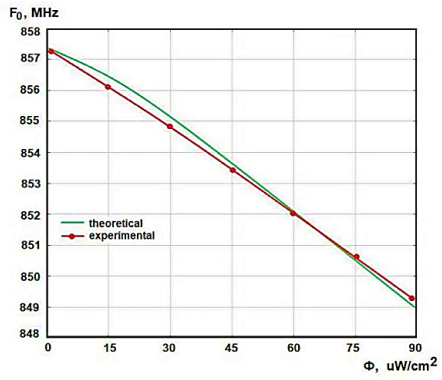


Рисунок 7 – Залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення від оптичної потужності

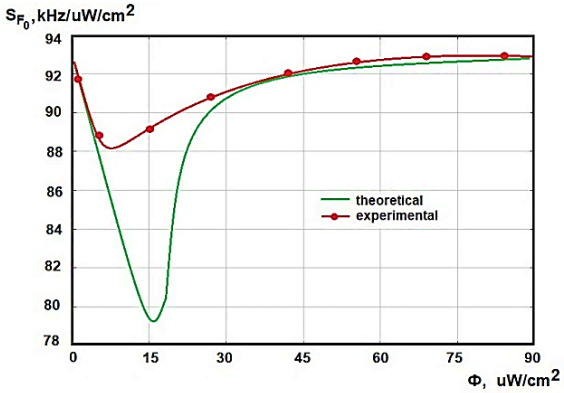


Рисунок 8 – Розрахункова та експериментальна залежність функції чутливості перетворювача від оптичної потужності

Графік чутливості перетворювача подано на рис. 8. Як видно з графіка (рис.8), чутливість в діапазоні від 0 мкВт/см^2 до 90 мкВт/см^2 складала 88,1кГц/мкВт/см^2 до 93,5кГц/мкВт/см^2 в інтервалі частот від 857,5МГц до 849,3МГц. Частотний діапазон оптичного перетворювача обрано від 848МГц до 869МГц, що відповідає типу частот РІ42-3. Цей діапазон використовується для неспеціалізованих пристроїв короткого радіусу дії, в першу чергу для дистанційного управління, телеметрії, телеуправління та сигналізації.

Для подальшого покращення метрологічних параметрів було запропоновано, досліджено і розроблено математичні моделі, схеми, конструкції автогенераторних оптичних перетворювачів для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинним фоточутливим перетворювачем типу фотодіода, біполярного і польового транзисторів. Як показали теоретичні і експериментальні дослідження, чутливість перетворювачів з фоточутливим діодом складала від 125,2 кГц/мкВт/см^2 до 134,8 кГц/мкВт/см^2 в діапазоні частот від 861,5 МГц до 849,5 МГц.

Автогенераторні перетворювачі оптичної потужності з фоточутливими елементами на базі біполярних і польових транзисторів мали чутливість, яка змінювалась від 151,3 кГц/мкВт/см^2 до 215 кГц/мкВт/см^2 в інтервалі зміни оптичної потужності від 0 мкВт/см^2 до 90 мкВт/см^2 в діапазоні частот від 864,2 МГц до 844,8 МГц. Проведено експериментальне дослідження основних характеристик електричних схем автогенераторних перетворювачів вимірювання оптичної потужності за допомогою аналізатора радіочастотного спектру TinySA ULTRA та подано їх графіки в діапазоні частот від 50 кГц до 3,6 ГГц.

У четвертому розділі на основі принципу перетворення енергії магнітного поля у змінне електричне поле у автогенераторних перетворювачах магнітного поля розроблено їх схеми, конструкції, математичні моделі, на базі яких отримано аналітичні вирази функцій перетворення і чутливості, проведено експериментальні дослідження характеристик приладів, які підтвердили справедливість теоретичних положень.

Запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач вимірювання магнітної індукції на основі тунельно-резонансного діода, базовою структурою якого є квантова двобар'єрна гетероструктура, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Структура перетворювача складається з плівки арсеніду галію GaAs нанометрової довжини, на яку з двох сторін нанесено нанометровий шар алюмінату арсеніду галію AlGaAs з більш широкою забороненою зоною. На алюмінат арсеніду галію з однієї та другої сторін напилюється n^+-GaAs, що служить емітером і колектором, всі шари плівок розташовані на підкладці з GaAs. В об'ємних 3D кристалах під дією магнітного поля B енергія електронів квантується тільки у площині, яка перпендикулярна до B, проте у двовимірних електронних системах енергетичний спектр квантується повністю. Електрична схема автогенераторного перетворювача магнітної індукції така ж сама як і для вимірювання температури, тільки замість дії температури на прилад діє магнітна індукція B. При врахуванні в еквівалентній схемі власних параметрів індуктивності L, ємності C тунельно-резонансного діода, функція перетворення приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C^3R_g^4(B){R_l}^2 + CR_g^2(B)L^2 - R_g^4(B)C^2L + A}{2C^3R_g^4(B)L^2}}\ , \qquad (13)$$

де

$$A = \sqrt{\left(C^3R_g^4(B){R_l}^2 + CR_g^2(B)L^2 - R_g^4(B)C^2L\right)^2 - 4C^3R_g^4(B)L^2\left(CR_g^2(B){R_l}^2 - R_g^2(B)L\right)}\ .$$

На рис. 9 подано теоретичні та експериментальні залежності функції перетворення автогенераторного перетворювача від дії індукції магнітного поля.

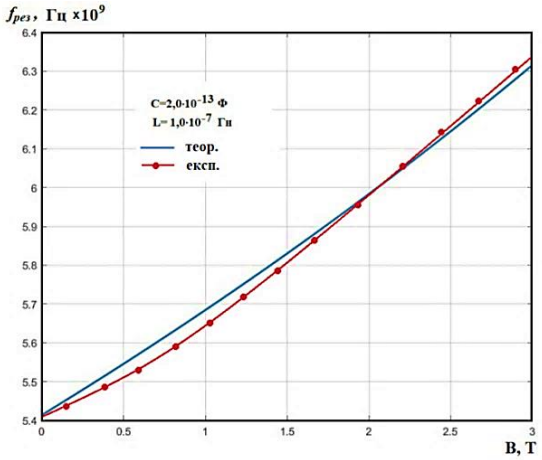


Рисунок 9 – Теоретичні та експериментальні залежності функції перетворення від магнітної індукції

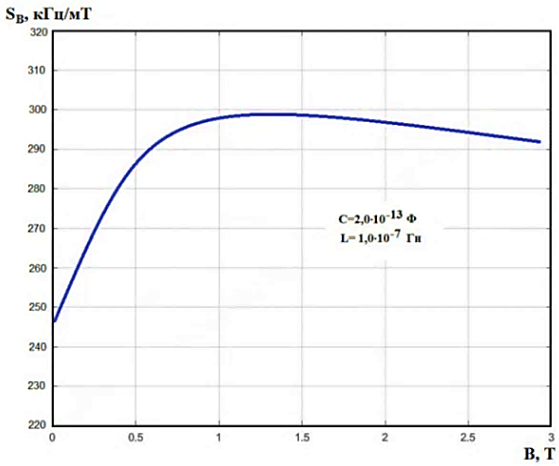


Рисунок 10 – Залежність функції чутливості перетворювача від магнітної індукції

Функція чутливості визначається першою похідною виразом (13) за параметром *B*. Вона має складний та нелінійний характер і її подано на рис. 10. Як видно з графіка (рис.10), величина чутливості змінюється від 250 кГц/мТ до 300 кГц/мТ, оптимальною ділянкою зміни функції чутливості, коли зміна чутливості складає 10 кГц/мТ, є діапазон зміни індукції магнітного поля від 0,1 Тл до 3 Тл.

Запропоновано і досліджено автогенераторний перетворювач магнітного поля на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором з магніточутливим елементом Холла для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем та мереж загального та спеціального призначення.

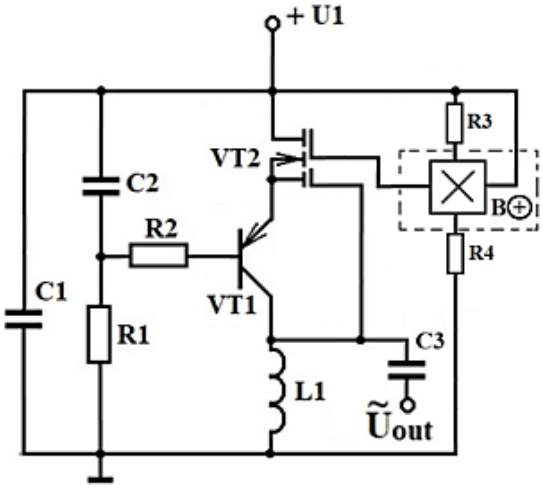


Рисунок 11 – Електрична схема автогенераторного перетворювача магнітного поля

Пристрій складається з біполярного VT1 і польового VT2 транзисторів, опорів R1-R4, ємностей C1-C3. Коливальний контур перетворювача утворений на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах стоку польового двозатворного транзистора VT2 і колектора біполярного транзистора VT1 та пасивної індуктивності L1 (рис.11). На елемент Холла діє магнітне поле, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру, так і від'ємного диференціального опору на виході перетворювача, що викликає зміну вихідної частоти автогенератора. На основі математичної моделі, в основі якої лежить метод перетворення енергії постійного електричного поля на вході пристрою у енергію змінного електричного поля на виході, розраховано функцію перетворення, яка описується формулою

$$F_o = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{dqnU_{\sim}^2}{2\eta tI \cdot I_x BL} - \frac{U_{\sim}^4 d^2 (qn)^2}{4t^2\eta^2 R_g^2 (I \cdot I_x)^2 B^2}\right]^{1/2}. \qquad (14)$$

де d – товщина напівпровідникової пластини, n – концентрація електронів у пластині, $U_{\sim}$ – вихідна напруга, η – коефіцієнт корисної дії перетворювача, t – період коливань вихідної напруги, I – струм, який протікає через напівпровідникову пластину, I_x – струм, який створює Холлівська напруга, B – індукція магнітного поля, R_g – від'ємний опір у коливальній системі автогенератора, L – індуктивність коливального контуру. На рис.12 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функцій перетворення автогенераторного перетворювача.

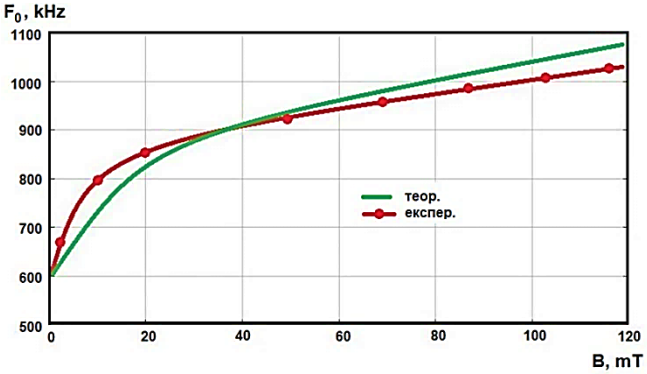


Рисунок 12 – Залежність функції перетворення перетворювача від магнітної індукції

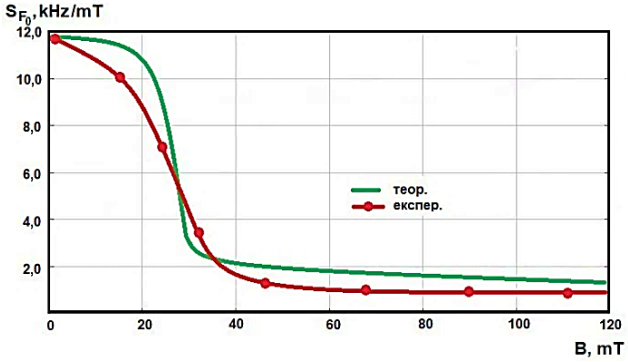


Рисунок 13 – Залежність функції чутливості перетворювача від магнітної індукції

Функція чутливості описується виразом (15) при врахуванні також залежності вихідної напруги від магнітної індукції

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[b_1 B^{-1} U_{\sim}^2(B) - b_2 B^{-2} U_{\sim}^4(B)\right]^{-1/2}\left[\left(2b_1 U_{\sim}(B) B^{-1}\frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - U_{\sim}^2(B) b_1 B^{-2}\right) + \right.$$
$$\left. + \left(2b_2 B^{-3} U_{\sim}^4(B) - 4b_2 U_{\sim}^3(B) B^{-2}\frac{dU_{\sim}(B)}{dB}\right)\right]. \qquad (15)$$

Графік чутливості перетворювача подано на рис. 13.

