

ВІДЗИВ

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Притули Максима Олександровича на тему «Високочутливий радіовимірвальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірвальні прилади

1. Актуальність теми дисертації

Бурхливий процес розвитку нових технологій та впровадження їх в галузі промисловості, де індукція магнітного поля є одним із основних параметрів, вимагає наукових досліджень та розробки нових методів вимірювання, створення сенсорів магнітного поля на основі новітніх досягнень нанотехнологій.

Зокрема, високочутливі радіовимірвальні прилади індукції магнітного поля, використовувані при геофізичних дослідженнях повинні мати дуже високу чутливість, точність і швидкодію. Саме висока чутливість і швидкодія сучасних радіовимірвальних приладів сприяють ефективному використанню в системах виявлення і пеленгації об'єктів, що рухаються, так само як і систем пеленгації і наведення, що встановлюються на об'єктах, які швидко рухаються.

Ще одним прикладом актуальності застосування вимірювання параметрів магнітних полів є сучасна автомобільна промисловість. Зокрема, тенденція переходу на легкові електромобілі, створила проблему забезпечення електромагнітної сумісності всіх пристроїв на борту авто та електромагнітної безпеки користувачів електротранспорту. Для пошуку шляхів вирішення даної проблеми також використовуються високочутливі радіовимірвальні прилади. Насправді, областей використання високочутливих радіовимірвальних приладів вимірювання параметрів магнітних полів, крім зазначених, є досить багато. Основна задача їх подальшого розвитку полягає у підвищенні чутливості та точності вимірювання параметрів магнітних полів.

Для вирішення цієї задачі дисертант пропонує використовувати радіовимірвальні частотні перетворювачів, які реалізують принцип перетворення «індукція-частота», на основі використання реактивних властивостей транзисторних структур з диференційним опором. Тому дисертаційна робота М. О. Притули, яка направлена на вирішення цих задач, є актуальною.

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи

Достовірність та обґрунтованість наукових положень і висновків роботи забезпечено коректністю постановки задач, правильно обраними методами їх вирішення, співставленням одержаних результатів із результатами, опублікованими в наукових працях авторів у провідних виданнях, коректною організацією експериментальних досліджень із застосуванням сучасного вимірювального обладнання, стандартних методів статистичної обробки результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень, а також представленням та обговоренням результатів роботи на тематичних міжнародних та вітчизняних конференціях.

3. Наукова новизна отриманих результатів дослідження

- Вдосконалено математичну модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля радіовимірювального приладу, 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 керування на частоту вихідних коливань перетворювача, схемотехнічна реалізація якої забезпечила підвищення чутливості до 620 Гц/мТл всього радіовимірювального приладу в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0...200 мТл.

- Вдосконалено математичну модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля радіовимірювального приладу, 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 керування на частоту вихідних коливань перетворювача, схемотехнічна реалізація якої забезпечила зменшення похибки нелінійності перетворювача до 1,8% та приладу в цілому.

- Вдосконалено 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 керування на частоту вихідних коливань перетворювача, схемотехнічна реалізація якої забезпечила підвищення чутливості радіовимірювального приладу до 1,25 кГц/мТл в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0...1000 мТл.

- 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 керування на частоту вихідних коливань радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля з диференційним опором, що дозволило вибрати схемотехнічне рішення з найбільшою чутливістю для розробки високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур.

4. Цінність дисертаційної роботи для науки

У дисертації запропоновано нові теоретичні підходи, що приводять до технічних рішень, які дозволяють створити радіовимірювальні частотні перетворювачі індукції магнітного і на їх основі високочутливі радіовимірювальні прилади індукції магнітного поля. Цим і визначається цінність дисертації для науки.

5. Практична цінність отриманих результатів дослідження

Практична цінність роботи полягає у наступному:

- Вдосконалено три схемотехнічні рішення радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля: перше – магніточутливий елемент Холла з частотним перетворювачем на основі двозатворного та двох біполярних транзисторів; друге – магніточутливий двоколекторний біполярний транзистор з частотним перетворювачем на основі двозатворного та двох біполярних транзисторів; третє – магніточутливий двоколекторний біполярний транзистор з частотним перетворювачем на основі трьох біполярних транзисторів.

