

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Притули Максима Олександровича

**на тему: «Високочутливий радіовимірювальний прилад індукції
магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних**

структур», представленій на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук за спеціальністю

05.11.08 – радіовимірювальні прилади

1. Актуальність дисертаційного дослідження

У даний час радіовимірювальні прилади індукції магнітного поля знайшли широке використання в різних областях науки і техніки. Наприклад, радіовимірювальні прилади індукції магнітного поля (РПІМП) дозволяють безконтактно і дуже точно вимірювати відстань до об'єктів, на яких розміщений мініатюрний постійний магніт. Цей принцип реєстрації лінійних та кутових переміщень і положень об'єктів в просторі застосовується в авто- і авіатехніці, автоматизованих верстатах і складальних лініях в промисловості. Вимірювання параметрів магнітного поля Землі також необхідно в навігації, під час пошуку корисних копалин, в системах безпеки та виявлення зброї. При цьому необхідно вирішувати завдання підвищення чутливості, надійності, зменшення маси, споживаної потужності і зниження собівартості РПІМП.

Для багатьох практичних застосувань важливим є дистанційне безконтактне вимірювання індукції магнітного поля. В принципі, такі вимірювання можна здійснювати за допомогою оптичних методів реєстрації. До таких належать магнітооптичні прилади, в сенсорах яких відбувається зміна характеристик відбитого світла в зовнішньому магнітному полі. Однак, наявність слабкої модуляції світла суттєво обмежує можливість практичного застосування традиційних магнітооптичних структур.

Іншим прикладом високочутливих радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля є прилади на базі SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Вони мають високу чутливість, але широкого використання не набули, оскільки вимагають для своєї роботи достатньо габаритної криогенної установки.

Таким чином, виникає необхідність розширення наукових досліджень в галузі вітчизняного виробництва радіовимірювальних приладів та їх складових з огляду їх подальшого розвитку в напрямках: малі масогабаритні показники, висока точність, надійність, відтворюваність, низька вартість та інтеграція з

сучасними технологіями виробництва.

У радіовимірювальних приладах, які використовують перетворення «напруга - частота», зміна частоти електричного інформативного сигналу на виході пропорційна інтенсивності зовнішньому впливу. Інтерес до розробки таких приладів зумовлений низкою особливостей і переваг перед традиційними, що представляють вихідний сигнал у вигляді струму або напруги. Частотна форма вихідного сигналу забезпечує можливість організації заводо захищеного зв'язку з функціональними блоками апаратури. Це може бути дуже корисно для широкого ряду застосувань. Такі радіовимірювальні прилади можуть мати порівняно невелику вартість, і при цьому бути високоточними передавачами даних. Крім того, метод перетворення значення фізичної величини в інформативну частоту дозволяє підвищити робочу частоту, підвищити роздільну здатність, дозволяє спростити перетворення аналогового сигналу в цифровий, оскільки в деяких випадках це дає можливість відмовитися від використання блоків підсилення.

Зазначені фактори визначають актуальність проблеми розробки високочутливих радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля.

2. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі, обумовлюється використанням:

- рівнянь математичної фізики та фізики напівпровідників при розробці математичних моделей радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля;
- положень комплексного аналізу для визначення функції перетворення та рівняння чутливості радіовимірювальних перетворювачів;
- теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення функцій перетворення та рівнянь чутливості;
- теорії ймовірності для оцінки випадкових похибок вимірювання.

Отримані нові положення викладені у логічній послідовності, доповнюються визначеними характеристиками, параметрами і властивостями для радіовимірювальних приладів і в такий спосіб доводять достовірність отриманих результатів, які аналізуються і зіставляються з теоретичними моделями і технічною розробкою.

3. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Удосконалено математичну модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з сенсора Холла та частотного

перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано вплив індукції та частоти зовнішнього магнітного поля, напруг живлення та характеристик керування на частоту вихідних коливань перетворювача, що забезпечило підвищення чутливості радіовимірювального приладу до 620 Гц/мТл в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0-200 мТл.

2. Удосконалено математичну модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано вплив індукції та частоти зовнішнього магнітного поля, напруг живлення та характеристик керування на частоту вихідних коливань перетворювача, що забезпечило зменшення похибки нелінійності перетворювача до 1,8%.

