

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

ВИТЯГАНЕЦЬ АНДРІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 621.372

**МАГНІТОРЕЗИСТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ АКТИВНОЇ
ПОТУЖНОСТІ В РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

КИЇВ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі «Радіоконструювання та виробництва радіоапаратури».

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Зіньковський Юрій Францевич
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", професор кафедри радіоконструювання і виробництва радіоапаратури

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яновський Фелікс Йосипович
Національний авіаційний університет, завідувач кафедри електроніки

доктор технічних наук, професор
Манойлов В'ячеслав Пилипович
Житомирський державний технологічний університет, професор кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій

Захист відбудеться «04» жовтня 2018р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.08 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03680, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий «29» серпня 2018р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.062.08 д.т.н., проф.



В. М. Шутко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Вимірювання потужності, яка є основною енергетичною характеристикою пристроїв та систем, займає важливе місце в сучасних електронних системах. Одним з параметрів радіотехнічних та телевізійних систем, комплексів, пристроїв та вузлів є їх активна потужність, яка характеризує інтенсивність електромагнітних процесів. Для керування потужністю систем використовують різні нелінійні елементи і пристрої, які спотворюють та розширюють спектр вихідного сигналу, що погіршує показники систем, процесів та визначає необхідність контролю активної потужності в реальному часі.

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

Питання дослідження активної потужності розглянуто в роботах А. Я. Безиковича, Є. З. Шапіро, Г. І. Котенка, В. Ю. Ларіна, І. М. Вікуліна, А. Кобуса, Я. Тушинського, Л. С. Бермана, О. С. Андрєєва, А. П. Бабака, А. Е. Грумана, П. Г. Лілейка. Аналіз відомих робіт показав, що на даний час у електродинамічних і феродинамічних вимірювачів потужності є значна похибка через нелінійність, гістерезис, велике власне споживання енергії, велика чутливість до зовнішніх магнітних полів, наявність частотної і кутової похибок, невеликий обертальний момент. Цифрові вимірювачі потужності характеризуються низькою швидкістю, дороговизною і необхідністю при вимірюванні активної потужності розривати лінію передачі. Недоліками ватметрів на основі перетворювачів Холла є значна похибка через термоелектрорушійну силу, наявність випрямляючих контактів в напівпровідниках, низька 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., 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 частотах та широкому динамічному діапазоні.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є частотне транспонування вимірювання активної потужності магніторезистивними (плівковими) перетворювачами в нижній діапазон частот.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи пов'язана з програмою наукових досліджень кафедри

радіоконструювання та виробництва радіоапаратури КПІ ім. Ігоря Сікорського, в рамках 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) і продовжує дослідження в цій галузі, які були виконані на кафедрі та радіотехнічному факультеті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Вунтесмері В. С., Гурою К. М. та Івкіним П. В.

Через співпрацю кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури КПІ ім. Ігоря Сікорського з ТОВ «ПЗ «Квазар-Мікро Радіо», НВП «ТОВ «Квант-Ефір», ВАТ «НВП «Сатурн» було отримано акти впровадження результатів представленої кандидатської дисертаційної роботи

Між Київським політехнічним інститутом ім. Ігоря Сікорського та ВНДП «Елісат» ВАТ «НВП «Сатурн» був укладений договір про науково-технічну співпрацю, де автор є відповідальним виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення магніторезистивних тонкоплівкових перетворювачів активної потужності з розширенням діапазону частот вимірювального сигналу в область НЧ, включаючи постійний струм.

Для досягнення цієї мети в дисертації вирішуються такі основні завдання:

1. Аналіз принципів вимірювання активної потужності магніторезистивними перетворювачами.
2. Розробка математичної моделі вимірювального тонкоплівкового магніторезистивного перетворювача активної потужності, яка враховує фазовий зсув між довільно прикладеним однорідним зовнішнім магнітним полем і намагніченістю плівки.
3. Розробка способу низькочастотного розширення діапазону роботи вимірювального магніторезистивного перетворювача.
4. Теоретичні дослідження вимірювального магніторезистивного перетворювача з розширеним частотним діапазоном.
5. Дослідження впливу похибок квадратичних складових електромагнітного поля і термоелектрорушійної сили на чутливий елемент вимірювального магніторезистивного перетворювача активної потужності.
6. Розробка конструкції перетворювача, створення експериментального стенду та експериментальне дослідження вимірювального магніторезистивного перетворювача.

Об'єктом дослідження є процес визначення активної потужності вимірювальним перетворювачем з модульованим режимом роботи на основі гальваномагнітних ефектів у тонких феромагнітних плівках з розширеним НЧ діапазоном його роботи.

Предметом дослідження є моделі, методи, засоби, що реалізують та описують роботу вимірювального перетворювача на основі аномального ефекту Холла і анізотропії магнітоопору в НЧ діапазоні частот.

Методи дослідження базуються на апараті математичної фізики, чисельному моделюванні структури чутливого елемента перетворювача, теорії нелінійних кіл при розв'язанні нелінійного рівняння Ландау-Ліфшиця, системи диференціальних рівнянь Максвелла.

При розв'язанні поставлених завдань застосовувались: методи наближених обчислень, чисельні методи аналізу, тригонометричні ряди Фур'є, векторний та тензорний аналізи, теорія диференціальних та інтегральних рівнянь, елементи теорії ймовірності та математична статистика при обробці експериментальних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. В роботі отримано такі наукові результати:

1. Уперше розроблена математична модель, яка описує фізичні процеси в магніторезистивному тонкоплівковому перетворювачі активної потужності в лінії передачі, що відрізняється тим що враховує фазовий зсув між довільно прикладеним зовнішнім магнітним полем і намагніченістю плівки, що дозволило дослідити гальваноманітні ефекти в широкій смузі частот.
2. Уперше визначений спосіб інвертування досліджуваних сигналів, який відрізняється тим що варіюється величина вектора постійного магнітного поля, завдяки чого усуваються паразитні електрорушійні сили квадратичних складових магнітного і електричного полів, термоелектрорушійна сила вимірювального перетворювача активної потужності.
3. Уперше на основі комп'ютерного моделювання тривимірної електромагнітної структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача активної потужності визначено розподіл та напрямок струму і тангенціального електричного поля, що дозволило знівелювати паразитні складові струму та отримати аналітичний вираз для його вхідного опору.
4. Уперше розроблено модульований режим роботи перетворювача активної потужності, який відрізняється тим що інвертується напруга і струм у навантаженні незалежно від їх полярності, що забезпечило частотну інваріантність сигналу, що вимірюється, в широкому діапазоні частот, включаючи постійний струм.