- Експериментально досліджено характеристики трьох радіовимірювальних частотних перетворювачів вимірювального приладу індукції магнітного поля:

а) чутливість першого варіанту радіовимірювального перетворювача радіовимірювального приладу змінюється в межах від 1,6 кГц/мТл при магнітній індукції 10 мТл до 0,2 кГц/мТл при магнітній індукції 100 мТл; подальше коливання чутливості від 0,2 кГц/мТл до 0,26 кГц/мТл в діапазоні зміни магнітної індукції 100...1000 мТл є незначним;

б) чутливість другого варіанту радіовимірювального перетворювача радіовимірювального приладу змінюється в залежності від значення зовнішнього магнітного поля: при індукції магнітного поля 100 мТл, чутливість пристрою становить 0,1765 кГц/мТл, а при магнітній індукції 1000 мТл –

0,1645 кГц/мТл; досліджуваний радіовимірвальний перетворювач радіовимірвального приладу індукції магнітного має найменшу похибку нелінійності, значення якої не перевищує 1,8% в діапазоні 0...300 мТ, та 4,7% в діапазоні 0,3...1 Т;

в) третій радіовимірвальний перетворювач радіовимірвального приладу має різну крутість характеристики чутливості при різному рівні магнітної індукції: для індукції магнітного поля 10 мТл чутливість становить близько 2,8 кГц/мТл, а при індукції магнітного поля 1000 мТл чутливість становить близько 0,83 кГц/мТл; найбільша чутливість спостерігається при магнітній індукції в межах 0...100 мТ.

- Розроблено високочутливий радіовимірвальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур, який використовує радіовимірвальний частотний перетворювач, що складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів. Розраховано його метрологічні характеристики.

6. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Зміст дисертації відображає мету роботи, основні завдання, проведені теоретичні та експериментальні дослідження, отримані науково-технічні результати прикладного характеру.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано основну мету та задачі роботи, що розв'язувалися для її досягнення, показано наукове і практичне значення отриманих результатів, приведені наукова новизна, зв'язок з науковими програмами, планами та виконаними держбюджетними темами, зазначено особистий внесок здобувача, надано інформацію про апробацію результатів досліджень, впровадження та наукові публікації за темою дисертаційних досліджень.

У першому розділі проведено порівняльний аналіз сучасного стану розвитку радіовимірвальних приладів вимірювання параметрів магнітного поля. Розглянуто основні параметри, метрологічні характеристики, переваги та недоліки радіовимірвальних приладів з різними типами сенсорів. Запропоновано класифікацію частотних сенсорів тиску: радіовимірвальні прилади з магніторезистивними сенсорами на ефекті Гаусса, прилади з анізотропними магніторезисторами, прилади з магнітними сенсорами на основі гігантського магніторезистивного ефекту, прилади на основі спін-тунельних магніторезистивних сенсорів, приладів з сенсорами на основі ядерного магнітного резонансу, прилади, які використовують явища надпровідності, прилади з ферозондовими сенсорами, прилади з напівпровідниковими

сенсорами, прилади з частотними перетворювачами.

На основі проведеного аналізу, було обґрунтовано вибір базового принципу вимірювання індукції магнітного поля, в основі якого лежить перетворення індукції магнітного поля у частоту. В результаті аналізу ряду наукових робіт з'ясовано, що підвищити чутливість перетворення і зменшити похибки вимірювання індукції магнітного поля можливо шляхом розроблення радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля. Результатом першого розділу є вибір напрямку та формування задач подальших досліджень.

У другому розділі дисертації було вдосконалено математичні моделі трьох радіовимірювальних частотних перетворювачів. Модель радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля, який складається з сенсора Холла та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, дозволила підвищити чутливість в радіовимірювальному приладі індукції магнітного поля, що містить у своєму складі такий перетворювач. Зокрема, чутливість була підвищена в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0-200 мТл і становила 620 Гц/мТл. Модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, дозволила зменшити похибку нелінійності як перетворювача так і радіовимірювального приладу індукції магнітного поля в цілому до значення 1,8% в діапазоні індукцій магнітного поля від 0 до 300 мТл. Модель радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, дозволила підвищити чутливість в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0-300 мТл до значення 2,41 кГц/мТл, в діапазоні 0,3-1 Тл – до значення 1,25 кГц/мТл.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено експериментальному дослідженню трьох радіовимірювальних частотних перетворювачів. На основі вдосконалених моделей перетворювачів були виготовлені їх експериментальні зразки, та проведено експериментальні дослідження цих зразків. Для першого частотного перетворювача було проведено додатково оцінку впливу температури. Результати експериментальних досліджень трьох радіовимірювальних частотних перетворювачів були порівняні між собою та з теоретичними даними, отриманими в другому розділі. Результати експериментальних досліджень підтвердили теоретично отримані дані. Максимальна похибка моделі становить 1,81% для випадку радіовимірювального частотного перетворювача індукції магнітного поля, який складається з двоколекторного магніточутливого біполярного транзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів. Саме цей радіовимірювальний частотний перетворювач має і найбільшу чутливість, яка