3. Удосконалено математичну модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля радіовимірювального приладу, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано вплив індукції та частоти зовнішнього магнітного поля, напруг живлення та характеристик керування на частоту вихідних коливань перетворювача, що забезпечило підвищення чутливості радіовимірювального приладу до 1,25 кГц/мТл в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0 ... 1000 мТл.

4. Отримано нові функції перетворення та рівняння чутливості перетворювачів радіовимірювального приладу індукції магнітного поля, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано вплив індукції та частоти магнітного поля, напруг живлення та характеристик керування на частоту вихідних коливань радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля з диференційним опором.

4. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом

Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: математична модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля з магнітотранзистором та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з трьох біполярних транзисторів; математична модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля з сенсором Холла та

частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з двозатворного та двох біполярних транзисторів; математична модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля з двоколекторним магнітотранзистором та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з двозатворного та двох біполярних транзисторів; математична модель транзисторної структури, керованої напругою; аналіз та дослідження напівпровідникових магнітних сенсорів; дослідження вимірювальних приладів на ефекті Джозефсона; структура триканального приладу вимірювання індукції магнітного поля; схемотехнічне рішення автогенераторного кола мікроелектронного приладу для вимірювання магнітної індукції.

5. Повнота опублікування основних результатів дисертації

Новизна та актуальність роботи підтверджуються 14 науковими працями, з яких 3 статті у фахових виданнях зі списку ДАК України, 2 статті в міжнародних періодичних виданнях, 5 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 4 патенти на корисні моделі України. Серед зазначених наукових праць, чотири опубліковано у виданнях, що внесені до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Дисертаційна робота складається із вступу і 4 розділів, 5 додатків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації 186 сторінок, з яких основний зміст викладений на 145 сторінках друкованого тексту, містить 78 рисунків, 4 таблиці. Список використаних джерел містить 104 найменування.

6. Практична цінність дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Запропоновано схемотехнічні рішення радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля:

– магніточутливого елемента Холла з частотним перетворювачем на основі двозатворного та двох біполярних транзисторів з чутливістю в межах від 0,6 кГц/мТл при магнітній індукції 10 мТл до 0,3кГц/мТл;

– магніточутливого двоколекторного біполярного транзистора з частотним перетворювачем на основі двозатворного та двох біполярних транзисторів з чутливістю 0,1765 кГц/мТл при індукції магнітного поля 100 мТл та 0,1645 кГц/мТл індукції магнітного поля 1000 мТл за похибок нелінійності 1,8% в діапазоні 0-300 мТ та 4,7% в діапазоні 0,3-1 Т;

– магніточутливого двоколекторного біполярного транзистора з

частотним перетворювачем на основі трьох біполярних транзисторів з чутливістю для індукції магнітного поля $B=10$ мТл – $2,55$ кГц/мТл, для індукції магнітного поля $B=1000$ мТл – $0,83$ кГц/мТл;

2. Розроблено та практично реалізовано радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю на основі реактивних властивостей транзисторних структур, який використовує радіовимірювальний частотний перетворювач, що складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів. Граничне значення систематичної складової основної похибки вимірювань складає $\pm 0,75\%$.

7. Цінність одержаних результатів для науки і практики

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу підвищення чутливості вимірювання індукції магнітного поля шляхом використання додаткового перетворення "напруга-частота" в радіовимірювальних приладах.

Удосконалено математичні моделі перетворювачів магнітного поля радіовимірювальних приладів, схемотехнічна реалізація яких забезпечила підвищення чутливості приладу на основі перетворення "магнітна індукція - частота". Зокрема:

– для частотного перетворювача на основі польового та двох біполярних транзисторів з елементом Холла, було підвищено чутливість в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля $0 \dots 200$ мТл до 620 Гц/мТл;

– для радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, було зменшено похибку нелінійності до $1,8\%$;

– удосконалення математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, дозволило підвищити чутливість в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля $0 \dots 300$ мТл до значення $2,41$ кГц/мТл, а в діапазоні $0,3 \dots 1$ Тл – до значення $1,25$ кГц/мТл.