Практична цінність отриманих результатів. Отримані моделі, методи і способи, що описують вимірювальний перетворювач можуть бути використані в процесі проектування і розробки пристроїв вимірювання активної потужності в НВП і КБ. Розроблений магніторезистивний перетворювач здатний бути застосованим в галузях, де використовується електромагнітна енергія в технологічних процесах для більш точного контролю за енергетичними параметрами прохідної потужності:

1. Для радіотехнічної промисловості при налагодженні радіостанцій, ретрансляторів.
2. Для медицини, при вимірюванні «на місці» недорогим і надійним вимірювальним перетворювачем активної потужності середньовипроміненої аплікатора прохідної потужності різних рівнів і розсіяної 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.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення дисертації аспірантом розроблено разом з науковим керівником. Автором самостійно сформульовано мету і задачі досліджень, висновки та рекомендації; виконано постановку розрахункових та лабораторних експериментів, аналіз даних експериментальних досліджень; проведено досліду перевірку результатів дисертаційної роботи. Особистий внесок автора в працях, опублікованих у співавторстві наступний: [1] – систематизація та створення класифікації засобів вимірювання активної потужності, розгляд основних переваг та недоліків кожного засобу; [2] – результат експерименту і методика усунення похибок перетворювача при вимірюванні активної потужності в лінії передачі; [3] – математична модель розширення діапазону роботи перетворювача, результати моделювання інверторів струму і напруги; [4] – систематизація існуючих магніторезистивних ефектів та розгляд пристроїв на їх основі; [5] – результати оптимізації регулятора напруги для магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності; [6] – математичний апарат опису сигналів керування, участь у створенні дослідницького стенду; [8] – інтерпретація моделі для конкретного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот; розроблена модель вимірювального перетворювача в діапазоні середніх частот, в яку увійшли врахування фазових похибок; реалізовано фізичну модель перетворювача в MATLAB, яка дозволяє моделювати у широкій смузі частот; [9] – систематизація та створення класифікації платформ обчислювальних систем, розгляд основних переваг та недоліків кожної системи; [11] – виконання теоретичної частини роботи, участь при проведенні експериментів; [12] – виконання теоретичної частини роботи, участь при проведенні експериментів; [16] – виконання теоретичної частини роботи, участь при проведенні експериментів; [17] – участь у розробці методики проведення досліджень та їх технічна реалізація; [18] – запропоновано методику розрахунку сигналів керування магніторезистивним перетворювачем; [21] – участь у розробці методики проведення досліджень та їх технічна реалізація.

Апробація. Основні положення роботи доповідались і обговорювались на 11 наукових та науково-технічних конференціях, форумах різного рівня: 1, 2 та 3-й конференціях студентів, аспірантів, молодих вчених та спеціалістів «Радіоелектроніка у ХХІ столітті» (29–30 березня 2007р., 03–04 квітня 2008р., 02–03 квітня 2009р., НТУУ «КПІ», м. Київ), 11-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у ХХІ столітті» (10–12 квітня 2007р., Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків), 3, 4 та 5-й Міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2007, РТ-2008, РТ-2009» (16–21 квітня 2007р., 21–25 квітня 2008р., 20–25 квітня 2009р., Севастопольський національний технічний університет, м. Севастополь), науково-технічній конференції «Електроніка-2008» (08–09 квітня 2008р., НТУУ «КПІ», м. Київ), 18th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology «CriMiCo'2008» (September 08–12, 2008, Sevastopol National Technical University, Sevastopol), Xth International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science

«TCSET'2010» (February 23–27, 2010, Lviv Polytechnic National University, Lviv), Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні електротехнічні та енергетичні системи MEES-2017» (15-17 листопада 2017р., Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук). За результатами роботи отримано одну наукову премію, нагороджено шістьма дипломами.

Публікації. Матеріали досліджень, які відображають зміст дисертації містяться у 21 наукових працях, 12 з яких опубліковано у провідних фахових виданнях затверджених ВАК України, 8 – в матеріалах доповідей наукових та науково-технічних конференцій різного рівня. Основні публікації наведено в кінці автореферату. Загальний обсяг публікацій становить 3,2 авторського аркуша.

Структура та обсяг дисертації. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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 в фахових виданнях ВАК України, наведено дані про апробацію та впровадження результатів роботи.

Перший розділ містить аналіз принципів вимірювання активної потужності гальваномагнітними перетворювачами. Розглянуто рішення інших авторів на проблему вимірювання активної потужності перетворювачами на основі магніторезистивного і ефекту Холла.

Пристрої на основі гальваномагнітних ефектів (магніторезистивного і ефекту Холла) у тонких магнітних плівках, параметричне перемноження сигналів в яких відбувається під дією цих ефектів пропорційні магнітному полю, яке створюється змінним у часі струмом $h(i(t))$ і напрузі, яка створюється змінним у часі електричним полем $U(E(t))$ вхідні сигнали в лінії передачі, відносяться до класу гальваномагнітних вимірювальних перетворювачів активної потужності.

$$U_0 = k_p U(E(t))h(i(t))\cos \varphi, \quad (1)$$

де k_p – коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача.

Оскільки у намагніченій до насичення феромагнітній плівці перемагнічування відбувається в площині плівки, тобто випинання вектору намагніченості за площину плівки відсутнє, тому вплив аномального ефекту Холла на плівку не розглядатимемо.

Описано механізм фізичних процесів, які відбуваються при перетворенні енергії електромагнітного поля у ізотропній тонкій магнітній плівці з питомим об'ємним опором ρ і товщиною δ (кілька сотень ангстрем), що розташована в прямокутній лівій системі координат $X_1O X_2$, намагніченій до насичення \vec{M}_0 і розміщеній в магнітному полі з індукцією \vec{B} .

Якщо однорідний струм зі щільністю \vec{J} тече в напрямку $O X_1$, то, як відомо, результуюче електричне поле, створене у об'ємі плівки має вигляд:

$$\vec{E} = \rho_{\perp} \vec{J} + \rho(\alpha \times \vec{J}) + \Delta\rho\alpha(\alpha \times \vec{J}), \quad (2)$$

де ρ_{\perp} – зміна питомого опору плівки в напрямку, перпендикулярному намагніченості; $\alpha = \vec{B}/|\vec{B}|$ – одиничний вектор; $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ – коефіцієнт анізотропії магнітоопору.

Вихідна напруга, між контактами A і B магнітної плівки:

$$\vec{U}_0 = \int_A^B \vec{E} d\vec{X}_1 \cong \vec{E} \vec{x}_1 b, \quad (3)$$

де \vec{x}_1 – орт у напрямку осі $O X_1$; b – ширина плівки.