Розроблено і досліджено схеми, конструкції, математичні моделі приладів вимірювання магнітної індукції на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, в яких магніточутливими елементами виступали магніторезистор, магнітодіод, магніточутливий біполярний транзистор та магніточутливий польовий транзистор, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активний індуктивний елемент на основі транзистора з фазозсуваючим RC-колом. У приладах з магніточутливим резистором і магніточутливим діодом чутливість змінювалась від 1,0 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ при зміні магнітної індукції 0,1 мТ до 120 мТ на частотах від 500 кГц до 1500 кГц. На основі досліджень показано, що у приладах з магніточутливими біполярним та польовим транзисторами чутливість змінювалась від 9,255 кГц/мТ до 12,4 кГц/мТ при зміні індукції від 0 до 120 мТ в діапазоні частот від 471,625 МГц до 472,750МГц. Показано, що ширина спектру

передачі вихідного сигналу приладів магнітного поля без зміни індукції магнітного поля складає 10 кГц в діапазоні WH711C (426 МГц – 473 МГц) при вибраному каналі 472,05 МГц при напрузі живлення 5В. При зміні індукції магнітної індукції від 0 мТ до 120 мТ ширина спектру збільшується до 1400 Гц.

У п'ятому розділі розроблено математичні моделі, схеми, конструкції, теоретичні і експериментальні дослідження автогенераторних перетворювачів вимірювання тиску для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем з тензочутливими елементами на основі тунельно-резонансного діода, тензорезистора, тензодіода, тензотранзисторів.

Тунельно-резонансний діод завдяки своїм високочастотним властивостям і від'ємному диференціальному опору створює можливість використання його як перетворювача тиску з частотним виходом, причому дослідження його характеристик знаходиться на початковому етапі. Для теоретичних розрахунків і експериментального дослідження тунельно-резонансний діод мав такі параметри: просторовий шар емітера n^+-GaAs - 7,6 нм, потенціальний бар'єр на стороні емітера AlAs-5нм, квантова яма – 6нм, потенціальний бар'єр збоку колектора AlAs - 5нм, просторовий шар колектора n^+-GaAs - 5нм, площа структури – 25 мкм^2. Основним фактором, що змінює параметр тунельно-резонансного діода, є деформаційна зміна ширини забороненої зони. Під дією зовнішнього тиску на прилад змінюється як ефективна маса електронів, так і генерація п'єзоелектричних полів у квантовій ямі та потенціальних бар'єрах структури діода. Це приводить до зміни розташування енергетичних рівнів у квантовій ямі. Це у свою чергу, змінює частоту електричних коливань у приладі тиску. На основі аналітичних формул для омічного опору R, індуктивності L, ємності C і диференціального опору R_g визначено їх зміну від прикладеного тиску. Аналіз і розрахунки отриманих формул показав, що зміна тиску має найбільший вплив на диференціальний від'ємний опір. Функція перетворення автогенераторного перетворювача тиску визначається за формулою для повного вхідного опору.

Конструкція перетворювача складається з мембрани, яка витравлена на кремнієвій підкладці. На мембрані вбудований тунельно-резонансний діод. Твердотільна ємність, індуктивність і резистор створюються на підкладці поруч з мембраною. Резистор забезпечує живлення сенсора постійною напругою. Товщина мембрани визначає діапазон вимірювального тиску. Величина чутливості коливається від 1,15 кГц/Па·10^5 до 14,16 кГц/Па·10^5 у діапазоні тисків від 50·10^5 Па до 350·10^5 Па в інтервалі частот від 1,48 МГц до 1,52 МГц.

Подальше покращення метрологічних параметрів автогенераторних перетворювачів для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем можливо отримати на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з використанням у якості первинного перетворювача тензорезистивного діода. Електрична схема автогенераторного перетворювача тиску подано на рис.14.

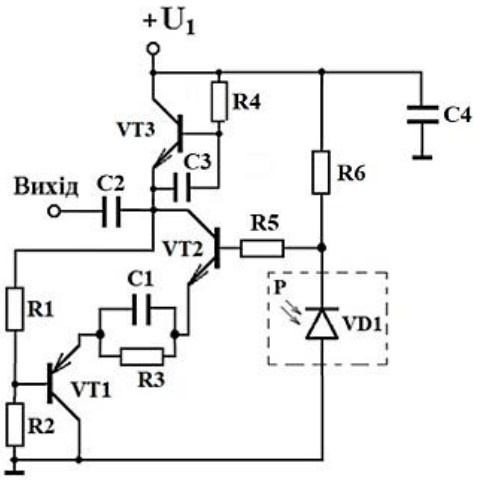


Рисунок 14 – Електрична схема перетворювача тиску з активним індуктивним елементом

Принцип роботи схеми аналогічний роботі схеми, яка подана на рис. 1. Замість ємності С1 включено тензочутливий діод SS316L, а також замість пасивної індуктивності L1 включено активний індуктивний елемент на основі транзистора VT3 з фазозсуваючим колом R4C3. Виникнення індуктивних властивостей у біполярних транзисторах обумовлено кінцевою швидкістю руху носіїв заряду у базовій області. Включення зовнішнього R4C3 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, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах загального та спеціального призначення.

При дії тиску на тензодіод змінюється рухливість носіїв заряду і ширина забороненої зони напівпровідника. Максимальну тензочутливість можна отримати при узгодженій зміні рухливості $\mu_{реф}(P)$ і зміни ширини $\Delta E_{gеф}(P)$ забороненої зони відносно струму. Тензодіоди мають більшу чутливість у порівнянні з тензорезисторами, оскільки у них змінюються два параметри від тиску. Згідно розробленої математичної моделі перетворювача тиску функція перетворення, яка залежить від тиску, а також від параметрів тензодіода і параметрів автогенератора, описується формулою

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2}{2\eta t\left[\frac{qkT\mu_{еф}}{\tau_p}\right]^{1/2} p_n \exp\left(-\frac{\Delta E_{gеф}}{kT}\right) LU_g S} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2\left[\frac{qkT\mu_{еф}}{\tau_p}\right] p_n^2 \exp\left(-\frac{2\Delta E_{gеф}}{kT}\right) R_g^2 U_g^2 S^2}\right]^{1/2}. \quad (16)$$

де U_g – напруга на тензодіоді, S – площа перерізу напівпровідника тензодіода.

На рис. 15 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії тиску.

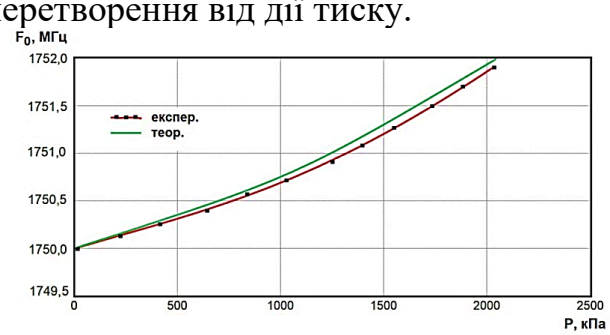


Рисунок 15 –Залежності функції перетворення перетворювача від тиску

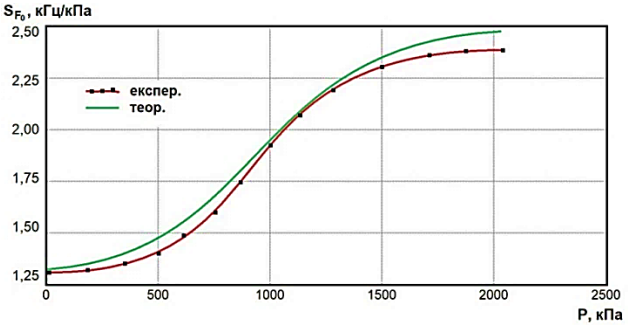


Рисунок 16 – Залежності функції чутливості перетворювача від дії тиску

Як видно з графіка (рис.15), вихідна частота змінюється від 1750 МГц до 1752 МГц при зміні тиску від 0 кПа до 2050 кПа. Функція чутливості визначається на основі виразу (21), при цьому вважається, що вихідна напруга також залежить від тиску. Отже, функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[U_{\sim}^2(P)e^{\frac{\Delta E_{geф}(P)}{kT}}\mu_{eф}^{-1/2}(P)a_7 - U_{\sim}^4(P)e^{\frac{2\Delta E_{geф}(P)}{kT}}\mu_{eф}^{-1}(P)a_8\right]^{-1/2}\left[a_7\left[-\frac{1}{2}\mu_{eф}^{-3/2}(P)U_{\sim}^2(P)\frac{d\mu_{eф}(P)}{dP}e^{\frac{\Delta E_{geф}(P)}{kT}}\times\right.\right.$$

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

$$\left.\left.+2e^{\frac{2\Delta E_{geф}(P)}{kT}}\frac{1}{kT}\frac{dE_{geф}(P)}{dP}\right]\mu_{eф}^{-1}(P)-\mu_{eф}^{-2}(P)\frac{d\mu_{eф}(P)}{dP}U_{\sim}^4(P)e^{\frac{2\Delta E_{geф}(P)}{kT}}\right), \qquad (17)$$

На рис.16 подано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості перетворювача від дії тиску. Як видно з графіка (рис.16), чутливість перетворювача змінювалась від 1,31 кГц/кПа до 2,45 кГц/кПа в діапазоні тисків від 0 кПа до 2050 кПа. Частотний діапазон автогенераторних перетворювачів тиску на основі транзисторних мікроелектронних структур з первинними тензочутливими елементами типу тензорезистора і тензодіода обрано в LTE Band 3 (DCS-1800) Uplink: 1710–1785 МГц. Стандарт використовує частотний діапазон 1800МГц, що збігається з діапазоном GSM-мереж.

Шостий розділ присвячено розробці математичних моделей, схем, конструкцій автогенераторних перетворювачів вимірювання концентрації газу для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем на основі мікроелектронних транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором.

Теоретичні та експериментальні дослідження при створенні автогенераторних перетворювачів вимірювання концентрації газу з частотним вихідним сигналом показали, що при дії газу на первинний напівпровідниковий газочутливий перетворювач змінюється не тільки опір перетворювача, а також і ємність. Зміна реактивної складової повного опору первинного газочутливого перетворювача приводить до значної зміни вихідної частоти автогенераторного перетворювача газу. Зразок напівпровідника, на основі якого зроблено газові сенсори, за нормальними умовами повинен бути електрично нейтральним. Звідси витікає, що поверхневий заряд $Q_{пов}$ повинен бути скомпенсованим рівним за величиною і зворотнім за знаком зарядом в приповерхневому шарі напівпровідника. Як показали експериментальні дослідження, залежність ємності газового перетворювача від зміни концентрації метану, що діє на перетворювач, підтверджує теоретичний хід зміни ємності від зміни поверхневого потенціалу в межах від одиниць до десятків пікофарад.

