

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет „Львівська політехніка”

Павлик Любомир Пилипович

УДК 621.317.4

**ВИКОРИСТАННЯ ОБОРОТНОГО
ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ У ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ
МАГНІТНОГО ПОЛЯ ФЕРОЗОНДОВОГО ТИПУ**

05.27.01 – твердотільна електроніка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор **Убізський Сергій Борисович**,
Національний університет „Львівська політехніка”, професор кафедри напівпровідникової електроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук **Корєпанов Валерій Євгенович**, заступник директора Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та НКА України, старший науковий співробітник

доктор технічних наук **Будник Микола Миколайович**, Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, провідний науковий співробітник відділу сенсорних пристроїв, систем та технологій безконтактної діагностики

Захист відбудеться „___” _____ 2015 року о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті „Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Бандери, 12, ауд. 124 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету „Львівська політехніка” за адресою 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розіслано „___” _____ 2015 року.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
Д 35.052.13,
проф.



Заячук Д.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вимірювання слабких магнітних полів невисокої частоти необхідне у багатьох задачах, до яких відносяться геофізичні дослідження, пошук та виявлення об'єктів, навігація, дослідження космосу, біомагнітні дослідження та медична діагностика, неруйнівний контроль, магнітний запис високої густини, тощо. І хоча багато з цих задач можливо вирішити з використанням SQUID магнітометрів з рекордним порогом чутливості на рівні 10^{-12} Тл (рівень шуму 10^{-15} Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$), однак необхідність криогенного охолодження, скалярний характер вимірювання магнітного поля, технічна складність експлуатації та висока вартість цих приладів суттєво обмежують їхнє застосування. Серед усіх інших різновидів сенсорів для прецизійного векторного вимірювання слабого повільно змінного магнітного поля найбільш поширеними завдяки своїй високій чутливості та стабільності є ферозондові перетворювачі магнітного поля. Їх поріг чутливості, який зазвичай складає $\sim 10^{-9}$ Тл, обмежений власними шумами осердя внаслідок ефекту Баркгаузена – стохастичних варіацій змін намагніченості при стрибкоподібному рухові меж магнітних доменів в осерді ферозонда при його перемагнічуванні полем збудження. Однак, для ряду важливих прикладних задач, таких як магнітокардіографія, магнітоенцефалографія та інші, необхідні сенсори із значно нижчим порогом чутливості. Оскільки власні шуми ферозонда виникають внаслідок руху магнітних доменів, то деякими дослідниками досліджувалася можливість побудови різновиду ферозондового перетворювача, який використовує оборотне перемагнічування шляхом повороту вектора намагніченості монодоменизованого осердя, що виключає основне джерело шуму. Також експериментально показано, що при використанні дискового осердя на основі епітаксійної плівки ферогранату ітрію, яке збуджується магнітним полем, що обертається у площині диска, рівень власного шуму ферозонда може бути меншим за 10^{-12} Тл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, а за теоретичними оцінками може бути значно нижчим. Разом із тим, незважаючи на продемонстровані переваги ферозондів з використанням оборотного перемагнічування осердя, відомості про підходи до їх побудови на початку наших досліджень (2005 р.) були вкрай обмежені, а нез'ясованими залишалися низка проблем, пов'язаних з практичним конструюванням та оптимізацією характеристик таких перетворювачів магнітного поля, зокрема з вимогами до матеріалу осердя, режимів його збудження та реєстрації відгуку, умов чутливості до ортогональних компонент магнітного поля, тощо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі напівпровідникової електроніки Національного університету „Львівська політехніка”. Результати отримано в рамках виконання робіт з держбюджетних тем: „Вплив катіонного заміщення на структуру та дефектоутворення в складних оксидних кристалах” (№ д/р 0104U002301), „Роль дефектної підсистеми у формуванні властивостей кристалів складних оксидів” (№ д/р 0107U001108), „Методи керування функціональними властивостями складних оксидних матеріалів та оптимізація перетворювальних пристроїв на їхній основі” (№ д/р 0109U001160) та „Структурні, термічні, магнітні та оптичні властивості

складних оксидів у формі монокристалів та наноструктурних матеріалів” (№ д/р 0111U001228), „Магнітна анізотропія та процеси перемагнічування феродіелектричних активних середовищ для сенсорних пристроїв” (№ д/р 0107U009097), Українсько-грецького проекту двостороннього науково-технічного співробітництва „Перетворювач магнітного поля на основі циркулярного збудження монокристалу ферогранату” (№ д/р 0106U004708), НДР за г/д „Моделювання сигнальних характеристик магнітометра на основі монокристалічних ферогранатових плівок” (№ д/р 0105U004395), „Розробка методів контролю магнітних характеристик феродіелектричних плівок” (№ д/р 0101U004556) і наукового гранту “Noise characteristic investigation of the fluxgate with rotation magnetization reversal of the disc core” (Дослідження шумових характеристик ферозонда на основі перемагнічування дискового осердя обертальним полем), наданого посольством Франції в Україні.