На основі перетворювачів Холла створені ватметри з похибкою 0,2 – 0,5 % у частотному діапазоні від постійного струму до кількох гігагерц. Основні переваги перетворювачів Холла це створення на їхній основі ватметрів з малим споживанням, простота зміни діапазонів вимірювання, використання при великих струмах, відхиленні від синусоїдальної форми вхідних сигналів і малих коефіцієнтах потужності $\cos \varphi_{UI}$. Значна похибка через термоелектрорушійну силу, випрямляючі контакти в напівпровідниках, невелика чутливість ефекту, складна технологія виготовлення, великий розкид параметрів, залежність опору і коефіцієнта Холла від температури та магнітного поля, наявність залишкової напруги, низька величина коефіцієнта корисної дії зводять нанівець переваги ватметрів на основі напівпровідникових перетворювачів Холла.

Для низької частоти вихідний сигнал постійного струму U_0 з магніторезистивного перетворювача активної потужності на основі тонких феромагнітних плівок пов'язаний з комплексними амплітудами вхідних змінних сигналів V і h та з активною потужністю в лінії передачі як:

$$U_0 = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{H_0} \operatorname{Re}(Vh^*) = \operatorname{Re}(k_U k_I^* UI^*) = k_P UI \cos \varphi_{UI}, \quad \text{якщо } k_U k_I^* \in \operatorname{Re}, \quad (4)$$

де $\Delta\rho/\rho$ – анізотропія магнітоопору матеріалу магніторезистору; H_0 – інтенсивність намагнічування зовнішнього магнітного поля зміщення; k_U – комплексний коефіцієнт пропорційності між напругою в лінії передачі U і вхідною напругою на перетворювачі V ; k_I – комплексний коефіцієнт пропорційності між струмом в лінії передачі I і магнітним полем h провідника зі струмом.

Щоб вимірювати активну потужність в широкому діапазоні частот і з високою точністю потрібно використовувати сигнал в лінії передачі без додаткового перетворення, що забезпечується вимірювальним магніторезистивним перетворювачем на феромагнітних плівках. Подібні перетворювачі

характеризуються високою чутливістю та швидкодією, роботою при спотворених сигналах, простотою технології виготовлення. Розроблені та досліджені вимірювальні магніторезистивні перетворювачі активної потужності на феромагнітних плівках, на відміну від напівпровідникових перетворювачів Холла і магніторезисторів, мають на два порядки вищу чутливість, на три порядки меншу термоелектрорушійну силу, що надає їм перевагу по співвідношенню сигнал/завада на п'ять порядків.

У другому розділі розглянуто вплив параметрів тонкоплівкових магнітних структур на характеристики магніторезистивних пристроїв. Описана математична модель магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот, яка враховує частотні та фазові похибки, пов'язані з рухом вектору намагніченості у феромагнетику.

Математична модель перетворювача складається з систем рівнянь: перше – це співвідношення, яке описує зміну тензора питомого опору в залежності від намагніченості під довільним кутом до площини плівки; друге – зміну вектору намагніченості під дією змінного магнітного поля; третє – зміну опору при дії змінного магнітного поля в присутності постійного магнітного поля зміщення.

Напрямок руху вектора намагніченості у феромагнетику під дією зовнішньої сили описується нелінійним рівнянням Ландау-Ліфшица:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\mu_0 \gamma [\vec{M} \times \vec{H}^{ef}] + \frac{\alpha}{|\vec{M}|} \left[\vec{M} \times \frac{d\vec{H}^{ef}}{dt} \right], \quad (5)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна постійна; $\alpha = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ – постійна загасання, що залежить від ширини лінії феромагнітного резонансу плівки, безрозмірна; $\gamma = q/m_e = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг – модуль гіромагнітного відношення електрона; \vec{H}^{ef} – напруженість ефективного магнітного поля, прикладеного вздовж вектора намагніченості \vec{M} , 1/А.

Рівняння (5) вирішується для змінних і постійних складових магнітного поля і намагніченості:

$$\vec{M} = \vec{M}_0 + \vec{m} e^{j\omega t + \varphi_M}, \quad \vec{H}^{ef} = \vec{H}_0^{ef} + \vec{h}^{ef} e^{j\omega t + \varphi_H}, \quad (6)$$

де \vec{H}_0^{ef} , \vec{M}_0 – відповідно напруженість постійних ефективного магнітного поля і намагніченості; ψ – зсув фаз між напруженістю збуджуючого змінних магнітного поля \vec{h}^{ef} і намагніченістю \vec{m} феромагнітної плівки.

Рівноважне положення намагніченості відповідає умові рівності нулю обертаючого моменту (5) для постійної складової ефективного магнітного поля:

$$-\mu_0 \gamma [\vec{M}_0 \times \vec{H}_0^{ef}] = 0, \quad (7)$$

$$\vec{H}_0^{ef} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial U}{\partial \vec{M}} = -\frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial U}{\partial M_0} \hat{r} + \frac{1}{M_0} \frac{\partial U}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{M_0 \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \hat{\varphi} \right). \quad (8)$$

де \hat{r} , $\hat{\theta}$, $\hat{\varphi}$ – орти в сферичній системі координат.

Густина вільної магнітної енергії U полікристалічного феромагнетику, яка може виділятися в тепло, включає енергію феромагнетику в зовнішніх постійних і

змінних магнітних полях, магнітостатичну енергію і енергію одноосної магнітної анізотропії для однорідної намагніченості по всій плівці.

Рівняння для визначення рівноважного стану вектора намагніченості в площині плівки:

$$-\frac{2H_0}{M_0} \sin(\varphi_H - \varphi) - (N_1 - N_2) \sin 2\varphi - \frac{2k_1}{\mu_0 M_0^2} \sin 2(\varphi_K - \varphi) = 0, \quad (9)$$

де φ_H – сферичний кут, що визначає напрям вектору зовнішнього постійного магнітного поля; φ – сферичний кут, що визначає напрям вектора намагніченості M_0 ; N_1, N_2 – розмагнічуючі фактори форми магнітної плівки; k_1 – константа одноосної магнітної анізотропії для кубічної гранецентричної кристалічної ґратки феромагнетика; φ_K – сферичний кут, що визначає двонаправлену легку вісь плівки.