Проведено дослідження характеристик автогенераторного перетворювача вимірювання концентрації газу з первинним газочутливим резистором для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем. На основі методу перетворення енергії постійного електричного поля у газочутливому резисторів в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача розроблено математичну модель, на основі якої отримано функції перетворення і чутливості. Перетворювач побудовано на базі двох біполярних транзисторів з різними типами

провідності базових областей, що дозволило отримати вольт-амперну характеристику із спадною ділянкою, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Спадній ділянці ВАХ відповідає від'ємний диференціальний опір, що компенсує втрати енергії у коливальній системі автогенератор. Функція чутливості має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2 q n_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1}+\alpha)^{1/2} e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}}}{4\eta t I_p^2 L} - \frac{U_{\sim}^4 q^2 n_i^2 \mu_{ns}^2 L_D^2 (\gamma^{-1}+\alpha) e^{\varphi_{sn}(W)}}{16\eta^2 t^2 I_p^4 R_g^2}\right]^{1/2}. \qquad (18)$$

де $\alpha = \Delta n / n_i = \Delta p / n_i$ – безрозмірний коефіцієнт рівня інжекції зарядів, $\gamma = (p_0 / n_0)^{1/2} = p_0 / n_i = n_i / n_0$ – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує об'ємні властивості напівпровідника, I_p – струм газочутливого резистора. Отримана формула (18) дозволяє простим шляхом розраховувати функцію перетворення перетворювача, ніж складним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми пристрою на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа, що значно зменшує апаратні затрати при розрахунках в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. На рис. 17 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної кривих функції перетворення при зміні концентрації водню (H_2).

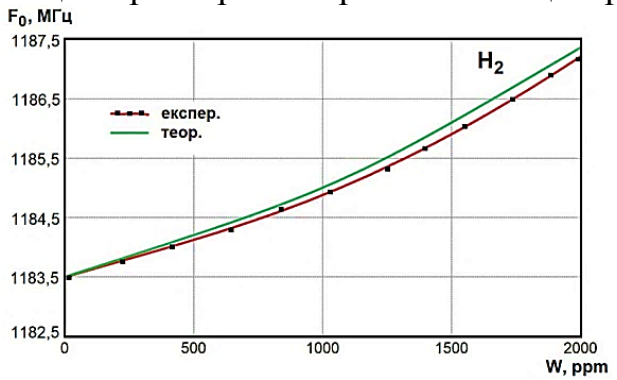


Рисунок 17 – Залежність функції перетворення перетворювача від концентрації газу

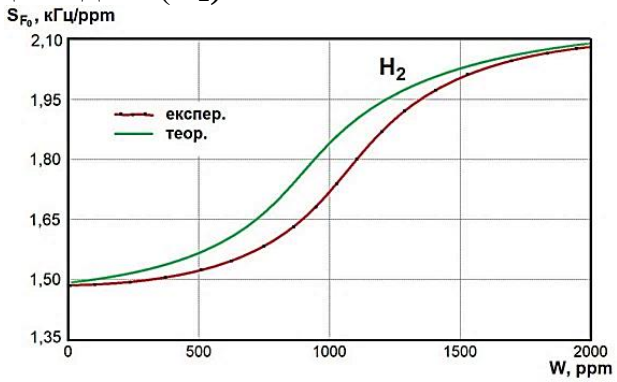


Рисунок 18 – Залежність функції чутливості перетворювача від зміни концентрації газу

Чутливість перетворювача визначається на основі функції (18) першою похідною за параметром W. Функція чутливості описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[a_5 U_{\sim}^2(W) e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} - a_6 U_{\sim}^4(W) e^{\varphi_{sn}(W)}\right]^{1/2} \times \left[\left(2a_5 U_{\sim}(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW} e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{1}{2} a_5 U_{\sim}^2(W)\frac{d\varphi_{sn}(W)}{dW} e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}}\right) - \left(4a_6 U_{\sim}^3(W) e^{\varphi_{sn}(W)}\frac{dU_{\sim}(W)}{dW} + a_6 U_{\sim}^4(W) e^{\varphi_{sn}(W)}\frac{d\varphi_{sn}(W)}{dW}\right)\right]. \qquad (19)$$

Графічна залежність функції чутливості перетворювача від концентрації газу подано на рис. 18. Як видно з графіка (рис. 18), чутливість перетворювача від концентрації газу в інтервалі від 0 ppm до 2000 ppm змінюється від 1,48 кГц/ppm до 2,05 кГц/ppm в діапазоні частот від 1183,5 МГц до 1187,2 МГц.

Для підвищення чутливості перетворювачів газу з частотним виходом в якості первинного газочутливого елемента необхідно обрати контакт металу з напівпровідником, причому в якості металу обирається паладій, золото, платина.

Такі контакти обрали назву діодів Шотткі. Їх висока чутливість до водневих сполук пояснюється тим, що зворотній струм діодів експоненціально залежить від висоти бар'єру Шотткі, який однозначно зв'язаний з концентрацією газу на базі водневих сполук. Електрична схема пристрою для вимірювання концентрації з частотним виходом подана на рис. 19.

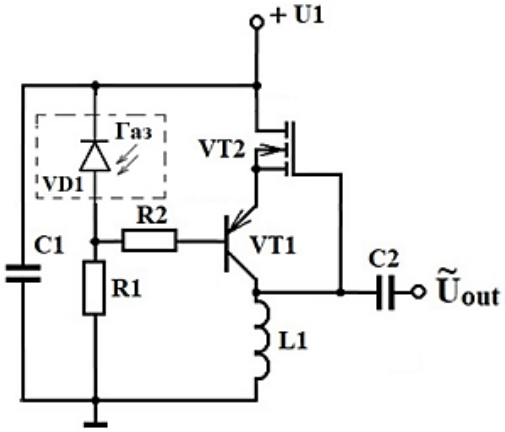


Рисунок 19 – Електрична схема перетворювача для вимірювання концентрації газу

Вона будується на основі мікроелектронної структури з диференціальним від'ємним опором, в якій газочутливим елементом є діод Шотткі VD1. Автогенераторний перетворювач вимірювання газу складається з біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2, резисторів R1-R2, конденсаторів C1-C2 та пасивної індуктивності L1. На основі перетворення енергії постійного електричного поля у змінне електричне поле на виході перетворювача розроблена його математична модель, на основі якої отримана функції перетворення і чутливості. Функція чутливості залежить від концентрації газу, а також від параметрів газочутливого діода Шотткі та параметрів автогенератора, вона описується формулою

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2 e^{-\frac{q\varphi_K(W)}{kT}}}{2\eta S t q \mu_p p_0 E_0 U_{zv} L} - \frac{U_{\sim}^4 e^{-\frac{2q\varphi_K(W)}{kT}}}{4\eta^2 S^2 t^2 q^2 \mu_p^2 p_0^2 E_0^2 U_{zv}^2 R_g^2}\right]^{1/2}. \qquad (20)$$

де E_0 – напруженість електричного поля у діоді, $U_{зв}$ – зворотня напруга на діоді, φ_K – висота бар'єру Шотткі. Нарис. 20 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від дії концентрації водню (H_2) в діапазоні від 0 ppm до 2000 ppm.

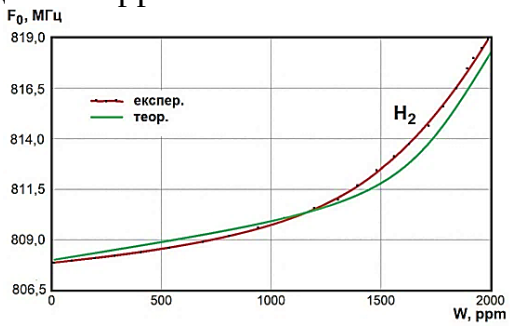


Рисунок 20 – Залежність функції перетворення перетворювача від зміни концентрації газу

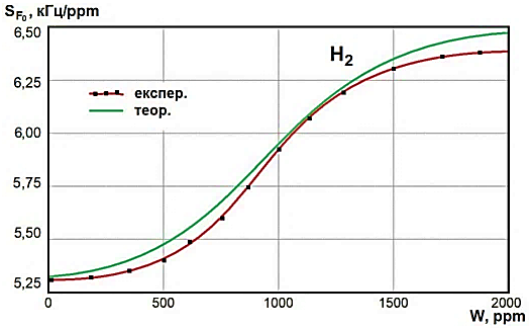


Рисунок 21 – Залежність функції чутливості перетворювача від концентрації газу

Функція чутливості визначається на основі виразу (20), при цьому вихідна напруга також залежить від W, отже функція чутливості має вигляд

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi}\left[U_{\sim}^2(W)e^{-\frac{q\varphi_K(W)}{kT}}a_7 - U_{\sim}^4(W)e^{-\frac{2q\varphi_K(W)}{kT}}a_8\right]^{-1/2} \times \left[\left(2U_{\sim}(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}e^{-\frac{q\varphi_K(W)}{kT}}a_7 - U_{\sim}^2(W)\left(\frac{q}{kT}\right)\times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times e^{-\frac{q\varphi_K(W)}{kT}}\frac{d\varphi_K(W)}{dW}a_7\right) - \left(4U_{\sim}^3(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}e^{-\frac{2q\varphi_K(W)}{kT}}a_8 - U_{\sim}^4(W)\left(\frac{2q}{kT}\right)\frac{d\varphi_K(W)}{dW}a_8\right)\right]. \quad (21)$$

На рис. 21 подано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості перетворювача від концентрації газу. Як видно з графіка (рис.21), чутливість перетворювача в залежності від концентрації газу і змінювалась від 5,31кГц/ppm до 6,35кГц/ppm в інтервалі зміни концентрації газу від 0 до 2000 ppm в діапазоні частот від 807,0 МГц до 819,0 МГц.

На рис.22 представлено радіочастотний спектр вихідного сигналу перетворювача в діапазоні LTE-800 Downlink, частота передачі складає 807,0 МГц.

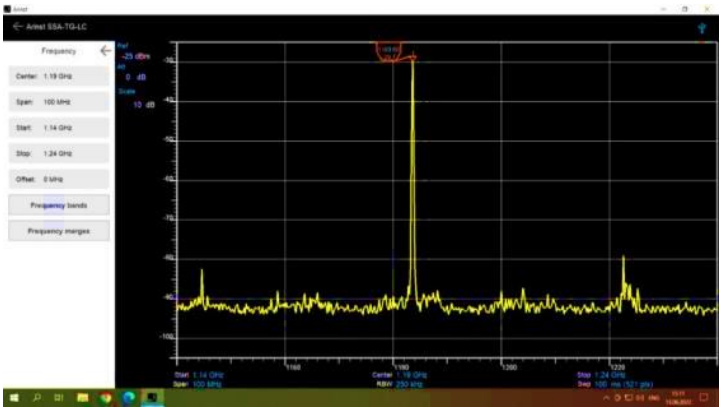


Рисунок 22 – Спектр вихідного сигналу автогенераторного перетворювача вимірювання концентрації газу

В подальшій роботі по удосконаленню схем, конструкцій і характеристик автогенераторних перетворювачів вимірювання газу для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем було запропоновано і досліджено пристрій на основі транзисторної структури з газочутливою МДН-ємністю з чутливістю від 0,55 кГц/ppm до 0,95 кГц/ppm в інтервалі від 0 до 2000 ppm в діапазоні частот від 774,2 МГц до 775,7 МГц. Запропоновано і досліджено перетворювач на базі біполярного і польового газочутливого транзистора, що дало змогу значно спростити конструкцію автогенераторного перетворювача. Як показали теоретичні та експериментальні дослідження функція перетворення зменшується від 775,90 МГц до 773,60 МГц, при цьому чутливість змінювалась від 1,630 кГц/ppm до 1,222 кГц/ppm. Розроблено і досліджено конструкцію перетворювача на основі транзисторної структури з біполярним і польовим двозатворним транзистором з газочутливим резистором, чутливість складала від 2,1 кГц/ppm до 3,4 кГц/ppm в інтервалі зміни концентрації газу від 0 до 1000 ppm при вимірюванні газу NH_3. Досліджено спектр вихідного сигналу на частоті 1,0363 ГГц, з якого видно, що при зміні концентрації газу від 0 до 1000 ppm ширина спектру передачі сигналу збільшується до 3350 кГц. Даний частотний метод модуляції дозволяє збільшити в 4,5 рази завадостійкість та збільшити дальність передачі при мінімальній потужності передачі.

У сьомому розділі представлено математичні моделі, схеми, конструкції, теоретичні та експериментальні дослідження автогенераторних перетворювачів вимірювання вологості для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з вологочутливими МДН-конденсаторами, вологочутливими ємнісними елементами на основі NaCl+полімер, $BaCl_2$+полімер, $BaCl_2$, а також ємнісних

елементів у вигляді комплексних сполук, вологочутливими резисторами і польовими вологочутливими МДН-транзисторами.