становить, наприклад, для індукції магнітного поля $B=1$ мТл, чутливість становить близько $S=2,73$ кГц/мТл, а при індукції магнітного поля $B=1000$ мТл чутливість становить близько $S=0,85$ кГц/мТл.

В четвертому розділі дисертації розроблено структурну та принципову схему високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур, який може використовуватись в різних галузях промисловості: медичній, метрологічній, навігаційній та інших. Для розробленого приладу була використаний радіовимірювальний частотний перетворювач, який забезпечує найбільшу чутливість.

Структура високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля складається з мікропроцесора, кварцового резонатора, стабілізованої системи живлення, радіовимірювального перетворювача та системи термостабілізації, яка підтримує стабільну роботу радіовимірювального перетворювача в межах $53^{\circ}C \pm 0,05^{\circ}C$. Було проведено комп'ютерне моделювання частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, що входить до складу радіовимірювального перетворювача розробленого приладу, яке дозволило підтвердити функціонування модельованого блоку. Були розраховані статичні похибки, що входять до загальної похибки радіовимірювального приладу індукції магнітного поля. Визначена систематична складова основної похибки радіовимірювального приладу індукції магнітного поля, яка становить $\delta_{\Sigma} = 0,25$ %. Визначено, що її граничне значення складає $\pm 0,75$ %.

7. Повнота висвітлення результатів у наукових працях і особистий внесок здобувача

На основі результатів наукових досліджень автора опубліковано 3 статті у фахових виданнях з переліку 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, 4 опубліковано в фахових виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus. Аналіз внеску автора в публікації з питань, висвітлених у дисертації показав, що внесок Притули М. О. є суттєвим.

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

Робота виконувалась згідно з госпдоговірними та держбюджетними науково-дослідними роботами:

1) 32-Д-354 "Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором" (2013-2014 р.), № державної реєстрації 0113U003133;

2) 32-Д-373 "Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових структур" (2015-2016 р.), № державної реєстрації, 0115U001123;

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

4) 32-Д-386 "Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах" (2017 р.), № державної реєстрації, 0117U000573;

5) Програми розвитку електронної промисловості України на 2015-2020 роки "Електроніка України – 2015".

9. Відповідність автореферату змісту дисертаційної роботи

Автореферат повністю висвітлює зміст дисертаційної роботи, її мету та наукову новизну. В ньому подано коротку інформацію про кожний розділ дисертації, а також інші необхідні дані. Оформлення дисертації та автореферату відповідають вимогам МОН України.

10. Зауваження щодо змісту дисертації

1. Перший розділ дисертації можна значно скоротити не розглядаючи детально різноманіття радіовимірювальних приладів та їх сенсорів.

2. Не має опису, яким чином були вдосконалені математичні моделі і до яких позитивних результатів це привело.

3. Відсутнє обґрунтування щодо вибору кількості піддіапазонів при лінеаризації функцій перетворення: для першого радіовимірювального перетворювача обрано три піддіапазони, для другого та третього – два.

4. Не вказано, яким чином, під час проведення експериментів було враховано вплив магнітного поля магнітної лінзи в структурній схемі рис. 3.1, рис. 3.5 та рис. 3.9 на частотний перетворювач.

5. Чому в експериментальних дослідженнях вплив температури був врахований лише для одного радіовимірювального частотного перетворювача?

6. Доцільно було б надати розрахунок функції перетворення (або лістинг програми для її розрахунку).

7. В тексті роботи зустрічаються неточні вирази, описки.

11. Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Виходячи з розгляду дисертації і зауважень до неї, вважаю, що зауваження не стосуються її принципових положень. За актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, новизною і ступенем обґрунтованості наукових положень та практичною цінністю, дисертація Притули Максима Олександровича "Високочутливий радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур" є завершеною науково-дослідною роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.11.08 – радіовимірювальні прилади і вимогам п.п. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (із змінами), 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,
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського»,
професор кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій

