

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Витяганця Андрія Івановича на тему «**Магніторезистивний перетворювач
 активної потужності в радіотехнічних системах**»,
 подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 за спеціальністю 05.12.17 - радіотехнічні та телевізійні системи

Актуальність теми.

Вимірювання потужності, яка є основною енергетичною характеристикою, займає важливе місце в сучасних електронних системах. Активна потужність характеризує інтенсивність електромагнітних процесів і є одним з ключових параметрів радіотехнічних та телевізійних систем, комплексів, пристроїв і вузлів. Для керування потужністю систем використовують різні нелінійні елементи і пристрої. Побічний ефект застосування нелінійних елементів полягає в спотворюванні та розширенні спектра вихідного сигналу, що погіршує показники систем і процесів та визначає необхідність контролю активної потужності в реальному часі.

Вдосконалення радіотехнічних та телевізійних систем, які використовуються як в телекомунікаціях, так і в технологічних процесах потребує підвищення чутливості, точності та розширення частотного діапазону вимірювання активної потужності приладами контролю.

Сучасні електродинамічні та феродинамічні вимірювачі потужності дають суттєві похибки через нелінійність, гістерезис, велике власне споживання енергії, чутливість до зовнішніх магнітних полів, наявність частотної і кутової похибок, невеликий обертальний момент. Цифрові вимірювачі потужності характеризуються недостатньою швидкістю, високою вартістю і необхідністю розривати лінію передачі під час вимірювання активної потужності. Недоліками ватметрів на основі перетворювачів Холла є значна похибка через термоелектрорушійну силу, наявність випрямляючих контактів в напівпровідниках, крім того, недостатня чутливість і точність, складна технологія виготовлення, значний розкид параметрів однотипових перетворювачів, сильна залежність опору і коефіцієнта Холла від температури та магнітного поля, наявність залишкової напруги, низька величина коефіцієнта корисної дії, малий динамічний діапазон вимірювання потужності (30 дБ для перетворювачів Холла, ~40 дБ – електро- та феродинамічних перетворювачів).

Вимогам необхідних рівнів чутливості, точності та мініатюрності, як показано в роботах Вунтесмері В. С. та Гури К. М., цитованих автором дисертації, задовольняють вимірювальні магніторезистивні перетворювачі активної потужності. Однак застосування таких перетворювачів обмежене діапазоном НВЧ.

Вимірювання прохідної активної потужності представляє собою важливу науково-технічну задачу, оскільки велика кількість радіотехнічних пристроїв потребує вимірювання потужності в області низьких і середніх частот і в широкому динамічному діапазоні.

Таким чином, **актуальною** науково-технічною задачею є частотне

транспонування вимірювання активної потужності магніторезистивними (плівковими) перетворювачами в нижній діапазон частот.

Основна ідея дисертації А. І. Витяганця полягає в розробленні магніторезистивних тонкоплівкових перетворювачів активної потужності з розширенням діапазону частот вимірювального сигналу в область НЧ, включаючи постійний струм.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з програмою наукових досліджень кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури КПІ ім. Ігоря Сікорського, в рамках низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Високоєфективні пристрої обробки сигналів на основі двофазних кристалоподібних структур» (номер держреєстрації 0112U001657), «Створення теоретичних основ аподизованих кристалоподібних структур пристроїв обробки сигналів» (номер держреєстрації 0114U000578). Робота Витяганця А.І. продовжує дослідження в цій галузі, які були виконані та опубліковані в *радіотехнічному факультеті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»* Вунтесмері В.С., Гурою К.М. та Івкіним П.В.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Використані автором методи дослідження базуються на апараті математичного аналізу, зокрема розв'язанні системи диференціальних рівнянь, математичної фізики, електродинаміки, чисельному моделюванні, теорії нелінійних кіл та розв'язанні нелінійного рівняння Ландау-Ліфшиця. Розв'язуючи поставлені задачі, автор коректно застосовував методи наближених обчислень, чисельні методи аналізу, тригонометричні ряди Фур'є, векторний та тензорний аналізи, теорію диференціальних та інтегральних рівнянь, а також користувався елементами теорії ймовірностей та математичної статистики при обробці експериментальних результатів.

Отже, отримані автором наукові результати є логічними, математично доведеними, за сформульованих умов можуть бути однозначно інтерпретовані, не суперечать базовим твердженням математики і фізики електромагнетизму та не створюють протиріч при оцінці можливостей імплементації цих результатів на практиці.