Розроблено і досліджено автогенераторний перетворювач вимірювання вологості на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якій вологочутливим елементом слугувала МДН-конденсаторна структура. Активним шаром такої структури є шар пористого кремнію SiO_2, який формується анодним розчиненням кремнію в плавіковій кислоті. Загальна ємність вологочутливої МДН-структури визначається ємністю ізолюючого вологочутливого шару SiO_2, ємністю структури метал-напівпровідник, ємністю напівпровідника при нульовому значенні вологості і ємностей, обумовлених захопленими поверхневими зарядами.

На рис. 23 подано схему автогенераторного перетворювача для вимірювання вологості з вологочутливим елементом на основі МДН-конденсатора для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем. Вона складається з біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності базових областей транзисторів, що відповідає появі від'ємного диференціального опору на вихідних клемах перетворювача. Коливальний контур утворений пасивною індуктивністю L1 та ємністю повного опору транзисторної схеми, що існує на електродах колектор-колектор транзисторів VT1 і VT2.

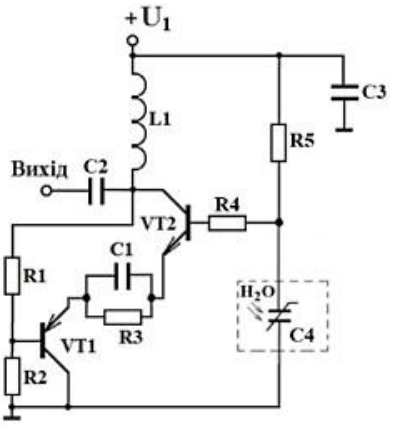


Рисунок 23 – Електрична схема автогенераторного перетворювача вимірювання вологості

Під час дії вологи МДН-конденсатор здійснюється зміна активної та реактивної складових імпедансу на електродах колектор-колектор транзисторної схеми, що викликає зміну вихідної частоти перетворювача. На основі запропонованого методу перетворення енергії молекул води у енергію змінного електричного поля на виході перетворювача розроблена математична модель роботи перетворювача, на базі якої отримано основні характеристики перетворювача. Функція перетворення вологочутливого перетворювача параметрично зв'язана як з параметрами вологочутливої МДН-ємності, так і з параметрами автогенератора. Вона описується формулою

$$F_0(W) = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{U_{\sim}^2 t_1}{KC(W)U_{=}^2 t_2 L} - \frac{U_{\sim}^4 t_1^2}{K^2 C^2(W) U_{=}^4 t_2^2 R_g^2}\right]^{1/2}. \qquad (22)$$

де t_1 – час зміни вологості, K – коефіцієнт корисної дії перетворювача, $U_{=}$ – постійна напруга на вологочутливій ємності, t_2 – період коливань вихідної частоти, L – індуктивність коливального контуру, R_g – від'ємний диференціальний опір в коливальному контурі. Отримана формула (22) дозволяє досить простим шляхом визначити функцію перетворення перетворювача, а ніж складним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми пристрою, що значно зменшує апаратні затрати при розрахунку в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Нарис. 24

наведено графічну залежність експериментальної та розрахункової кривих функції перетворення перетворювача.

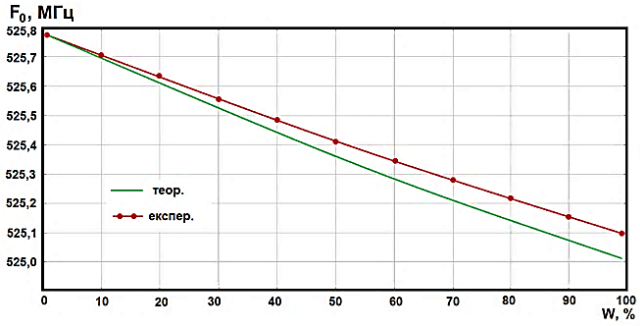


Рисунок 24 – Залежність функції перетворення перетворювача від зміни вологості

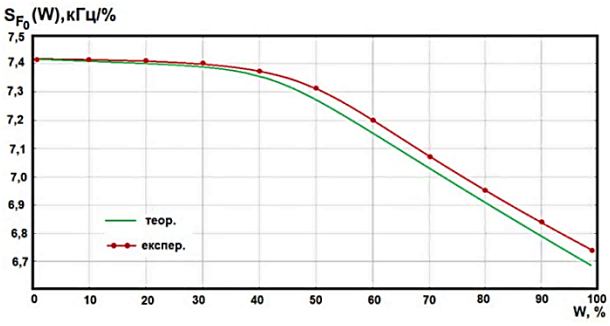


Рисунок 25 – Залежність функції чутливості перетворювача від зміни вологості

Чутливість перетворювача визначається першою похідною функції (22) за параметром вологості *W*. На підставі експериментальних досліджень видно, вихідна змінна напруга $U_{\sim}$, а також постійна напруга $U_{=}$ залежить від зміни вологості, що також необхідно врахувати при визначенні чутливості перетворювача. На підставі цього зауваження функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0}(W)=\frac{1}{4\pi}\left[U_{\sim}^2C^{-1}(W)U_{=}^{-2}(W)m_5-U_{\sim}^4(W)C^{-2}(W)U_{=}^{-4}(W)m_6\right]^{-1/2}\times$$
$$\times\left\{\left[2U_{\sim}(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}C^{-1}(W)U^{-2}(W)+U_{\sim}^2(W)\left(-C(W)\frac{dC(W)}{dW}U_{=}^{-2}(W)-2U_{=}^{-3}(W)\frac{dU_{=}(W)}{dW}C^{-1}(W)\right)\right]m_5-\right. \quad (23)$$
$$\left.-\left[U_{\sim}^4(W)\left(-2C^{-3}(W)\frac{dC(W)}{dW}U_{=}^{-4}\ (W)-4U_{=}^{-5}(W)\frac{dU_{=}(W)}{dW}C^{-2}(W)\right)+4U_{\sim}^3(W)\frac{dU_{\sim}(W)}{dW}C^{-2}(W)U_{=}^{-4}(W)\right]m_6\right\}.$$

Графік функції чутливості перетворювача подано на рис. 25. Як видно з рис. 28 чутливість перетворювача складала від 6,75 кГц/% до 7,41 кГц/% в інтервалі зміни вологості від 0,1% до 99 % в діапазоні частот від 525,78 МГц до 525,10 МГц. Частота передачі перетворювача складала 525,42 МГц при вологості 50 % і температурі 20 ^{0}C.

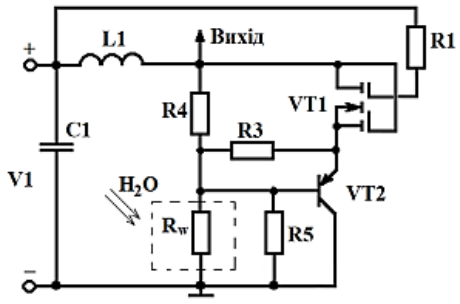


Рисунок 26 – Електрична схема перетворювача з вологочутливими резистором

Подальше покращення метрологічних параметрів автогенераторних перетворювачів вимірювання вологості для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем можливо отримати на базі запропонованої конструкції перетворювача, в якому вологочутливим елементом виступає вологочутливий резистор. Електрична схема перетворювача подано на рис. 26.

Електрична схема складається з польового двозатворного транзистора VT1 і біполярного транзистора VT2, вологочутливого резистора R2, опорів R1- R5,ємності C1 та індуктивності L1. На вологочутливий резистор R2 діє зміна вологості, яка приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру, так і від'ємного диференціального опору на виході перетворювача, що викликає зміну

його вихідної частоти. Вольт-амперна характеристика перетворювача має спадну ділянку, що відповідає існуванню від'ємного диференціального опору на цій ділянці. Схема пристрою з вологочутливим резистивним елементом HR202 (рис.26) була зібрана на біполярному транзисторі BFT93 та польовому транзисторі BF998 для забезпечення роботи у НВЧ діапазоні.

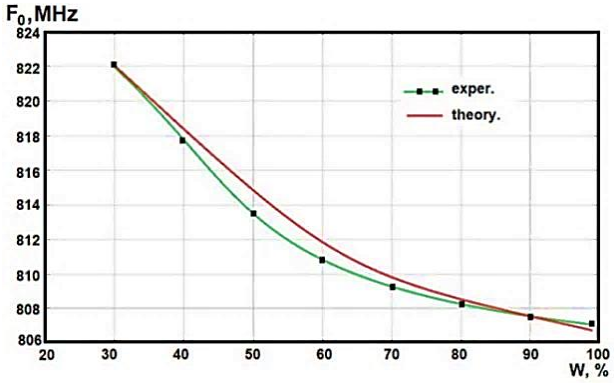


Рисунок 27 – Розрахункова та експериментальна залежності функції перетворення перетворювача від зміни вологості

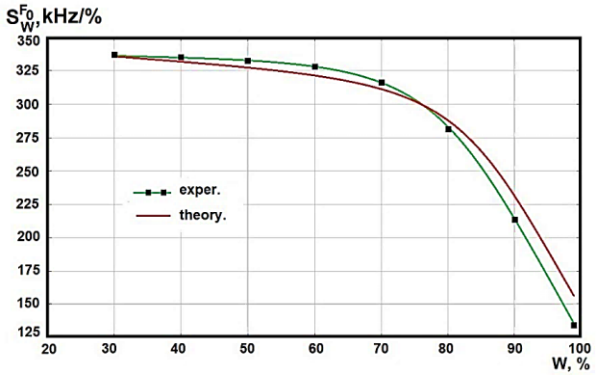


Рисунок 28 – Розрахункова та експериментальна криві функції чутливості перетворювача від зміни вологості

Режиму роботі при вологості 30% відповідала частота 822,0МГц, а при 99%-806,8МГц. Запропонована схема дозволяє отримати вихідну напругу 8,5В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнювала $1{,}35\cdot10^{-5}$Гц. Виходячи з нелінійної еквівалентної схеми була розроблена математична модель, з якої отримано функції перетворення і чутливості перетворювача вимірювання вологості. На рис. 27 подано графік функції перетворення у вигляді розрахункової та експериментальної кривих. На рис. 28 представлено розрахункова та експериментальна криві функції чутливості перетворювача від зміни вологості. Чутливість розробленого перетворювача в інтервалі відносної вологості від 30% до 99% приймає значення чутливості від 332,8 кГц/% до 130,2 кГц/% в діапазоні частот від 822,0МГц до 807,0МГц. Слід підкреслити, що при мінімальній чутливості перетворювача (130кГц/%) і при стандартному методі вимірювання, тобто з використанням часових воріт в 1с, частоту можна виміряти з точністю до 1Гц, тому 130000 показань припадає на 1% вологості, а весь діапазон від 30% до 99% 10350000 відліків, що відповідає 23-розрядному АЦП. Похибка вимірювання розробленого перетворювача вимірювання вологості становить 0,01%. Досліджено вольт-амперні характеристики, імпеданс, коефіцієнт стоячої хвилі у діапазоні частот від 50 кГц до 3 ГГц, а також спектр вихідного частотного сигналу.

Аналітична залежність опору $R_W(W)$ чутливого до вологості резистора при зміни вологості та температури було отримано шляхом апроксимації та інтерполяції цього параметра. Похибка 3D математичного опису опору $R_W(W)$ становить 0,2%. На рис. 29 показана 3D модель залежності опору $R_W(W)$ чутливого до вологи резистора при зміни вологості та температури. Для зменшення похибки в описі цього параметра необхідно відкалібрувати і ввести поправочний коефіцієнт для кожного екземпляра вологочутливого резистора, таким чином можна підвищити точність вимірювання інформативного параметра.