Тензор магніторезистивної сприйнятливості, який пов'язує питомий опір плівки з постійним і змінним зовнішніми магнітними полями:

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{ip1} &= \left[-j \frac{\omega}{\omega_m} R_1 M_0 L_{ip} - \left(T_{11} + j\alpha \frac{\omega}{\omega_m} \right) \Delta \rho C_{ip} \right] \sin \varphi_0 \\ \kappa_{ip2} &= \left[j \frac{\omega}{\omega_m} R_1 M_0 L_{ip} + \left(T_{11} + j\alpha \frac{\omega}{\omega_m} \right) \Delta \rho C_{ip} \right] \cos \varphi_0 \\ \kappa_{ip3} &= j \frac{\omega}{\omega_m} \Delta \rho C_{ip} - \left(T_{22} + j\alpha \frac{\omega}{\omega_m} \right) R_1 M_0 L_{ip} \end{aligned} \right\} \times$$

$$\times \frac{\omega}{M_0 \omega_m (T_{11} + T_{22})} \frac{1}{\alpha} \frac{1}{(1 + \zeta^2)^{1/2}} \left[1 + \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \exp(j\psi) \exp\left[j \left(\arctg \zeta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (10)$$

де $\omega_k = \mu_0 \mathcal{H}_k$; $[C_{ip}] = \begin{bmatrix} -\sin 2\varphi_0 & \cos 2\varphi_0 \\ \cos 2\varphi_0 & \sin 2\varphi_0 \end{bmatrix}$; $[L_{ip}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$;

$$T_{11} = \frac{\omega_0}{\omega_m} \cos(\varphi_H - \varphi_0) + \frac{\omega_K}{\omega_m} \cos^2(\varphi_K - \varphi_0) + 1;$$

$$T_{22} = \frac{\omega_0}{\omega_m} \cos(\varphi_H - \varphi_0) + \frac{\omega_K}{\omega_m} \cos 2(\varphi_K - \varphi_0) - (N_1 - N_2) \cos 2\varphi_0; \quad H_k = 2k_1 / \mu_0 M_0 \quad -$$

фіктивне поле одноосової наведеної магнітної анізотропії; θ_0, φ_0 – кути, які визначають рівноважне положення вектору намагніченості; ζ – узагальнений розлад феромагнітної плівки відносно точки феромагнітного резонансу; ω – частота зовнішнього магнітного поля; R_1 – феромагнітна постійна аномального ефекту Холла.

При побудові математичної моделі параметричного середовища у програмі MATLAB, враховано аномальний ефект Холла і анізотропію магнітоопору феромагнітних плівок в довільно намагніченому до насичення магнітному середовищі з урахуванням загасання α . Результатом аналізу цієї математичної

моделі є тензор магніторезистивної сприйнятливості (6), компоненти якого визначені в явному вигляді для довільно намагніченої феромагнітної плівки.

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

Третій розділ присвячений *схемотехнічній розробці інваріантного магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності.*

При створенні прохідного ватметра, чутливий елемент магніторезистивного перетворювача підключають до електричної мережі і розміщують у магнітному полі провідника зі струмом.

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

При роботі перетворювача в реальному середовищі, крім магнітного поля, створюваного провідником зі струмом, існують зовнішні магнітні поля споживачів струму. Тому, захист перетворювача від впливу зовнішніх магнітних полів є актуальним. Крім того, на низьких частотах при вимірюванні активної потужності магніторезистивним перетворювачем існують обмеження по частоті, виникає потреба у великих номіналах блокувальних та роздільних ємностей, які підвищують масогабаритні характеристики перетворювача.

Для розширення спектру НЧ сигналу по напрузі необхідно подати його через ВЧ ключ, який працює з частотою на порядок вище. Такий режим – комутація або інверсія сигналу незалежно від полярності, дасть змогу зменшити номінали ємностей, підвищить добротність схеми, зробить перетворювач більш компактним. Перемикається (інвертується) увесь час струм у провіднику, а змінюється лише фаза (полярність) на 180° , рис. 1в. В навантаженні струм протікає заданий, а ключ увесь час увімкнений, струм змінюється лише у провіднику, тобто діє тільки на чутливий елемент магніторезистивного перетворювача. Особливість ключа – це відсутність впливу на струм у навантаженні. Таким чином, магніторезистивний перетворювач не впливає на активну потужність в лінії передачі при її вимірюванні в технологічному процесі.

Комутація вхідних сигналів вирішить проблему з НЧ сигналом і постійним струмом, в яких може бути постійна складова, яка спотворює вихідний сигнал з перетворювача. Тому що вимірювання потужності переноситься на більш високу частоту, розширюється спектр і тим самим знімається обмеження на постійний струм.

Для захисту схеми від зовнішнього магнітного поля потрібно комутувати струм, який тече у навантаженні незалежно від напряму (полярності), навіть, якщо струм прямий, тобто потрібна комутація струму, який модулюється обвідною амплітуди синусоїди. Тому, за рахунок модуляції меандром синусоїди, ця комутація

повністю знівелює зовнішній магнітний вплив, так як детектуватиметься ВЧ сигнал, а не НЧ сигнал.

При синусоїдальній напрузі в лінії передачі, інвертований сигнал на електричному вході перетворювача, рис. 1а, дорівнюватиме:

$$V(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} k_V(n\omega_0 \pm \Omega) U \sin(\Omega t + \varphi_U + \varphi_{PH}) \text{sign}[\sin(\omega_0 t + \varphi)], \quad (11)$$

де U – амплітуда напруги в лінії передачі, В; ω_0 , φ – частота і фаза інвертованого високочастотного коливання, рад/с і рад відповідно; Ω , φ_U – частота і фаза низькочастотного коливання, рад/с і рад відповідно; φ_{PH} – зсув фази через регулятор напруги, рад; $k_V(n\omega_0 \pm \Omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі напруги для бокових частот, безрозмірний.