Достовірність результатів досліджень.

У роботі використано добре обґрунтований процес визначення активної потужності вимірювальним перетворювачем з модульованим режимом роботи на основі гальваномагнітних ефектів у тонких феромагнітних плівках з розширеним НЧ діапазоном його роботи. Можна засвідчити, що основні наукові результати в дисертації в цілому є достатньо обґрунтованими теоретично, а їх достовірність підтверджено великим обсягом числових та експериментальних результатів, які отримано при перевірці розв'язків обернених задач розсіювання для тестових випадків.

Наукова новизна отриманих результатів.

Можу погодитися з тим, що фізичну модель вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот, на основі тензора магніторезистивної сприйнятливості, компоненти якого визначені в явному

вигляді для довільно намагніченої феромагнітної плівки побудовано вперше. Але автор не обмежився цим, а дослідив зміну тензора питомого опору феромагнітної плівки в залежності від невідомої намагніченості, розміщеної під довільним кутом до площини плівки, а також описав рух вектора намагніченості в плівці під дією зовнішнього змінного магнітного поля і дослідив зміну тензора питомого опору феромагнітної плівки під дією прикладеного змінного магнітного поля в присутності постійного магнітного поля зміщення.

Запропонований спосіб інвертування досліджуваних сигналів, який відрізняється тим що варіюється величина вектора постійного магнітного поля, з метою усунення паразитної електрорушійної сили квадратичних складових магнітного і електричного полів, а також термоелектрорушійної сили вимірювального перетворювача активної потужності, я би відніс скоріше до практичної корисності, а не до наукової новизни.

Автором роботи розроблено математичну модель, яка описує фізичні процеси в магніторезистивному тонкоплівковому перетворювачі активної потужності в лінії передачі. Вона відрізняється тим що враховує фазовий зсув між довільно прикладеним зовнішнім магнітним полем і намагніченістю плівки. Це дозволило дослідити гальваноманітні ефекти в широкій смузі частот. І цю модель я також вважаю внеском в наукову новизну, так само, як і побудовану математичну модель параметричного середовища на основі аномального ефекту Холла і анізотропії магнітоопору феромагнітних плівок.

На основі комп'ютерного моделювання тривимірної електромагнітної структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача активної потужності в роботі визначено розподіл та напрямки струму і тангенціального електричного поля, що дозволило знівелювати паразитні складові струму та отримати аналітичний вираз для його вхідного опору. Певне розходження між реальними значеннями і значеннями, які отримані в процесі моделювання, як вважає автор, обумовлені втратами, які не повністю враховані в моделі. Тут, думаю, слід було б коректніше врахувати домішки і шорсткість поверхні при моделюванні.

В роботі вперше показано, що в розробленому модульованому режимі функціонування перетворювача активної потужності з інвертуванням напруги і струму в навантаженні незалежно від їх полярності, забезпечується частотна інваріантність сигналу, тобто він вимірюється, в широкому діапазоні частот, включаючи постійний струм. Саме в такому формулюванні цей результат слід віднести до наукової новизни. Суть низькочастотного розширення роботи полягає у переносі вимірювання активної потужності на більш високі частоти; оскільки на цих частотах перетворювач працює без регулятора напруги, це розширює частотний діапазон вхідних сигналів перетворювача і знімає обмеження на постійний струм.

Крім того, в результаті виконання роботи вдосконалено метод розв'язання задачі підвищення ефективності RC-кола для вимірювального магніторезистивного перетворювача активної потужності в залежності від відносної частоти інвертування, коли відсутній фазовий зсув між магнітним полем і намагніченістю. Синфазність між гармоніками напруги і струму, яка

досягається при великих реактивностях RC -кола, дає максимально великий коефіцієнт перетворення у всьому діапазоні частот.

Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Розроблені моделі, методи і способи, що описують вимірювальний перетворювач можуть бути використані в процесі проектування і розробки пристроїв вимірювання активної потужності в НВП і КБ. І вони знайшли певне втілення, як буде показано далі.