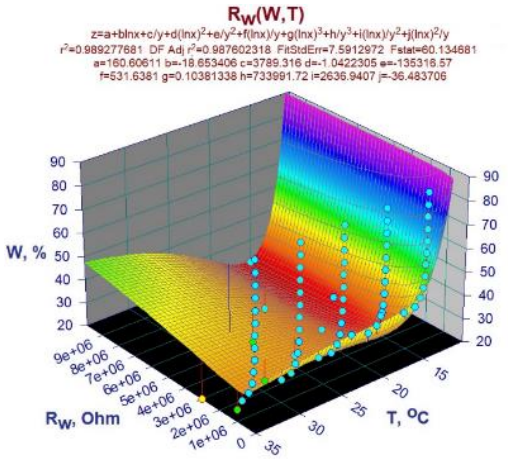


Рисунок 29 – 3D модель залежності опору $R_W(W)$

У роботі запропоновано і досліджено автогенераторні перетворювачі вологості з ємнісними вологочутливими елементами, виготовленими на основі NaCl, NaCl+полімер, $BaCl_2$+полімер, $BaCl_2$, а також ємнісних вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних структур, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Розроблено схеми, конструкції, математичні моделі, розраховано функції перетворення і чутливості. Як показали дослідження чутливість розроблених приладів складала від 62 кГц/% до 107 кГц/%.

Восьмий розділ присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням по створенню багатоканальних пристроїв для телеуправління, спеціалізованих хмарних платформ, пристроїв цивільного та військового призначення на основі автогенераторних перетворювачів фізичних величин.

Запропоновані багатоканальні прилади вимірювання фізичних величин побудовані на базі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором, тому вони працюють у широкому діапазоні частот. У зв'язку з цим були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних частот і режимів роботи для різних задач використання розроблених приладів. У діапазоні від 50 кГц до 6 МГц безпосередньо можна працювати з 8-розрядними мікроконтролерами з деякими втратами у точності вимірювань. Від 50 кГц до 80 МГц з прямою роботою з 32-розрядними мікроконтролерами типу Teency за високою точністю вимірювання фізичних величин. Від 50кГц до 250 МГц для роботи FPGA з високою точністю вимірювання та паралельними потоками даних від десятків автогенераторних приладів. І, нарешті, в діапазоні від сотень мегагерц до 6 ГГц у вигляді автогенераторного перетворювача з високою точністю вимірювання інформативного параметра.

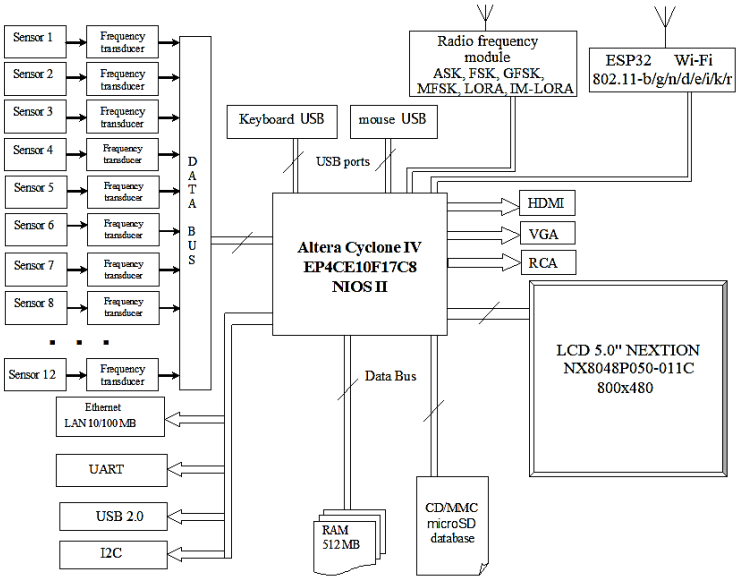


Рисунок 30 – Структурна схема багатоканального пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища

На рис. 30 представлено розроблену структурну схему багатоканального пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища для спеціалізованих хмарних платформ, який побудовано на основі

FPGA з робочим діапазоном автогенераторних перетворювачів вимірювання фізичних величин від 50 кГц до 150 МГц. У даному діапазоні, за використанням FPGA Cyclone IV кількість підключених автогенераторних перетворювачів може досягти 64, а при використанні FPGA Cyclone 10 до 256 приладів. На рис. 31 наведено структурну схему багатоканального пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища для спеціалізованих хмарних платформ, який побудовано на основі FPGA з робочим діапазоном автогенераторних перетворювачів фізичних величин від 144 МГц до 6,5 ГГц з FM модуляцією.

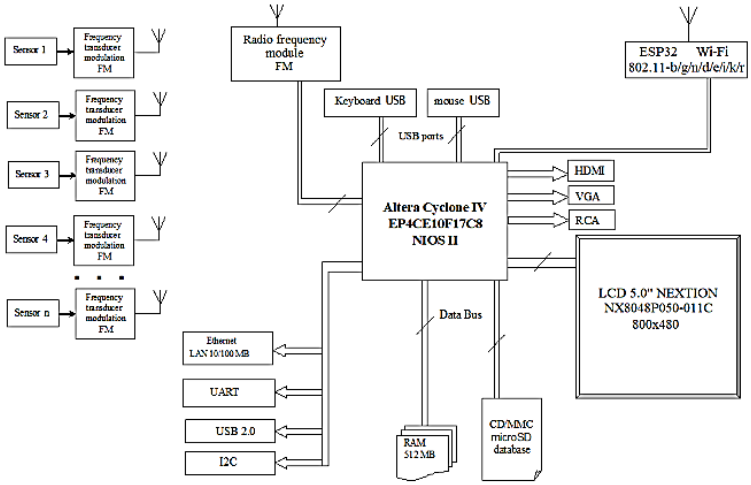


Рисунок 31 – Структурна схема багатоканального пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища з робочим діапазоном автогенераторних перетворювачів фізичних величин від 144 МГц до 6,5 ГГц з FM модуляцією

Розроблено і досліджено автогенераторний перетворювач вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища для спеціалізованих хмарних платформ, який побудовано на базі FPGA з робочим діапазоном автогенераторних перетворювачів вимірювання фізичних величин від 250 МГц до 2,5 ГГц з модуляціями OOK, ASK, FSK, GESK, MFSK, IM – Lora та використанням мікроконтролерів для керування модуляторами і вибором частоти передачі та метода модуляції чи маніпуляції. Його структурна схема подана на рис. 32.

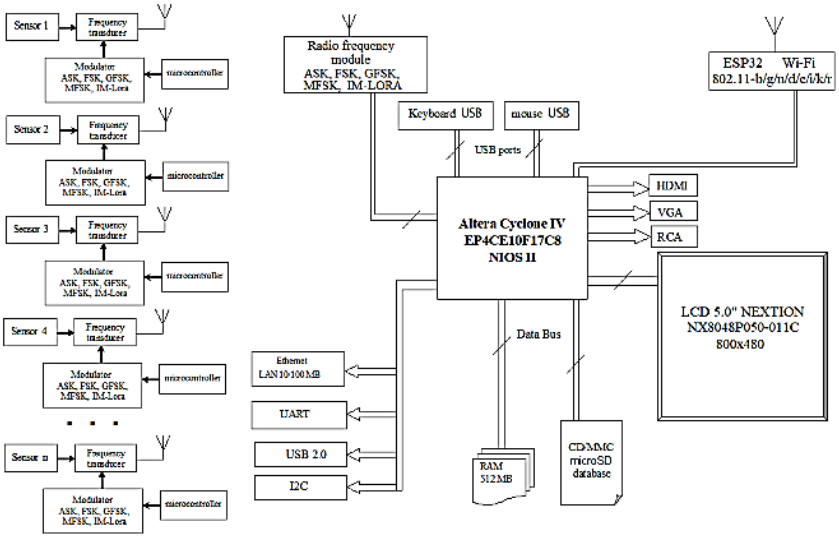


Рисунок 32 – Структурна схема багатоканального пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища з робочим діапазоном автогенераторних перетворювачів фізичних величин від 250МГц до 2,5ГГц з модуляціями OOK, ASK, FSK, GESK, MFSK, IM – Lora

Запропоновано і досліджено нову схему і конструкцію багатоканального частотоміра на програмованій логічній інтегральній схемі для комп’ютерних та

інформаційно-вимірювальних систем з частотними перетворювачами фізичних величин. Схема багатоканального частотоміра з використанням ядра NIOSII подано на рис. 33.

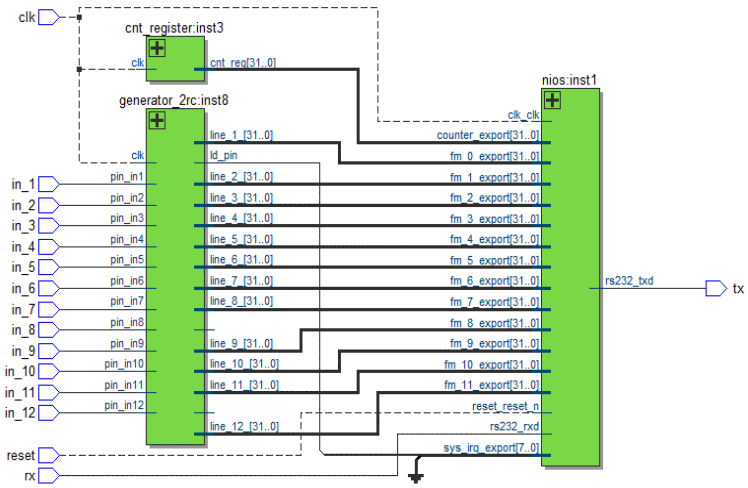


Рисунок 33 – Схема багатоканального частотоміра з використанням ядрі NIOS II

Розроблено і досліджено багатоканальну систему на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин з підтримкою цифрових приладів, що значно розширює спектр її можливих шляхів використання. Підтримка ядра NIOS II дозволить одночасно аналізувати значення із двох типів приладів і застосовувати для них різні алгоритми фільтрації та обробки.

Запропоновано і досліджено характеристики і параметри багатоканальної комп'ютерної системи моніторингу потужних маслонаповнених енергетичних установок, яка відрізняється від існуючих тим, що вона працює у реальному масштабі часу, вимірює концентрації газів та інших параметрів (тиск, температура, вологість), розчинених у діелектричній рідині потужних масляних трансформаторів.

У роботі розроблено багатоканальну інформаційно-вимірювальну систему для моніторингу біогазових установок, тобто вимірювання і контроль концентрацій таких газів як метан (CH_4), вуглекислий газ (CO_2), водяна пара (H_2O), азот (N_2), кисень (O_2), водень (H_2), аміак (NH_3), сірководень (H_2S), яка відрізняється від існуючих тим, що система працює у реальному масштабі часу, є багатоканальною і вимірює одночасно усі перераховані гази.

Запропоновано і розроблено комп'ютерну інформаційно-вимірювальну систему моніторингу параметрів спортсмена-весляра академічного веслування, яка призначена для аналізу і визначення основних характеристик системи «човен-весляр» в реальному масштабі часу. Вимірювання проводиться кожні 8-12мс паралельно по 50-каналам. Розроблена система забезпечує передачі пакетів даних на рівні 60-70 FPS. Дані отримані з кожного сенсора відображаються у цифровій формі та у вигляді графіків. Дану систему досить просто адаптувати для використання керування військових надводних та підводних безпілотних ударних дронів. Зовнішній вигляд системи ІВС подано на фото (рис.34).

Розроблено багатоканальний розпізнавач запахів та їх концентрацій (MSRC-2) на базі частотних приладів концентрації газів та їх летких речовин з селективністю на бензин, спирти, ацетон, горючі гази, водень, монокис вуглецю, двоокис вуглецю, азотовмісні випари, органічні випари, якості повітря. Програма роботи пристрою USmellSence є оригінальною розробкою, вона проста і не вимагає особливої підготовки та навчання. Програма працює з різними операційними системами.