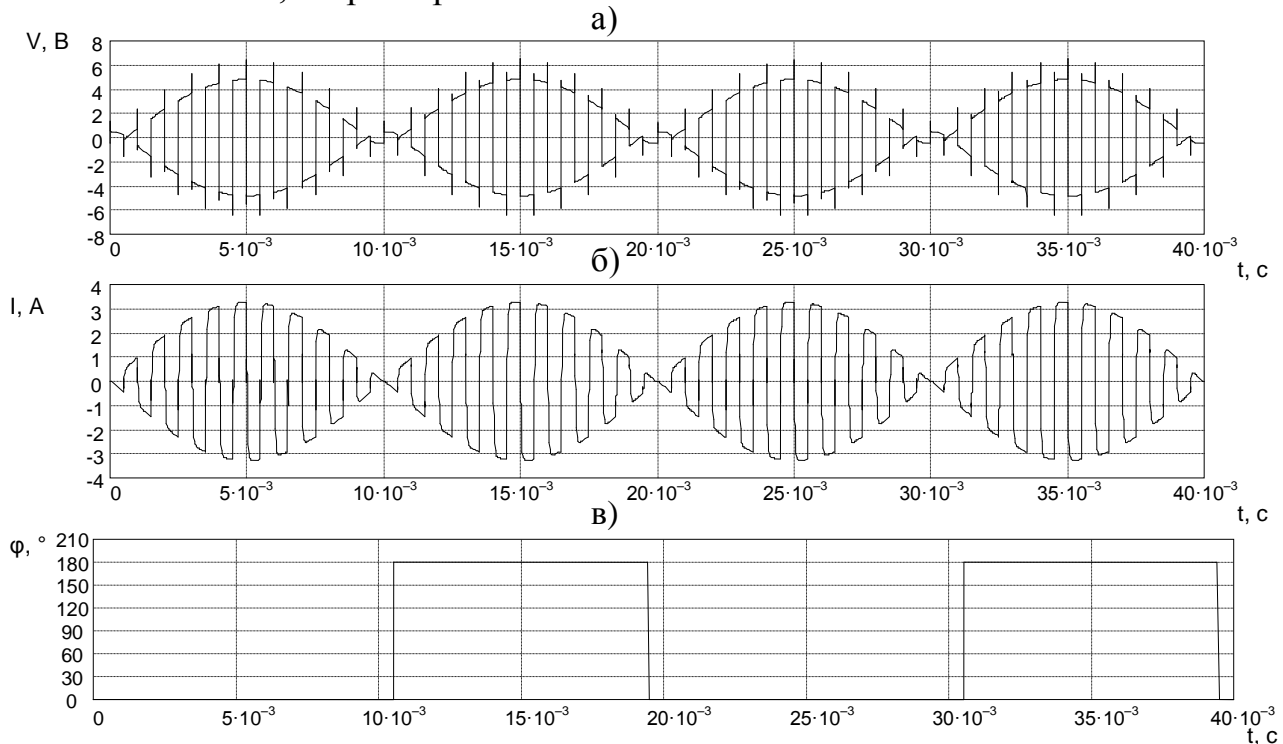


Рис. 1. Осцилограми напруг, струмів і фазова характеристика перетворювача

Інвертований струм на магнітному вході перетворювача, рис. 1б, має вигляд:

$$h(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} k_I(n\omega_0 \pm \Omega) I \sin(\Omega t + \varphi_I + \varphi_{hM}) \text{sign}[\sin(\omega_0 t + \varphi)], \quad (12)$$

де I – амплітуда струму в лінії передачі, А; ω_0 , φ – частота і фаза інвертованого високочастотного коливання, рад/с і рад відповідно; Ω , φ_I – частота і фаза низькочастотного коливання, рад/с і рад відповідно; $k_I(n\omega_0 \pm \Omega)$ – комплексний коефіцієнт передачі по магнітному полю для бокових частот, (А/м)/А; φ_{hM} – зсув фази між магнітним полем і намагніченістю у магнітній плівці, рад.

Вхідні сигнали, які подаються на магніторезистивний перетворювач мають тільки дві бокові $n\omega_0 \pm \Omega$ без центральної несучої частоти $n\omega_0$ для кожної гармоніки, тобто перетворювач працює як балансний змішувач.

Постійну складову отримуємо, інтегруючи за період низькочастотного сигналу добуток

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) h(t) dt. \quad (13)$$

Після підстановки (11) і (12) в (13), враховуючи усереднення, а також те, що

$$\{1 \cdot \text{sign} [\sin(\omega_0 t + \varphi)]\}^2 = 1, \quad (14)$$

отримаємо для постійної складової:

$$U_0 = k_p U I \cos(\varphi_U - \varphi_I), \quad (15)$$

$$k_p = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{H_0} k'_p, \quad (16)$$

$$k'_p = \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} |k_V(n\omega_0)| |k_I(n\omega_0)| \cos(\varphi_{k_V(n\omega_0)} - \varphi_{k_I(n\omega_0)}), \quad (17)$$

де k_p – коефіцієнт перетворення магніторезистивного перетворювача, В/Вт; k'_p – дійсний коефіцієнт перетворення, який є постійною величиною для заданого інвертованого сигналу та регулятора напруги, 1/м.

Вклад в постійну складову дає тільки квадрат кожної спектральної складової гармоніки. Параметри регулятора напруги підібрані таким чином, щоб компенсувати зсув фази між магнітним полем і намагніченістю у феромагнітній плівці, тобто $\varphi_{hM} = -\varphi_{\text{ПН}}$.

Синфазність між гармоніками напруги і струму, яка досягається при великих реактивностях RC -кола, дасть оптимальний (максимально можливий) коефіцієнт перетворення у всьому діапазоні частот:

$$k_{p \max} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{H_0} \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} |k_V| |k_I|, \quad (18)$$

де k_V – коефіцієнт передачі напруги, амплітуда напруги залежить тільки від коефіцієнта передачі RC -кола; k_I – коефіцієнт передачі по магнітному полю, який не залежить від номера гармоніки n і від діаметру проводу, а залежить від силової лінії магнітного поля, де знаходиться перетворювач.

Проведена параметрична оптимізація балансного регулятора напруги для магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності, рис. 2.

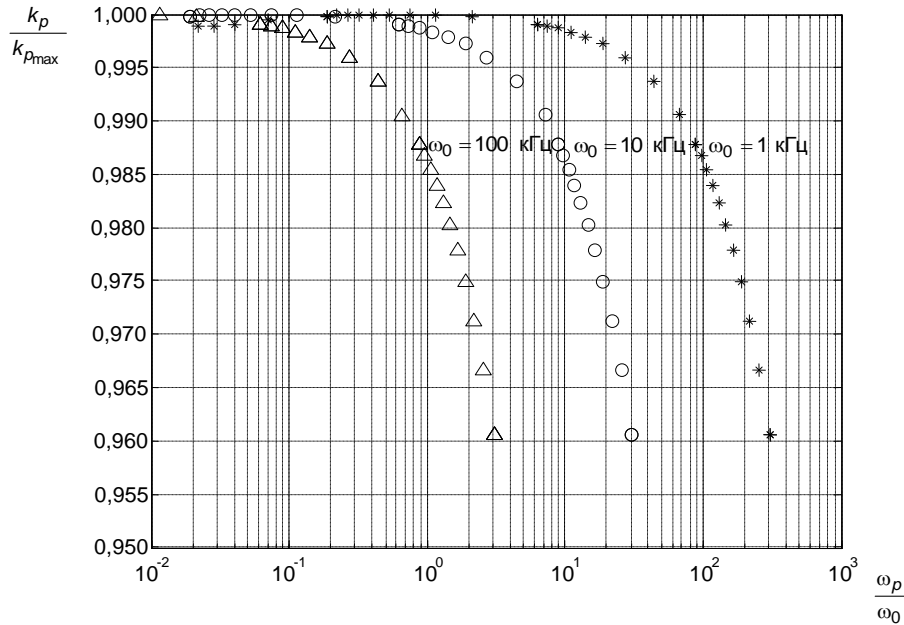


Рис. 2. Залежність чутливості перетворювача від відносної частоти інвертування

Використовуючи тензор магніторезистивної сприйнятливості з урахуванням зсуву фаз між намагніченістю і магнітним полем досліджено реакцію перетворювача на комплексне навантаження, тобто вплив реактивної складової комплексної потужності і чисто реактивного навантаження через похибки на вихідний сигнал перетворювача. Реактивна потужність за рахунок фазового зсуву між намагніченістю і магнітним полем вносить похибку у вимірювання.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності.