Практичне значення роботи. Розроблений магніторезистивний перетворювач може бути застосованим в галузях, де використовується електромагнітна енергія в технологічних процесах для більш точного контролю за енергетичними параметрами прохідної потужності, зокрема:

- 1) в радіотехнічній промисловості при налагодженні радіостанцій, ретрансляторів;
- 2) в медичній електроніці, при вимірюванні «на місці» недорогим і надійним вимірювальним перетворювачем середньовипроміненої активної потужності аплікатора, прохідної потужності різних рівнів і розсіяної потужності в тканині при діатермії;
- 3) результати, що стосуються розробки вузлів і режимів роботи перетворювача, використані у курсі «Комп'ютерне проектування електронних апаратів» при підготовці спеціалістів за спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в Київському політехнічному інституті ім. Ігоря Сікорського.

В роботі наведено акти впровадження результатів роботи в ТОВ «ІЗ «Квазар-Мікро Радіо», НВП «ТОВ «Квант-Ефір», і ВАТ «НВП «Сатурн». Між Київським політехнічним інститутом ім. Ігоря Сікорського та ВНДП «Елісат» ВАТ «НВП «Сатурн» було укладено договір про науково-технічну співпрацю, де автор є відповідальним виконавцем.

Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах. Матеріали досліджень, які відображають зміст дисертації містяться у 21 науковій праці, 12 з яких опубліковано у фахових виданнях затверджених ДАК, 8 – в матеріалах доповідей наукових та науково-технічних конференцій різного рівня. Основні публікації наведено в кінці автореферату. Загальний обсяг публікацій становить 3,2 авторських аркушів.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні отримані результати. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні.

Структура дисертації досить логічна. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел. Дисертація має обсяг 152 сторінок основного тексту, включаючи 54 ілюстрацію, 11 таблиць та список використаної літератури зі 116 найменувань вітчизняних та зарубіжних джерел на 11 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету роботи та визначено основні завдання дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення. Описано об'єкт, предмет і методи

дослідження, відзначені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів із зазначенням особистого внеску автора. Сформульовано основні положення, які виносяться на захист, подана інформація про публікації, наведено дані про апробацію та впровадження результатів роботи.

У першому розділі наведено класифікацію засобів вимірювання активної потужності на низьких і середніх частотах в режимі «in situ», вказані недоліки кожного засобу. Проводиться огляд існуючих гальваномагнітних ефектів і особливостей реалізації пристроїв на їх основі, сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі розглянуто вплив параметрів тонкоплівкових магнітних структур на характеристики магніторезистивних пристроїв. Представлено математичну модель магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот, яка враховує частотні і фазові похибки, пов'язані з рухом вектора намагніченості в феромагнетику. Основою математичної моделі вимірювального перетворювача є тензор магніторезистивної сприйнятливості феромагнітної плівки, намагніченою до насичення в довільному напрямку.

Реалізована в середовищі MATLAB математична модель вимірювального перетворювача, що включає в себе елемент, який збуджується струмом в провіднику в лінії передачі, дозволяє моделювати його в широкій смузі частот. Досліджено залежність оптимальних параметрів закладених в магніторезистивний вимірювальний перетворювач енергії електромагнітного поля від параметрів феромагнітних плівок.

У третьому розділі описуються схемотехнічна реалізація інваріантної перетворювача, результати його моделювання.

Знайдено розподіл і напрямок струму і тангенціального електричного поля (E-поля) при аналізі електромагнітної структури чутливого елемента вимірювального перетворювача. Отримано вираз для вхідного опору вимірювального перетворювача активної потужності, необхідний для розрахунку струму в плівці.

Розглядається низькочастотне розширення роботи вимірювального перетворювача і підвищення його ефективності. Запропонований режим роботи вимірювального перетворювача активної потужності дозволив: зняти обмеження на частоту вимірювального, низькочастотного сигналу, включаючи постійний струм; перенести вимірювання активної потужності на значно вищу тактову частоту; захистити магніторезистивний перетворювач від впливу зовнішніх магнітних полів. Показано, що вхідні сигнали, що подаються на магніторезистивний перетворювач мають тільки дві бічні без центральної несучої частоти для кожної гармоніки, тобто перетворювач працює як балансний змішувач.

Проведена параметрична оптимізація балансного регулятора напруги для магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності.

Використовуючи тензор магніторезистивної сприйнятливості з урахуванням зсуву фаз між намагніченістю і магнітним полем досліджена реакція перетворювача на комплексне навантаження.

У *четвертому розділі* описується дослідний стенд, наводяться результати експериментального дослідження вимірювального перетворювача. Наводиться методика визначення похибок вимірювального перетворювача, порівнюються теоретична і експериментальна його частотні характеристики. Аналізуються розроблені засоби керування магніторезистивним перетворювачем.