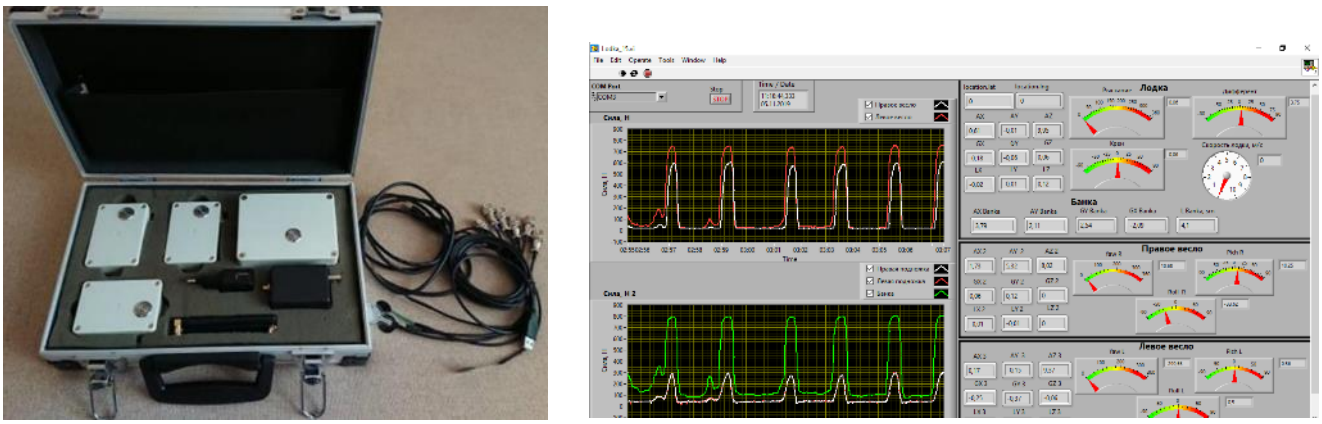


Рисунок 34 – Зовнішній вигляд інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів спортсмена-весляра та інтерфейс програми обробки та візуалізації даних

Розроблено і досліджено радіокерований підривний пристрій для дистанційного підриву на базі автогенераторних перетворювачів вимірювання тиску, кутового положення та прискорення, а також передаючих та приймаючих пристроїв з різним типом модуляції (OOK, ASK, FSK, GESK, MFSK, IM – Lora) та робочою частотою діапазону від 100 МГЦ до 6,5 ГГц. У пристроях такого типу відбувається перетворення вище перерахованих зовнішніх впливів у частотний сигнал і неуможливлює несанкціоноване зняття підривного пристрою. Для збільшення дистанції підриву розроблено радіокерований підривний пристрій типу RKV-L6, Ver-3. Комплект складається з 6 виконавчих пристроїв з захистом IP68 та 1 пульта керування з можливим розширенням до 9 виконавчих пристроїв.

ВИСНОВКИ

У роботі розв’язано науково-прикладну проблему розроблення нових та вдосконалення відомих методів вимірювання фізичних величин та створення автогенераторних вимірювальних перетворювачів у широкому діапазоні частот на основі автогенераторних пристроїв, що забезпечують їх динамічний режим роботи при електричному перелаштуванню параметрів автоколивних систем у широких межах при дії зовнішніх впливів та розроблення на їх базі пристроїв для перетворення інформації в комп’ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення.

За результатами розв’язання поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз сучасного стану теорії та практики створення функціонування приладів вимірювання фізичних величин, систематизовано відомі принципи, методи, що покладено в їх основу. Проведений аналіз показав, що перспективним напрямком розширення функціональних можливостей приладів вимірювання є використання реактивних властивостей і від’ємною диференціального опору квантових і транзисторних мікроелектронних структур.

2. На основі використання принципу перетворення енергії у квантових і транзисторних структурах автогенераторних перетворювачах вимірювання запропоновано нові методи розрахунку основних характеристик приладів, які відрізняються від існуючих тим, що отримані вихідні характеристики представляють собою параметричні залежності від діючих зовнішніх факторів та

параметрів первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів, що дає можливість розробникам конструкцій обирати оптимальні робочі частоти і оптимальні режими роботи.

3. Розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів вимірювання температури, оптичної потужності, тиску, індукції магнітного поля, концентрації газів, вологості на основі методу перетворення енергії, в яких на відміну від існуючих, значно простіше отримано аналітичні формули параметричної залежності функцій перетворення і чутливості, які враховують вплив вхідного інформаційного сигналу і кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенератора на вихідну частоту приладів у порівнянні з існуючими методами розрахунку функцій перетворення і чутливості з еквівалентних схем приладів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа, що значно зменшує апаратні затрати при розрахунках в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах.

4. Розроблено і досліджено автогенераторний перетворювач для вимірювання температури на основі тунельно-резонансного діода в області надвисоких частот. Запропоновано і досліджено автогенераторні перетворювачі вимірювання температури з первинним напівпровідниковими термочутливими резистором і напівпровідниковим діодом, а також розроблено автогенераторні перетворювачі для вимірювання температури з термочутливим біполярним і польовим транзистором для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем і мереж. Діапазон робочих частот складає від $3\cdot10^5$ Гц до $4\cdot10^9$Гц, чутливість від 1,2кГц/^{0}С до 480кГц/^{0}С, інтервал температур від – 50^{0}С до +100^{0}С.

5. Запропоновано і розроблено автогенераторний перетворювач вимірювання оптичної потужності на основі квантової двобар'єрної гетероструктури, базовим елементом якої є тунельно-резонансний діод, причому він виступає як первинний фоточутливий перетворювач і як автогенератор, що значно спрощує конструкцію, а відповідно і апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах. Запропоновано автогенераторні перетворювачі вимірювання оптичної потужності на основі транзисторних мікроелектронних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними фоточутливими елементами типу фоторезистора і фотодіода, причому первинні фоточутливі перетворювачі є активними елементами схем автогенераторів. Діапазон робочих частот складає від $3\cdot10^5$ Гц до $1{,}5\cdot10^9$ Гц, чутливість від 15,27 кГц/мкВт/см^2 до 134,8кГц/мкВт/см^2, інтервал оптичної потужності від 0,1 мкВт/см^2 до 100 мкВт/см^2.

6. Розроблено автогенераторні перетворювачі індукції магнітного поля на основі тунельно-резонансного діода. Показано, що прилади такого типу мають суттєві переваги перед існуючими приладами вимірювання магнітної індукції, які полягають у можливості працювати у надвисокочастотному діапазоні, мікромініатюризації перетворювача до нанорозмірів, можливості вимірювання магнітної індукції від десятка мілітесла до десятків тесла з бездротовою передачею виміряної інформації на відстань. Розроблено та досліджено автогенераторні перетворювачі магнітної індукції на основі транзисторних структур з первинними магніточутливими елементами Холла і біполярним двоколекторним і одноколекторним магніточутливими транзисторами, польовим магніточутливим транзистором, причому первинні магніточутливі елементи є активними елементами

схеми автогенератора, що значно зменшує апаратні затрати в комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення. Діапазон робочих частот складає від $4 \cdot 10^5$ Гц до $6{,}4 \cdot 10^9$ Гц, чутливість від 1,0 кГц/мТ до 350 кГц/мТ, інтервал магнітної індукції від 0,1мТ до 3Т.

7. Запропоновано та досліджено автогенераторні перетворювачі тиску на основі квантової гетероструктури, транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинним тензочутливими елементами на базі тензорезистора і тензодіода. Діапазон робочих частот складає від $1{,}5 \cdot 10^6$ Гц до $4{,}5 \cdot 10^9$ Гц, чуливість від 1,15 кГц/Па$\cdot 10^5$ до 14,16 кГц/Па$\cdot 10^5$, інтервал тиску від $50 \cdot 10^5$ Па до $350 \cdot 10^5$ Па.

8. Розроблено автогенераторні перетворювачі вимірювання концентрації газів на основі напівпровідникових структур з диференціальним від'ємним опором з газочутливими елементами на базі резистора і діода Шотткі, газочутливою МДН-емністю, газочутливим МДН-транзистором. Діапазон робочих частот складає частот від $4{,}3 \cdot 10^8$Гц до $1{,}04 \cdot 10^9$Гц, чутливість від 0,55 кГц/ppm до 6,35 кГц/ppm, інтервал концентрації газу від 0 ppm до 2000ppm.

9. Запропоновано та досліджено автогенераторні перетворювачі для вимірювання вологості з частотним виходом, конструкція яких базується на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором. В якості первинних елементів перетворення вологості виступають МДН-конденсатор і МДН-польовий транзистор. Конструкція перетворювача спрощена за рахунок використання первинних перетворювачів як активних елементів автогенератора. Розроблено автогенераторний перетворювач для вимірювання вологості з первинними ємнісними вологочутливими елементами на основі комплексних сполук. Діапазон робочих частот складає від $1{,}0 \cdot 10^6$Гц до $8{,}22 \cdot 10^8$Гц, чутливість від 6,75кГц/% до 332,0 кГц/%, інтервал вологості від 0,1% до 99,9%.

10. На основі розроблених автогенераторних перетворювачів вимірювання фізичних величин вперше розроблено конструкцію, структурну схему багатоканального пристрою одночасного вимірювання та контролю характеристик навколишнього середовища для спеціалізованих хмарних платформ. В даному рішенні за використанням FPGA Altera Cyclone IV кількість підключених автогенераторних перетворювачів може досягти 256, а при використані FPGA Intel MAX 10 складає до 1000 одиниць перетворювачів. Розроблено конструкцію, принцип роботи і структурну схему багатоканальної комп'ютерної системи моніторингу потужних маслонаповнених енергетичних установок (RDM-OEP-3), яка працює у реальному масштабі часу. Вона призначена для аналізу газів та вимірювання їх концентрації в трансформаторній олії, її температуру, вологість, тиск. Розроблено принцип роботи, конструкцію, структурну схему комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу параметрів спортсмена-весляра академічного веслування, вимірювання проводяться кожні 8-12 мілісекунд паралельно по 50 каналам. Розроблено і досліджено багатоканальний пристрій розпізнавання запахів і концентрації газів у реальному часі. Розроблено схеми, конструкції багатоканальних підривних пристроїв наземного і повітряного типів (RKV- L6-Ver-3). Комплект складається з шести виконавчих пристроїв (приймачів) з захистом IP68 та пульта керування (передавача) з можливим розширенням до дев'яти виконавчих пристроїв.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] V. Osadchuk, A. Osadchuk, A. Semenov, I. Osadchuk, O. Semenova, S. Baraban, M. Prytula, "Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance", in *Data-Centric Business and Applications ICT Systems-Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity*, (Volume 5). Chapter 12. Springer International Publishing. Cham. Editors: Tamara Radivilova, Dmytro Ageyev, Natalia Kryvinska. 2020, pp.229-261.

[2] A. Semenov, O. Semenova, O. Osadchuk, I. Osadchuk, K. Koval, S. Baraban, M. Baraban, "Pulse and Multifrequency Van der Pol Generators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities", in *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham, 2021, pp.127-158.

[3] A. Semenov, O. Semenova, O. Osadchuk, I. Osadchuk, S. Baraban, A. Rudyk, A. Safonyk, O. Voznyak, "Van der Pol Oscillators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities" in *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies.* Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 69. Springer, Cham. 2021, pp.43-78.

[4] I.O. Osadchuk, O.V.Osadchuk, V.S.Osadchuk, "The Pontial of Modern Sciense. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance", in *Publishshed by Sciencee Pablishing.* Volume 3. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019, pp. 212-237.

[5] I.O. Osadchuk, O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, "Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance", in *Modern world tendencies in the development of science.* Chapters 19. Volume 2. Publishshed by Sciemcee Pablishing.LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019, pp.271-285.

[6] A.V. Osadchuk, E. Koenig, I.O. Osadchuk, „Application of multifactor models for forecasting of PSA (phthalic anhydrid) emissions in airplanes", in *Wissenschaft für den modernen menschen: technik und technologie, informatik, sicherheit.* Chapter 10. Book 1. Part 1. Choporov O.N., Lvovich I.Y., Osadchuk A.V., Preobrazhenskiy A.P. Karlsruhe: NetAkhatAV, 2020, pp.135-150.