Для реального магніторезистивного перетворювача електрорушійна сила, крім корисного сигналу e_0 , визначається і паразитними електрорушійними силами квадратичних складових магнітного поля e_{h^2} і напруги e_{V^2} та термоелектрорушійною силою самого перетворювача $e_{терс}$:

$$e = e_0 + e_{h^2} + e_{V^2} + e_{терс} + e_{nV}, \quad (19)$$

де e_{nV} – електрорушійна сила нановольтметра.

Вихідна напруга з перетворювача дорівнює:

$$U_0 = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{H_0} U I^* \operatorname{Re}(k_p), \quad (20)$$

$$k_p = k_U k_I^*, \quad (21)$$

де k_U , k_I – коефіцієнти перетворення по електричному і магнітному полям.

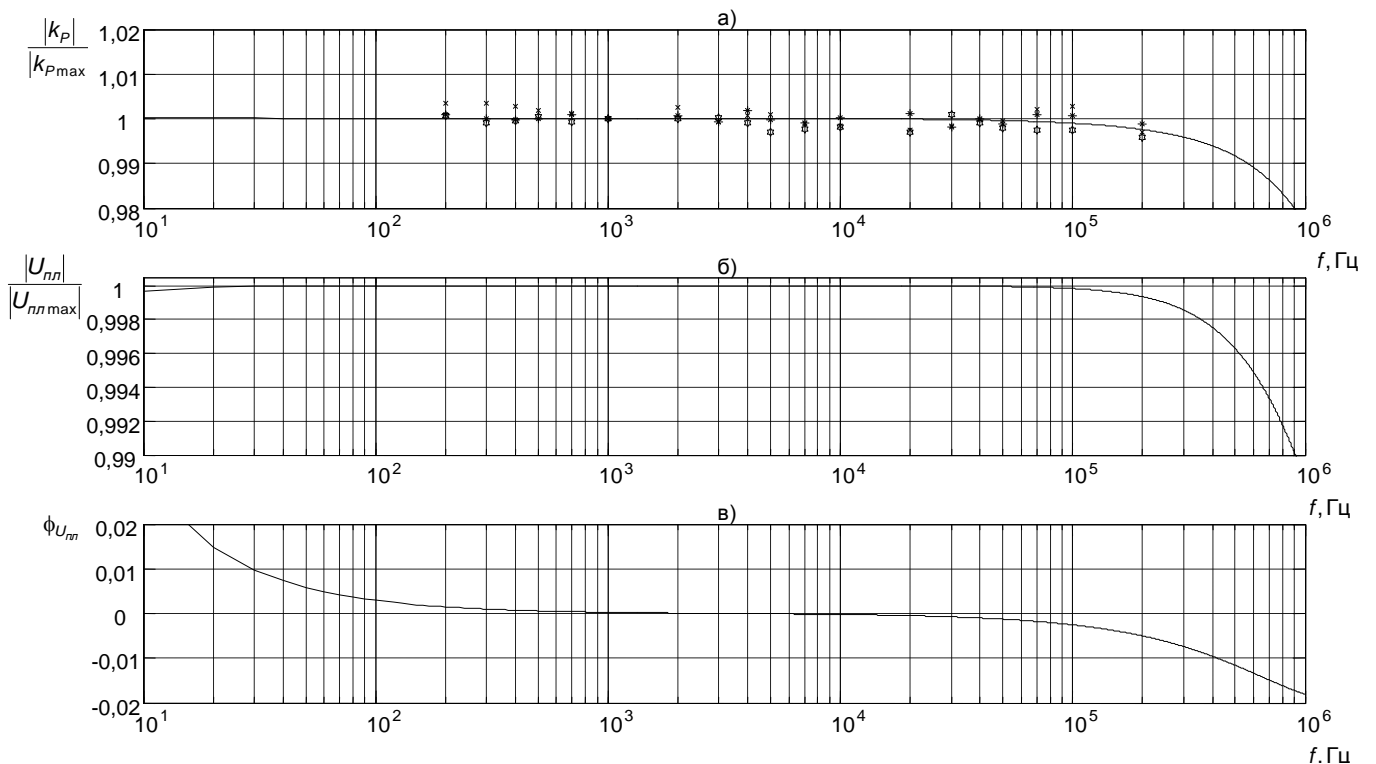


Рис. 3. Залежність характеристик перетворювача від частоти

Враховуючи ці залежності у пакеті MATLAB була побудована пронормована залежність вихідної напруги на плівці від частоти, рис. 3б. Було проведено три експерименти з вимірювання потужності. Результати представлені на рис. 3а. Обчислення коефіцієнтів полінома 2-го степеня, який наближає табличні функції виконувалося у MATLAB методом найменших квадратів.

На рис. 3а показано приведену залежність коефіцієнта пропорційності k_p від частоти при усунених паразитних електрорушійних силах. На рис. 3в показана фазочастотна залежність перетворювача, де $\phi_{U_{nl}} = \arctg[\text{Im}(U_{nl})/\text{Re}(U_{nl})]$ – фаза напруги на плівці. Нижче 1 кГц відбувається відставання по фазі, а вище – випередження по фазі, внаслідок фазочастотної залежності регулятора напруги.

У висновках перераховані найбільш важливі результати і рекомендації.

Перевірка і підтвердження впровадження результатів дослідження розроблених магніторезистивних вимірювальних перетворювачів активної потужності, незалежно від місця підключення, на практиці наведена у додатку.

ВИСНОВКИ

Головний науковий результат роботи – вирішення науково-технічної задачі обґрунтування та розробка 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. При цьому досягнута кінцева мета роботи – розроблені і досліджені вимірювальні перетворювачі активної потужності впроваджені в підприємства та організації.