Мета роботи: полягала у встановленні впливу умов забезпечення оборотного перемагнічування магнітом’якого дискового осердя під дією магнітного поля, що обертається або здійснює поворотні коливання у площині осердя, на його нелінійний індукційний відгук та використання цих особливостей при конструюванні перетворювачів магнітного поля ферозондового типу для покращення їхніх характеристик.

Для досягнення поставленої мети розв’язувались такі задачі:

1. Розвиток та узагальнення моделі індукційного відгуку ферозондового перетворювача на основі перемагнічування магнітом’якої плівки полем, вектор якого обертається в її площині, встановлення умов його чутливості одночасно до трьох ортогональних компонент магнітного поля.
2. Встановлення впливу магнітної анізотропії, кристалографічної орієнтації чутливого елемента, а також впливу недосконалості геометрії збудження осердя (невідповідність конфігурації поля збудження ферозонда з перемагнічуванням обертальним полем заданій, відхилення площини обертання поля збудження від площини дискового осердя та відхилення кристалографічної орієнтації монокристалічної магнітної плівки від заданої) на характеристики інформаційного сигналу перетворювача магнітного поля, збуджуваного обертальним полем.
3. Встановлення оптимальних умов для збудження та реєстрації сигналу нелінійного індукційного відгуку ферозондового перетворювача на основі оборотного перемагнічування.
4. Встановити умови використання двохелементного перетворювача зі збудженням чутливих елементів магнітними полями, що обертаються, для покращення умов виділення інформаційних гармонік та для побудови градієнтометра магнітного поля.
5. Встановлення можливості реалізації альтернативних до обертального способів оборотного перемагнічування осердя перетворювача та проведення їх порівняльного дослідження.
6. Проведення експериментальних досліджень та перевірка адекватності побудованих моделей і запропонованих підходів до конструювання та оптимізації ферозондового перетворювача магнітного поля.

Об'єктами дослідження є процеси оборотного перемагнічування в магнітом'яких плівках як активних елементах перетворювачів магнітного поля.

Предметом дослідження є взаємозв'язок між властивостями середовища осердя, умовами його збудження та можливістю виділення інформації про компоненти оточуючого магнітного поля з нелінійного індукційного відгуку осердя, що зазнає оборотного перемагнічування.

Методи дослідження, застосовані у роботі, включають математичне та числове моделювання сигналу індукційного відгуку магнітометра на основі оборотного перемагнічування як ізотропного, так і анізотропного дискового осердя магнітним полем, що обертається або здійснює поворотні коливання, асимптотичні методи розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь для побудови моделі ферозонда, що збуджується від джерела регульованої напруги, числові розрахунки індукції магнітного поля для заданої геометрії струмів для проектування та конструювання намагнічуючих систем, схемотехнічне проектування, моделювання сигналів та графічне програмування у середовищі LabView для побудови та експериментального дослідження лабораторного макету магнітометра з оборотним перемагнічуванням дискового осердя, числові методи спектрального аналізу, апроксимації та інших видів оброблення вимірних сигналів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в дисертації вперше:

1. Для ферозонда зі збудженням магнітним полем, вектор якого обертається у площині дискового осердя, встановлено, що чутливість до компоненти вимірюваного магнітного поля, перпендикулярної до площини обертання поля збудження, а також поява паразитної складової сигналу відгуку, пов'язаної з відхиленням площини обертання поля збудження від площини дискового осердя та відхилення її кристалографічної орієнтації, мають однакову природу і виникають лише за умови, що симетрія осей легкого намагнічування (ОЛН) осердя відповідає симетрії S_n – дзеркально-поворотна вісь n -ного порядку.
2. Показано, що при використанні резонансних властивостей кола збудження ферозонда на основі перемагнічування полем, що обертається в площині осердя, увімкненого за схемою послідовного резонансного контуру, за умови налаштування резонансу на частоту удвічі більшу за частоту збудження, чутливість реєстрації компонент вимірюваного поля за другою гармонікою квадратично залежить від частоти збудження.
3. Показано, що чутливість ферозонда зі збудженням поворотними коливаннями магнітного поля може бути підвищена при реєстрації сукупності усіх парних гармонік сигналу відгуку у поздовжній конфігурації збудження і усіх непарних гармонік в ортогональній конфігурації збудження.
4. Показано, що відхилення осі поворотних коливань магнітного поля збудження від осей симетрії системи ОЛН дискового осердя створює феромодуляційний відгук, реєстрація якого дозволяє встановити симетрію та кількісні характеристики магнітної анізотропії осердя.