[7] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, M.A. Pritula, "Devices for measuring the parameters of the magnetic field", in *Erbe der europäischen wissenschaft: Ingenieurwissenschaften, Informatik, Physik und Mathematik, Medizin.* Lvovich I.Y., Osadchuk A.V., Preobrazhenskiy A.P. et al. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Chapter 1. Buch 9. Teil 1. 2022, pp.4-37.

[8] E. Koenig, O. Osadchuk, Guido Meier, Benedikt Schulte, I. Osadchuk, "Optimization of two-layer resists for laser lithography on substrates required for wide application in microwave sensor technology" in *Intellektuelles Kapital - die grundlage für innovative entwicklung: innovative technik und technologie, informatik.* CHAPTER 4. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 3. Teil 3. 2020, pp.79-88.

[9] A.V. Osadchuk, N.I. Osadchuk, I.A.Osadchuk, "Frequency transducers of gas concentration for the diagnosis of strains of bacteria Helicobacter pylori", in *Technical research and development: collective monograph. Technical research and development: collective monograph*. Chapter 4. Electronics. Kalafat K., Vakhitova L., Drizhd V. etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2021, pp.178-194.

[10] O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, M.O. Prytula, I.O. Osadchuk, "Mathematical modeling of frequency transducers of the radio measuring device of magnetic field induction" in *Intellectual capital is the foundation of innovative development: Engineering, Computer Science, Agriculture. Monographic series «European Science».* Chapter 1. Gogo V.B., Lukin V.V., Osadchuk O.V. et al. Karlsruhe, Germany. Book 18. Part 3. 2023, pp.8-38.

[11] A.V. Osadchuk, N.I. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, O.V. Kobylianskyi, Paweł Komada, and Yedilkhan Amirgaliyev, "The mathematical model of frequency gas transducer based on transistor structure with NDR for diagnosis of helicobacter pylori strains", *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111762T, pp.1-8. 2019.

[12] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, V.V. Bogachuk, O.O. Seletska, Mariusz Duk, and Saule Smailova, "Development and research of a radio measuring device with a frequency output signal based on a pyroelectric primary transducer", *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 1117611, pp. 1-10. 2019.

[13] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, Piotr Kisała, and Karlygash Nurseitova, "Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors", *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111761I, pp.1-12. 2019.

[14] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, N.V. Titova, O.Yu. Pinaeva, Piotr Kisała, Saule Rakhmetullina, "Optical-frequency gas flow meter on the basis of transistor structures with negative differential resistance", *Proc. SPIE 11456, Optical Fibers and Their Applications*, 114560F, pp.74-81. 2020.

[15] O.V. Osadchuk, V.S.Osadchuk, I.O. Osadchuk, "Research on a magnetic field sensor with a frequency output signal based on a tunnel-resonance diode", *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS*, 4/2020, pp.51–56. 2020.

[16] O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, D.R. Ilchuk, G.A. Pastushenko, "Solid State Radio-Measuring Optical-Frequency Transducer of Gas Flow Rate", *Physics and chemistry of solid state.* V. 22, No. 2 (2021). pp. 224-232. 2021.

[17] O.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, "The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance", *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal.* Vol. 13 No 4, 04001(6 pp). 2021.

[18] O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, "Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode", *Physics and chemistry of solid state*, V. 23, No. 2. pp. 277-284. 2022.

[19] O.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, V.V. Martyniuk, L.V. Krylik, M.V. Evseeva. "Mathematical simulation of a microelectronic transducer with frequency output for measuring the induction of the magnetic field", *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS*, 2/2022, pp. 43–49. 2022.

[20] O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, V.V. Martyniuk, M.O. Prytula. “Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic β-diketonate”, *ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1254 (2022) 012027.

[21] A.O. Semenov, V.V. Martyniuk, M.V. Evseeva, O.V. Osadchuk, I.O.Osadchuk, “The Influence of Physical Quantities on Electrical Parameters of Heterometallic μ-Methoxy (Copper (II), Bismuth (III)) Acetylacetonate”, *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 15 No 1, 01006(5pp). 2023.

[22] I.O. Osadchuk, O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, L.V. Krylik, “Self-oscillating parametric humidity sensor with frequency output signal”, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS*, 1/2023. pp. 42–49. 2023.

[23] O. Osadchuk, V. Martyniuk, I. Osadchuk, O. Semenova, T. Sydoruk, M. Evseeva, "The Impact of Temperature and Magnetic Field on Physical Field on Physical Parameters of the Strontium-Containing Heterometallic Coordination Compound of Copper (II)," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 511-515.

[24] I.A. Osadchuk, A. V. Osadchuk, V. S. Osadchuk, A. O. Semenov, "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.

[25] O. Osadchuk, V. Martyniuk, O. Semenova, I. Osadchuk, M. Evseeva and T. Yushchenko, "Electrical Properties of Semiconducting Heterometallic (Copper, Yttrium)-Containing Acetylacetonate," *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 43-46.

[26] I. Osadchuk, O. Osadchuk, V. Osadchuk, A. Semenov, O. Semenova and K. Koval, "Microwave Oscillator on Transistor Structures with Dielectric Resonators," *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 902-906.

[27] A. Osadchuk, O. V. Osadchuk, V. S. Osadchuk and A. O. Semenov, "Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode," *2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 442-446.

[28] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Математична модель газореактивного ефекту в напівпровідникових сенсорах газу*”, Вісник Хмельницького Національного університету. Серія: Технічні науки*, № 2 (271), с. 160-166. 2019.

[29] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Математичне моделювання фізичного механізму утворення об'ємного приповерхневого заряду в напівпровідниках для інтелектуальних частотних сенсорів концентрації газу”, *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* Том 38. №2. с.107-112, 2019.

[30] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Вплив газореактивного ефекту первинних напівпровідникових сенсорів газу на вихідну частоту автогенераторних перетворювачів”, *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 30 (69). №3. Частина 2, с.223-227, 2019.

[31] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Вплив ємності просторового заряду на газореактивний ефект в напівпровідникових сенсорах газу", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №4. с.41-48, 2019.

[32] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Дослідження генератора електричних коливань на основі тунельно-резонансного діода", *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 31 (70). №4. с.279-286, 2020.

[33] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода", *Вісник Хмельницького національного університету*, №4 (287), с.160-167, 2020.

[34] О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, "Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом", *Прикладні питання математичного моделювання*, Т. 3, № 2.1, с.206-215, 2020.

[35] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.К. Скощук, "Багатоканальний частотомір на програмованій логічній інтегральній схемі для радіовимірювальної системи з частотними сенсорами фізичних величин", *Вісник Хмельницького національного університету,* №6, (303), с.186-194, 2021

[36] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Математична модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом", *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 32(71), Ч.2, №1, с.175-182, 2021.

[37] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, Д.Р. Ільчук, Г.О. Пастушенко, "Оптико-частотний витратомір газу", *Вісник Хмельницького національного університету*, №1, (293), с.160-170, 2021.

[38] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з від'ємним диференційним опором", *Вісник Хмельницького національного університету,* №2 (295), с.156-164, 2021.

[39] О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, О.С. Звягін, "Математичне моделювання пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості", *Вісник Хмельницького національного університету*, №2 (295), с.282-288, 2021.

[40] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, С.В. Ліхашорський, "Дослідження температурної нестабільності в активних НВЧ фільтрах та методи її зменшення", *Вісник Вінницького політехнічного інституту,* № 3, с.127-133, 2021.

[41] О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, О.С. Звягін, "Математична модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості", *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 32(71), №4, с.289-296, 2021.

[42] Я.О. Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, "Дослідження автогенераторних параметричних сенсорів температури", *Вісник Хмельницького національного університету*, №1 (305), с.172-180. 2022.

[43] Я.О. Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, "Автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з елементом Холла і двоколекторним біполярним магнітотранзистором", *Вісник Хмельницького національного університету*, №2 (307), с.114-122. 2022.

[44] Я.О. Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, “Дослідження автогенераторних параметричних перетворювачів магнітного поля з магніторезистором і магнітодіодом”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33(72), №2, с.243-252, 2022.

[45] Я.О. Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, “Дослідження автогенераторних параметричних оптичних сенсорів”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 33(72), №3, с.106-114, 2022.

[46] Я.О. Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, “Автогенераторні параметричні сенсори тиску”, *Вісник Хмельницького національного університету*, №3 (309), с.125-132, 2022.

[47] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, Д.О. Думенко, “Аналіз доцільності використання негативного зворотного зв’язку на змінному струмі для стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності”, *Інфокомунікаційні та комп’ютерні технології,* №2 (04), с.83-91, 2022.

[48] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, Д.О. Думенко, “Стабілізація параметрів транзисторних аналогів індуктивності”, *Вісник Хмельницького національного університету*, №6, Т.2 (315), с. 65-68, 2022.

[49] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.К. Скощук, “Використання ядра NIOSII у багатоканальному частотомірі на FPGA для радіотехнічної системи з частотними сенсорами фізичних величин”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* №1, с.137-148, 2023.

[50] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.К. Скощук, “Удосконалення багатоканальної радіотехнічної системі на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин підтримкою цифрових сенсорів”, *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №2, с.72-82, 2023.

[51] Я.О. Осадчук, “Автвогенераторні мікроелектронні сенсори магнітного поля з біполярним і польовим магніточутливими транзисторами”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 34(73), №1, с.354-363, 2023.

[52] Я.О. Осадчук, “Мікроелектронні автогенераторні сенсори концентрації газу з частотним виходом”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 34(73), №2, с.266-275, 2023.

[53] Я.О. Осадчук, “Мікроелектронні автогенераторні сенсори температури”, *Вісник Хмельницького національного університету*, №1, Т.1, (317), с. 237-247, 2023.

[54] Я.О. Осадчук, “Мікроелектронні автогенераторні оптичні перетворювачі”, *Вісник Хмельницького національного університету*, №3, Т.1 (321), с. 135-144, 2023.

[55] Я.О. Осадчук, О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, “Вологочутливі перетворювачі на основі МДН-структур з частотним виходом”, *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 34(73), №4, с.272-282, 2023.

[56] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Газореактивний ефект в напівпровідникових сенсорах газу”, на *XLVIII НТК факультету інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем. Секція радіотехніки.* 2019, с.1-4.

[57] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, Н.І. Осадчук, “Оптико-частотний перетворювач газу для діагностики штамів бактерії Helicobacter Pylori”, на *МНПК "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання",* Івано-Франківськ. 2019, с.90-96.

[58] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Радіовимірювальний частотний параметричний перетворювач тиску з MEMS тензочутливим резистивним

елементом", на *19 МНТК "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (ВОТТП-19-2019).* ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019, с.54-56.

[59] О.В. Осадчук, А.О. Семенов, Я.О. Осадчук, К.О. Коваль, О.П. Червак, "Пристрої генерування сигналів з регулярною та хаотичною динамікою на основі транзисторних структур із від'ємним диференційним опором" *in Proceedings of the VIII International Scientific-Practical Conference "Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Infocommunication Systems, PREDT-2019.* Chernivtsi, Ukraine. 2019, p.49-50.

[60] I.A. Osadchuk, O.V. Osadchuk, "Nanoelectronic pressure transducer with a frequency output based on a tunnel resonance diode", *in NANO-2019: Limits of Nanoscience and Nanotechnologies (Chisinau, Moldova). Conferința "SPINTECH Summer school "S/F Hybrid Structures for Spintronics",* Chişinău, Moldova, 2019, p.97.

[61] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, М.В. Кравецький, М.С. Шеванюк, "Радіовимірювальний перетворювач тиску з чутливим MEMS конденсатором", на *I МНТК «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН-2019),* Вінниця, 2019, с.120-121.

[62] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, Д.О. Думенко, "Реалізації індуктивностей НВЧ діапазону на основі реактивних властивостей транзисторних структур", на *XLIX НТКП професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів підрозділів університету з участю працівників підприємств м. Вінниці та Вінницької області (НТКП ВНТУ-2020),* 2020, с.1-3.

[63] О. В. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, "Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом", на *XXI МНПК з математичного моделювання,* Херсон, Україна, 2020, с.78.