Найбільш істотні наукові результати і висновки дисертаційної роботи наступні:

1. На основі тензора магніторезистивної сприйнятливості розроблено математичну модель вимірювального магніторезистивного перетворювача активної потужності з врахуванням фазового зсуву між довільно прикладеним магнітним полем і намагніченістю плівки.
2. Отримано співвідношення між активною потужністю і вихідним сигналом вимірювального перетворювача через амплітудно-фазове співвідношення комплексних коефіцієнтів передачі напруги і поля, що дозволяє оптимально узгодити перетворювач з комплексним навантаженням.
3. Проведено електродинамічне моделювання розподілу струму і напруженості тангенціального електричного поля в тривимірній структурі чутливого елемента магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності, що дозволило знівелювати паразитні складові струму.
4. Отримано загальний вираз для комплексного коефіцієнту перетворення вимірювального перетворювача активної потужності в області низьких частот при високих підмагнічуючих полях (порядку 10000 А/м), що дозволило дослідити залежність характеристик перетворювача від частоти і визначити систему робочих параметрів перетворювача.
5. Розроблено способи усунення паразитних електрорушійних сил квадратичних складових магнітного і електричного полів, термоелектрорушійної сили самого вимірювального перетворювача активної потужності шляхом інвертування струму в чутливій частині перетворювача і варіювання вектору постійного магнітного поля.
6. Отримано залежність параметра чутливості вимірювального перетворювача активної потужності від відносної частоти інвертування, що дозволило змістити частоту переходу фазочастотної характеристики значно вище частоти інвертування, зменшивши величини реактивних елементів регулятора інвертованої напруги.
7. Запропоновано та здійснено модульований режим роботи (інвертування напруги і струму у навантаженні, інваріантно від полярності) перетворювача активної потужності, що забезпечило частотну інваріантність низькочастотного сигналу в широкому діапазоні частот, включаючи постійний струм та електромагнітну сумісність магніторезистивного перетворювача в умовах зовнішніх магнітних полів при зменшених його масогабаритних характеристиках.
8. Розроблено і виготовлено конструкцію вимірювального магніторезистивного перетворювача активної потужності, який пройшов стендові випробування і введений у постійну експлуатацію у ВАТ «Сатурн» (м. Київ). Окремі блоки та установка в цілому, алгоритмічне та програмне забезпечення впроваджено при складанні та налагодженні передавальних радіостанцій МуСом у ТОВ „ПЗ” "Квазар-Мікро Радіо" (м. Київ), цифрових DVB-T/H ретрансляторів у НВП ТОВ "Квант-Ефір" (м. Київ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. **Витяганець А. І.**, Вунтесмері В. С. Засоби вимірювання активної потужності на низьких та середніх частотах «in situ» // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2007. Вип. 34. С. 112–118. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
2. Вунтесмері В. С., **Витяганець А. І.** Исследование частотной характеристики магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности низких частот // Известия вузов. Серия «Радиоэлектроника». (НТУУ «КПІ»). 2007. № 12. С. 45–48. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
Існує переклад: Vountesmeri V. S., **Vytyaganets A. I.** Frequency response investigation of magneto resistive low frequency active power measuring transducer // Radioelectronics and Communications Systems. 2007. Vol. 50. P. 680–682.
3. Вунтесмері В. С., **Витяганець А. І.** Низькочастотне розширення діапазону роботи магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2008. № 4. С. 16–19. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
4. Вунтесмері В. С., **Витяганець А. І.** Дослідження наявних магніторезистивних ефектів та особливостей реалізації пристроїв на їх основі // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2008. Вип. 37. С. 97–101. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
5. Вунтесмері В. С., **Витяганець А. І.** Підвищення ефективності магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності // Електроніка та зв'язок (НТУУ «КПІ» та КВІУЗ). 2008. № 6. С. 38–41. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
6. Вунтесмері В. С., Смолянінов В. Г., **Витяганець А. І.** Засоби керування магніторезистивним перетворювачем активної потужності // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2009. Вип. 38. С. 73–78. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
7. **Витяганець А. І.** Інтерфейс магніторезистивного перетворювача активної потужності // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2009. Вип. 39. С. 113–117. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
8. Vountesmeri V., **Vytiaganets A.** A mathematical model of measuring transformer of active power of middle frequencies [Electronic resource] // Modern Problems of

Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010) : article of the report (Lviv, 23–27 Feb. 2010). Lviv, 2010. 1 electron. opt. disk (CD-ROM).

9. Іларіонов О. Є., **Витяганець А. І.** Огляд платформ хмарних обчислень // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій : зб. наукових праць. К. : УН-Т «КРОК», 2013. Вип. 2. С. 95-100.
10. **Витяганець А. І.** Використання тонких магнітних плівок у вимірювальних магніторезистивних перетворювачах активної потужності // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2017. Випуск 3/2017 (104), частина 1. С. 9 – 13. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, Index Copernicus International, InfoBase Index, Polish Scholarly Bibliography, Inspec)
11. Зінковський Ю. Ф., **Витяганець А. І.** Моделювання структури чутливого елемента магніторезистивного перетворювача // Технології і конструювання в радіоапаратурі. 2017 (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
12. Зінковський Ю. Ф., **Витяганець А. І.** Статистична обробка результатів вимірювання активної потужності магніторезистивним перетворювачем // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2017. Випуск 4 (251). С. 239 – 242. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International)
13. Zinkovsky Yu. F., Vytiaganets A. I. Magneto-resistive transformer on thin films // Electronics and Control Systems. 2018. Vol. 2(56). P. 18-23 (входить до наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus International)

Патент України на корисну модель:

14. Вунтесмері В. С., **Витяганець А. І.** Спосіб низькочастотного розширення роботи вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот : пат. 71169 Україна ; заявл. 16.11.11 ; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13.

Тези доповідей:

15. **Витяганець А. І.** Широкополосний магніторезистивний вимірювальний перетворювач активної потужності середніх частот // Радиоелектроника и молодежь в XXI веке : тезиси докл. (Харьков, 10–12 апр. 2007). Х., 2007. С. 334.
16. **Витяганець А. І.** Математична модель магніторезистивного вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»: тезиси докл. (Севастополь, 16–21 апр. 2007). Севастополь, 2007. С. 245.
17. Смолянинов В. Г., **Витяганець А. І.** Магніторезистивний измерительный преобразователь с полупроводниковым управлением // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2008»: тезиси докл. (Севастополь, 21–25 апр. 2008). Севастополь, 2008. С. 305.

18. Vountesmeri V. S., Smolianinov V. G., Vytiaganets A. I. Magneto-resistive measuring transformer of active power // *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo'2008): abstract of the report (Sevastopol, 08–12 Sept. 2008)*. Sevastopol, 2008. P. 688–689.
19. Смолянинов В. Г., Вытяганец А.И. Анализ и расчет сигналов управления магниторезистивным преобразователем активной мощности // *Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2009»: тезисы докл.* (Севастополь, 20–25 апр. 2009). Севастополь, 2009. С. 193.
20. Вытяганец А. И. Дослідження похибок вимірювального перетворювача активної потужності середніх частот // *Радіоелектроніка у ХХІ столітті: тези доповіді* (Київ, 02–03 квітня 2009). Київ, 2009. С. 57–59.
21. Vytiaganets A. I. Investigation of reaction transformer active power to the complex load // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2010): abstract of the report (Lviv, 23–27 Feb. 2010)*. Lviv, 2010. P. 109.
22. Зіньковський Ю. Ф., Вытяганец А. И. Фізико-топологічна модель магніторезистивного перетворювача // *Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні електротехнічні та енергетичні системи MEES-2017» : тези доповіді* (Кременчук, 15-17 листопада 2017). Кременчук, 2017.