На основі запропонованих вимірювальних перетворювачів "магнітна індукція - частота" розроблений та практично реалізований радіовимірювальний прилад вимірювання індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю,

граничне значення систематичної складової основної похибки вимірювань якого складає $\pm 0,75\%$.

Представлені конструктивні рішення захищені 4 патентами України на корисну модель.

8. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалась згідно з програмою розвитку електронної промисловості України на 2015-2020 роки "Електроніка України – 2015", держбюджетними науково-дослідними роботами:

– "Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором" (2013-2014 р.), ДР № 0113U003133;

– "Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових структур" (2015-2016 р.), ДР № 0115U001123;

– "Розробка моделей та принципів схем радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля та їх дослідження" (2016 р.), ДР № 0116U005137;

– "Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах" (2017 р.), ДР № 0117U000573;

9. Оцінка мови та стилю викладання дисертації та автореферату.

В цілому дисертація та автореферат написані технічно грамотною мовою, стиль викладення результатів досліджень доказовий. Стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття. Зустрічаються окремі стилістичні помилки, які не впливають на сприйняття матеріалів дисертації та автореферату.

10. Відповідність автореферату змісту дисертації. Зміст автореферату повністю відповідає змісту дисертації.

11. Зауваження щодо змісту дисертації

Серед недоліків дисертації слід відмітити наступні:

1. Перший розділ дисертації не містить чисельного порівняння чутливості представлених радіовимірювальних приладів;

2. Відсутнє достатнє обґрунтування вибору еквівалентних моделей магніточутливих елементів, зокрема, сенсора Холла та двоколекторного

біполярного магнітотранзистора при побудові еквівалентних електричних схем радіовимірювальних перетворювачів;

3. З функцій перетворення "магнітна індукція - частота" (2.14) незрозуміло, яким чином врахований вплив напруг керування та живлення на характеристики перетворення;

4. В роботі не вказано, який тип кварцового генератора використаний для реалізації радіовимірювального приладу вимірювання індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю;

5. В роботі не вказано, з яких міркувань обрано час вимірювання частоти 0,1 с (с. 155 дисертації);

6. Було б доречно більш детально розглянути особливості побудови схеми термостатування приладу вимірювання індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю та обґрунтувати вибір температури термостатування – $53^{\circ}\text{C} \pm 0,05^{\circ}\text{C}$ (с. 160);

6. У дисертаційній роботі зустрічаються не досить вдалі стилістичні вирази, зокрема: «XXI століття збільшило кількість обчислювальної та вимірювальної техніки в житті кожної людини, що негативно відбивається на природі та людині» (с. 16); «При розміщенні робочої точки на зростаючій ділянці ВАХ ...» (с. 82); «За допомогою мікропроцесорів ми можемо забезпечити підвищення продуктивності процесу вимірювання, збільшити чутливість ...» (с. 137); «Похибка нестабільності кварцового генератора ...» (с. 155) та інш.

12. Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Таким чином, дисертаційна робота Притули Максима Олександровича є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна науково-технічна задача підвищення чутливості вимірювання індукції магнітного поля шляхом використання додаткового перетворення "напруга-частота" в радіовимірювальних приладах. Наукові положення, сформульовані в роботі, повністю обґрунтовані. Основні положення дисертаційної роботи в достатній мірі відображені в публікаціях в наукових журналах, доповідях на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. Викладення результатів теоретичних та експериментальних досліджень, моделювання, фізичних експериментів відповідає вимогам щодо наукових публікацій.

Вважаю, що за актуальністю теми, ступеню обґрунтованості і достовірності результатів, наукової новизни і практичному значенню дисертаційна робота Притули Максима Олександровича «Високочутливий

радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур» є самостійною завершено науковою працею, яка відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 607 від 15.07.2020), а її автор Притула Максим Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю – 05.11.08 – радіовимірювальні прилади.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
Хмельницького національного університету



Сергій ПІДЧЕНКО

Підпис Підченка С.К. засвідчую.

Проректор з наукової роботи
Хмельницького національного університету
д.т.н., професор



Олег СИНЮК