[64] О.В.Осадчук, В.С.Осадчук, Я.О.Осадчук, Г.О.Пастушенко, "Радіовимірювальний параметричний сенсор газу на основі двоколекторного магніточутливого транзистор", на *МНТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», Одеська національна академія зв'язку ім. О С. Попова,* Одеса, 2020, с.60-62.

[65] О.В. Осадчук, Н.І. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Оптико-частотний сенсор газу для скринінг тесту штамів бактерії Helicobacter Pylori", на *L НТК підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ),* Вінниця, 2021, с.1-3.

[66] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, "Сенсор давления на основе резонансно-туннельного диода", *на XXI МНТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», ВОТТП-2021, Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку.* Одеса-Тернопіль, 2021, с.20-23.

[67] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, Г.О. Пастушенко, "Радіовимірювальний сенсор газу на основі сенсора Холла", *на VIII МНПК «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН-2021),* Вінниця, 2021, с.1-3.

[68] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.К. Скощук, "Використання ядра NIOS II як шлях до удосконалення багатоканальної радіотехнічної система на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин", *на LII НТК підрозділів Вінницького національного технічного університету НТКП ВНТУ,* Вінниця, 2023, с.1-4.

[69] О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.К. Скощук, "Використання цифрових сенсорів у багатоканальній радіотехнічній системі на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин із ядром NIOS II", *на Всеукраїнська науково-практична Інтернет-*

конференція студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)», Вінниця, 2023, с.1-4.

[70] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, А.Ю. Савицький, О.П. Червак, "Автогенераторний перетворювач вологості", Патент на винахід № 124906. МПК G01N 27/22. (Україна), 08.12.2021, Бюл. № 49.

[71] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, О.П. Червак, "Автогенераторний перетворювач тиску", Патент на винахід №124907 МПК G01L 33/12. (Україна), 08.12.2021, Бюл. № 49.

[72] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, О.П. Червак, "Перетворювач тиску з частотним виходом", Патент на винахід №124908 МПК G01L 21/00. (Україна), 08.12.2021, Бюл. № 49.

[73] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, А.Ю. Савицький, О.П. Червак, "Перетворювач вологості з частотним виходом", Патент на винахід № 125451 МПК G01N 27/12. (Україна), 09.03.2022, Бюл. № 10.

[74] О.В. Осадчук, В.Г. Мартинюк, Я.О. Осадчук, "Частотний вимірювач індукції магнітного поля на основі давача Холла", Патент на винахід № 126875 МПК H01L 43/06. (Україна), 15.02.2023, Бюл. № 7.

[75] О.В. Осадчук, В.Г. Мартинюк, Я.О. Осадчук, "Частотний вимірювач індукції магнітного поля на основі магніточутливого резистора", Патент на винахід №126876 МПК H01L 43/08. (Україна), 15.02.2023, Бюл. № 7.

[76] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, О.О. Селецька, О.П.Червак, "Мікроелектронний оптичний вимірювач концентрації газу з частотним виходом", Патент на корисну модель №137281 МПК G01N 21/01.(Україна),10.10.2019, Бюл.№ 19.

[77] О.В. Осадчук, А.О. Семенов, А.Ю. Савицький, Я.О. Осадчук, К.О. Коваль, "Мікроелектронний електрично керований генератор хаотичних коливань", Патент на корисну модель №141389 МПК H03B 29/00. (Україна), 10.04.2020, Бюл. № 7.

[78] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, О.П. Червак, "Автогенераторний перетворювач температури", Патент на корисну модель №145783 МПК G01K 7/00. (Україна), 06.01.2021, Бюл. № 1.

[79] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, А.О. Семенов, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький, О.П. Червак, "Високостабільний НВЧ генератор", Патент на корисну модель №146971 МПК H03B 7/00. (Україна), 31.03.2021, Бюл. № 13.

[80] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, А.О. Семенов, Л.В. Крилик, А.Ю. Савицький, О.П. Червак, "Високостабільний НВЧ генератор", Патент на корисну модель №147050 МПК H03B 7/00. (Україна), 08.04.2021, Бюл. № 14.

[81] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.Г. Мартинюк, І.В. Шаргало, "Вимірювач величини індукції магнітного поля на основі магніточутливого резистора", Патент на корисну модель № 147425 МПК H01L 43/02. (Україна), 05.05.2021, Бюл. № 18.

[82] О.В. Осадчук, Н.І. Осадчук, Я.О. Осадчук, О.С. Звягін, С.В. Павлов, О.В. Власенко, "Пристрій для вимірювання концентрації аміаку та діагностики штамів бактерії Helicobacter pylori", Патент на корисну модель № 147436 МПК G01N 27/00. (Україна), 05.05.2021, Бюл. №18.

[83] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, Д.Р. Ільчук, Г.О. Пастушенко, "Радіовимірювальний частотний пристрій з активним індуктивним елементом для

вимірювання рідких і газоподібних речовин”, Патент на корисну модель № 149246 МПК G01N 27/00. (Україна), 27.10.2021, Бюл. № 43.
[84] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, А.О. Семенов, С.В. Ліхашорський, Д.О. Думенко, “Активний електрично-керований фільтр низьких частот”, Патент на корисну модель № 149260 МПК H03H 7/01. (Україна), 27.10.2021, Бюл. № 43.
[85] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, А.О. Семенов, С.В. Ліхашорський, Д.О. Думенко, “Активний електрично-керований фільтр високих частот”, Патент на корисну модель № 149261 МПК H03H 7/01. (Україна), 27.10.2021, Бюл. № 43.
[86] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л. В. Крилик, Я.О. Осадчук, “Мікроелектронний перетворювач вологості з частотним виходом”, Патент на корисну модель № 152448 МПК G01N 27/12. (Україна), 08.02.2023, Бюл. № 6.
[87] О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, “Мікроелектронний пристрій для вимірювання вологості з частотним виходом”, Патент на корисну модель № 152828 МПК G01N 27/12. (Україна), 19.04.2023, Бюл. № 16.
[88] О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, “Пристрій для вимірювання вологості з частотним виходом”, Патент на корисну модель № 153188 МПК G01N 27/00. (Україна), 31.05.2023, Бюл. № 22.
[89] О.В. Осадчук, Л.В. Крилик, Я.О. Осадчук, “Мікроелектронний вологомір з частотним виходом”, Патент на корисну модель № 153297 МПК G01N 27/12. (Україна), 14.06.2023, Бюл. № 24.

АНОТАЦІЯ

Осадчук Я.О. **Автогенераторні перетворювачі фізичних величин та пристрої на їх основі для комп’ютерних систем і мереж загального та спеціального призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 «Комп’ютерні системи та компоненти». – Вінницький національний технічний університет, МОН України, Вінниця, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено розв’язанню науково – прикладної проблеми, яка полягає у необхідності розроблення нових та вдосконалення відомих методів вимірювання фізичних величин та створення нових автогенераторних приладів вимірювання цих величин на основі автогенераторних пристроїв, що забезпечують їх динамічний режим роботи при електричному перелаштуванню параметрів автоколивальної системи при дії зовнішніх факторів та розроблення на їх базі пристроїв для перетворення інформації в комп’ютерних та інформаційно-вимірювальних системах і мережах загального та спеціального призначення.

На основі принципу перетворення енергії у квантових і мікроелектронних транзисторних структурах запропоновано нові методи розрахунку основних характеристик пристроїв, які дозволили отримати вихідні характеристики у параметричній залежності від діючих зовнішніх факторів та параметрів первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів.

Розроблено математичні моделі автогенераторних перетворювачів вимірювання температури, оптичної потужності, тиску, індукції магнітного поля, концентрації газів, вологості, в яких значно простіше розраховуються аналітичні

формули параметричної залежності функцій перетворення і чутливості, які враховують вплив вхідного інформативного сигналу параметрів первинних перетворювачів і параметрів автогенераторів на функції перетворення і чутливості у порівнянні з існуючими методами розрахунку цих функцій з рівнянь Кірхгофа.

Розроблено і досліджено схеми, конструкції, автогенераторних приладів вимірювання температури, оптичної потужності, індукції магнітного поля, тиску, концентрації газів, вологості у вигляді квантових і мікроелектронних транзисторних структур, які працюють у діапазоні 10^3-10^9 Гц.

На основі розроблених приладів побудовано багатоканальні пристрої вимірювання запахів і концентрацій газів, параметрів навколишнього середовища, систему моніторингу характеристик маслонаповнених енергетичних установок, систему моніторингу параметрів спортсмена – весляра, які працюють у реальному масштабі часу з бездротової передачею інформації, багатоканальні підривні пристрої наземного та повітряного типів.

Ключові слова: автогенераторний перетворювач, математична модель, від'ємний диференціальний опір, комп'ютерна система, інформаційно-вимірювальна система, комп'ютерні компоненти, перетворювач фізичних величин, FPGA, частота.

ABSTRACT

Osadchuk I.O. **Self-oscillating transducers of physical quantities and devices based on them for general and special purpose computer systems and networks. – Qualifying scientific work on manuscript rights.**

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.05 «Computer Systems and Components». - Vinnytsia National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2024.

The dissertation work is devoted to solving a scientific and applied problem, which consists in the need to develop new and improve known methods for measuring physical quantities and create new self-generator devices for measuring these quantities based on self-generator devices that ensure their dynamic operation during electrical adjustment of the parameters of the self-oscillating system under the influence of external factors and develop on their basis devices for converting information in computer and information-measuring systems and networks of general and special purpose.

The work proposes a new principle for the construction of self-generator devices for measuring physical quantities, which is based on the conversion of the energy of a constant electric field into the energy of an alternating electric field in quantum and microelectronic transistor structures with negative differential resistance, which provides a wide dynamics of output frequency tuning.

Based on the principle of energy conversion in quantum and microelectronic transistor structures, new methods for calculating the main characteristics of devices have been proposed, which allowed obtaining output characteristics in parametric dependence on the operating external factors and parameters of primary converters and parameters of oscillators. This allows design developers to calculate and select optimal operating frequencies and optimal operating modes of devices.

Mathematical models of oscillator devices for measuring temperature, optical power, pressure, magnetic field induction, gas concentration, and humidity have been

improved, in which analytical formulas for the parametric dependence of the conversion and sensitivity functions are calculated much more easily, which clearly demonstrate the influence of the input informative signal of the parameters of primary converters and parameters of oscillators on the conversion and sensitivity functions in comparison with existing methods for calculating these functions from Kirchhoff's equations.

The mathematical model of the oscillator based on the quantum structure of a tunnel-resonant diode with negative differential resistance when operating in a quasi-linear mode based on the solution of the differential equation of the oscillatory system was improved, which made it possible to obtain conditions for stable operation and the dependence of the output voltage on time.

Schemes, designs, self-oscillating devices for measuring temperature, optical power, magnetic field induction, pressure, gas concentration, humidity in the form of quantum and microelectronic transistor structures operating in the range of 10^3-10^9 Hz were proposed, developed and investigated.

Theoretical principles, operating principles, schemes and designs of multi-channel devices for simultaneous measurement of frequency and digital information, the parameters of which are coordinated with computer and information-measuring systems and networks of general and special purpose, have been developed.

Theoretical principles, operating principles, schemes and designs of a multi-channel computer information-measuring system for monitoring the parameters of powerful oil-filled power plants based on the developed self-oscillating measuring devices have been developed. A computer information-measuring system for the physical parameters of a rower during his work and the boat's movement mode has been developed based on the developed self-oscillating measuring devices. A computer information-measuring system for measuring and controlling the parameters of a gas environment has been developed based on the proposed self-oscillating devices. Theoretical principles, operating principles, schemes and designs of multi-channel subversive devices of ground and air types have been developed based on the developed self-oscillating devices for civil and military equipment.

Keywords: self-oscillating transducer, mathematical model, negative differential resistance, computer system, information and measuring system, computer components, transducer of physical quantities, FPGA, frequency.

Підписано до друку __.__.2025 р. Формат 29,7х42 ¼.
Наклад 100 прим. Зам. № 2025-012.
Віддруковано в комп’ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06
Суб’єкт видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.