АНОТАЦІЯ

Вытяганец А. И. Магніторезистивний перетворювач активної потужності в радіотехнічних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи. – Національний авіаційний університет, Київ, 2018.

Захищається 22 наукові праці.

Головний науковий результат роботи – вирішення актуальної науково-технічної задачі, що пов'язана з обґрунтуванням та розробкою перетворювача середніх частот для визначення та постійного контролю за активною потужністю в лінії передачі в реальному часі на основі аномального ефекту Холла і анізотропії магнітоопору в тонких феромагнітних плівках, які не достатньо досліджені в широкому діапазоні середніх частот для технологічного процесу.

Метою дисертаційної роботи є теоретичне і експериментальне дослідження тонкопліткових перетворювачів активної потужності середніх частот на основі феромагнітних плівок.

Запропонований режим роботи 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.

Розроблені і досліджені вимірювальні перетворювачі активної потужності впроваджені в підприємства та організації.

Ключові слова: магніторезистивні ефекти, ферромагнітна плівка, електромагнітне поле, намагніченість, лінія передачі, регулятор напруги, активна потужність, вимірювання «in situ».

АННОТАЦІЯ

Вытяганец А. И. Магниторезистивный преобразователь активной мощности в радиотехнических системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный авиационный университет, Киев, 2018.

Защищается 22 научные работы.

Главный научный результат работы – решение актуальной научно-технической задачи, которая связана с обоснованием и разработкой преобразователя средних частот для определения и постоянного контроля за активной мощностью в линии передачи в реальном времени на основе аномального эффекта Холла и анизотропии магнитосопротивления в тонких ферромагнитных пленках, которые недостаточно исследованы в широком диапазоне средних частот для технологического процесса.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование тонкопленочных преобразователей активной мощности средних частот на основе ферромагнитных пленок.

В первом разделе приведена классификация средств измерения активной мощности на низких и средних частотах в режиме «in situ», указаны недостатки каждого средства. Проводится обзор существующих гальваномагнитных эффектов и особенностей реализации устройств на их основе.

Во втором разделе рассмотрено влияние параметров тонкопленочных магнитных структур на характеристики магниторезистивных устройств. Представлена математическая модель магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности средних частот, которая учитывает частотные и фазовые погрешности, связанные с движением вектора намагниченности в ферромагнетике. Основой математической модели измерительного преобразователя является тензор магниторезистивной восприимчивости ферромагнитной пленки, намагниченной до насыщения в произвольном направлении.

Реализована в программе MATLAB математическая модель измерительного преобразователя, включающего в себя элемент, который возбуждается током в проводнике в линии передачи, позволяет моделировать его в широкой полосе частот. Исследована зависимость оптимальных параметров заложенных в магниторезистивный измерительный преобразователь энергии электромагнитного поля от параметров ферромагнитных пленок.

В третьем разделе описываются схемотехническая реализация инвариантного преобразователя, результаты его моделирования.

Найдено распределение и направление тока и тангенциального электрического поля (E-поля) при анализе электромагнитной структуры чувствительного элемента измерительного преобразователя. Получено выражение для входного сопротивления

измерительного преобразователя активной мощности, необходимое для расчета тока в пленке.

Рассматривается низкочастотное расширение работы измерительного преобразователя и повышение его эффективности. Предложенный режим работы измерительного преобразователя активной мощности позволил: снять ограничения на частоту измерительного низкочастотного сигнала, включая постоянный ток; перенести измерение активной мощности на значительно более высокую тактовую частоту; защитить магниторезистивный преобразователь от воздействия внешних магнитных полей. Показано, что входные сигналы, подаваемые на магниторезистивный преобразователь имеют только две боковые без центральной несущей частоты для каждой гармоники, т.е. преобразователь работает как балансный смеситель.

Проведена параметрическая оптимизация балансного регулятора напряжения для магниторезистивного измерительного преобразователя активной мощности.

Используя тензор магниторезистивной восприимчивости с учетом сдвига фаз между намагниченностью и магнитным полем исследована реакция преобразователя на комплексную нагрузку.

В четвертом разделе описывается исследовательский стенд, приводятся результаты экспериментального исследования измерительного преобразователя. Приводится методика определения погрешностей измерительного преобразователя, сравниваются теоретическая и экспериментальная его частотные характеристики. Анализируются разработанные средства управления магниторезистивным преобразователем.

Формализовано общее выражение для коэффициента преобразования измерительного преобразователя в области низких частот при высоких полях подмагничивания.

Показано, что для реального измерительного преобразователя активной мощности электродвижущая сила, кроме полезного сигнала, будет определяться и паразитными электродвижущими силами квадратичных составляющих магнитного и электрического полей, термоэлектродвижущей силой самого преобразователя. Для выявления термоэлектродвижущей силы измерительного преобразователя активной мощности требуется изменять положение постоянного магнита, для выявления погрешности по напряжению переключателем нужно изменять фазу переменного тока в линии передачи на 180° , для выявления погрешности по току нужно изменять входное напряжение.

Результаты выполненных в диссертации теоретических исследований, практические рекомендации и выводы использованы в ОАО «Сатурн» и в учебном процессе Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» при изучении курсов лекций «Электронные приборы и микроэлектроника» и «Элементная база электронных аппаратов».

Ключевые слова: магниторезистивные эффекты, ферромагнитная пленка, электромагнитное поле, намагниченность, линия передачи, регулятор напряжения, активная мощность, измерение «in situ».

ABSTRACT

Vytiaganets A. I. Magnetoresistive converter of active power in radio engineering systems. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.12.17 – Radio Engineering and Television Systems – National Aviation University, Kyiv, 2018.

22 scientific papers are protect.

The actual solution of scientific and technical problem that relates to the improve and develop of middle range converter for the determination and continuous monitoring of active power transmission line in real time based on the anomalous Hall effect and magnetoresistance anisotropy in thin ferromagnetic films is the main scientific result of the work.

The purpose of this study is theoretical and experimental study of thin film converters of active power based on middle range ferromagnetic films.

Proposed mode of operation of the converter of active power allowed: to lift restrictions on the frequency of measuring low frequency signal, including constant current, active power transfer measurements at much higher clock speed, to protect the magnetoresistive converter from external magnetic fields.

Developed and investigated converters of active power implemented in a number of organizations.

Key words: magnetoresistive effects, ferromagnetic film, magnetic fields, magnetization, transmission line, voltage regulator, the active power measurement «in situ».

**Підписано до друку 28.08.2018 р. Формат 60x90 1/16.
Папір офсетний. Умовн. др. арк. 0,9
Друк різнограф. Тираж 100 прим. Зам. № 2808/01.**

**ФОП Гузік О.М.
Податковий номер №2705814113
м. Київ, вул. Б. Гаврилишина, 16
Тел.: 338-16-61.**