Формалізовано загальний вираз для коефіцієнта перетворення вимірювального перетворювача в області низьких частот при високих полях підмагнічування.

Показано, що для реального вимірювального перетворювача активної потужності електрорушійна сила, крім корисного сигналу, буде визначатися і паразитними електрорушійними силами квадратичних складових магнітного і електричного полів, термоелектрорушійною силою самого перетворювача. Для виявлення термоелектрорушійної сили вимірювального перетворювача активної потужності потрібно змінювати положення постійного магніту, для виявлення похибки по напрузі перемикачем потрібно змінювати фазу змінного струму в лінії передачі на 180° , для виявлення похибки за струмом потрібно змінювати вхідну напругу.

У *висновках* сформульовано основні наукові результати.

Автореферат дисертації адекватно відображає суть основних наукових положень, практичну значущість та висновки.

Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні.

Зауваження до роботи.

1. У п. 4.1. с. 120 зазначено можливість визначати активну потужність в лінії передачі, де реактивна потужність в тридцять п'ять разів вища за активну потужність. Це твердження не є достатньо доведеним, тому що ні в теоретичній частині роботи (розділи 1, 2, 3), ні в розділі 4 роботи «Експериментальне дослідження ...» немає кількісних підтверджень цього твердження.

2. При аналізі в розділі 3.4 зустрічаються вислови, які складно інтерпретувати, наприклад, «...на більш високій гармоніці можуть бути більше спотворення, ніж внесок амплітуди» (с.109).

3. На с. 147 розділу 4 зазначено, що спроектований вузол ВЧ дозволяє значно покращити МГХ вузла. З матеріалів досліджень не ясно, на скільки кращі ці показники, бо цифри відсутні.

4. В цьому ж розділі даються посилання на опубліковані в співавторстві праці (109а–116а), яких немає в переліку літератури, а існують роботи [109–116].

5. Автор стверджує (с. 15), що вимірювання потужності гальваномагнітними перетворювачами вперше були запропоновані і досліджені на РГФ КПІ ім. Ігоря Сікорського Вунтесмері В.С., Гурою К.Н. та Івкіним П.В. Насправді про цей підхід було відомо значно раніше, наприклад, з розділу 4 книги: Бокринская А.А., Скорик Е.Т. Методы измерения мощности в диапазоне сверхвысоких частот, Под ред. В.В. Огиевского. — Киев: Издательство технической литературы УССР, 1962. — 172 с.

6. В дисертаційній роботі відсутні порівняння створеного пристрою з створеними раніше, зокрема з серійними ватметрами. Наведення таких порівнянь було би дуже доречним і могло би підтвердити високий рівень розробки автора.

Незважаючи на висловлені зауваження, в цілому дисертація справляє позитивне враження завдяки ґрунтовності теоретичних досліджень та суттєвому практичному значенню і використанню її результатів.

Загальні висновки.

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертаційна робота Витяганця Андрія Івановича на тему «Магніторезистивний перетворювач активної потужності в радіотехнічних системах» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові, науково обґрунтовані та практично важливі результати, що у сукупності вирішують науково-технічну задачу обґрунтування та розробки перетворювача середніх частот на основі аномального ефекту Холла і анізотропії магнітоопору в тонких феромагнітних плівках для визначення та контролю за активною потужністю в лінії передачі. Отримані результати дають підстави стверджувати, що автором створені моделі, методи, засоби, що реалізують та описують роботу вимірювального перетворювача на основі аномального ефекту Холла і анізотропії магнітоопору в НЧ діапазоні частот завдяки частотному транспонуванню вимірювання активної потужності магніторезистивними (плівковими) перетворювачами в нижній діапазон частот, що, як наслідок, забезпечило частотну інваріантність низькочастотного сигналу в широкому діапазоні частот, включаючи постійний струм та електромагнітну сумісність магніторезистивного перетворювача в умовах зовнішніх магнітних полів при зменшенні його масогабаритних характеристик.

Основні результати дисертації відповідають паспорту наукової спеціальності 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи.

Дисертаційна робота за своїм змістом відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо кандидатських дисертацій, а її автор – Витяганець Андрій Іванович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи.

ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:

Завідувач кафедри електроніки

Національного авіаційного університету

Міністерства освіти і науки України

Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки

IEEE Fellow

д.т.н., професор

 Яновський Ф. Й.

 Відчу
Вчений секретар
Національного авіаційного університету