Практичне значення отриманих результатів.

Встановлені особливості оборотного перемагнічування магнітом'яких плівок на сигнал відгуку перетворювачів магнітного поля на їх основі складають засади

практичного конструювання ферозондових перетворювачів магнітного поля з підвищеною чутливістю та зниженим рівнем власного шуму.

Результати дослідження впливу сторонніх факторів на відгук ферозондового перетворювача на основі оборотного перемагнічування магнітом'яких плівок обґрунтовують способи його налаштування та калібрування.

Результати дослідження перетворювача на основі перемагнічування магнітом'якої плівки обертальним полем у резонансному режимі можуть бути використані для підвищення чутливості та покращення умов виділення інформативної другої гармоніки на тлі неінформативної першої.

Запропонований спосіб широкосмугової реєстрації сигналу відгуку може бути використаний для підвищення відношення сигнал/шум та підвищення чутливості ферозондового перетворювача.

Встановлені можливі конфігурації двохелементного ферозондового перетворювача дозволяють побудувати 3D магнітometri/градієнтometri для різноманітних практичних задач застосування.

Показана можливість визначення характеристик магнітної анізотропії може бути використана для розроблення неруйнівного методу визначення кількісних характеристик магнітної анізотропії та магнітного моменту магнітом'яких плівок та шаруватих структур з малим магнітним моментом та слабкою анізотропією, який має переваги у порівнянні з відомими методами.

Особистий внесок. Постановка загальних завдань дослідження у дисертації здійснена разом з науковим керівником. Усі наукові результати, винесені на захист, отримані безпосередньо автором або за його вирішальної участі. У роботах [1–3, 6, 9, 10, 11, 16] автором проведено моделювання відгуку ферозонда з перемагнічуванням магнітом'яких плівок кубічного магнетика різної кристалографічної орієнтації обертальним полем та внаслідок впливу порушень геометрії збудження. У роботах [4, 12, 13, 15, 17–20] автором проведено моделювання відгуку ферозондового перетворювача на основі збудження полем, що здійснює поворотні коливання в площині осердя. У роботах [5, 22–25] автором здійснено постановку задачі аналізу перетворювача, що працює в режимі збудження стабілізованою напругою та знайдено залежність чутливості перетворювача від параметрів збудження. У роботах [8, 21, 29, 31] автором було виконано усі експериментальні дослідження, оброблення результатів та здійснено їх інтерпретацію. У роботах [7, 14, 26–28, 30, 32] автором виконано конструювання експериментального макету, проведено експериментальні дослідження та інтерпретацію результатів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації було апробовано на конференціях: Joint European Magnetic Symposia (JEMS'06, JEMS'08, JEMS'10), 2006, 2008, 2010 pp., 6th, 7th та 8th European Magnetic Sensors & Actuators Conference (EMSA'06, EMSA'07, EMSA'08), 2006, 2007, 2008 pp., III International conference "Electronics and applied physics", 2007, International Conference "Functional Materials" (ICFM – 2007, ICFM – 2009, ICFM – 2011), 2007, 2009, 2011 pp., 3-тій міжнародній науково-технічній конференції СЕМСТ-3, 2008 p., IXth, Xth та XIth International Conference (TCSET 2008, TCSET 2010, TCSET 2012) Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science, 2008, 2010, 2012 pp., Міжрегіональному науковому семінарі "Сучасні проблеми електроніки" 2008 p., 14-тій, 15-тій та 16-тій Міжнародній науково-технічній конференції

Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів (ЛЕОТЕСТ – 2009, – 2010, – 2011), 2009, 2010, 2011 pp., OMEE – 2009, OMEE – 2012, 2009, 2012 pp., Fourth International Conference on Sensing Technology, 2010, Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), 2011, 20-th International conference on Soft Magnetic Materials SMM 2011, 2011, “Actual problems of modern physics 2012”, 2012.

Публікації: за результатами роботи опубліковано загалом 32 праці. З них 8 статей у фахових наукових журналах [1–8], дві з яких – у журналах, що індексуються наукометричною базою *Scopus* [4, 7], один патент на винахід [9], 7 статей у матеріалах конференцій [13, 15, 21, 24–26, 32], у т.ч. 3 містяться у наукометричній базі *Scopus* [15, 21, 31], та 16 тез конференцій [10–12, 14, 16–20, 22, 23, 27–30, 32].

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 175 сторінок, 58 рисунків, 2 таблиці та 158 бібліографічних посилань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертації наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, її зв'язок з науково-технічними програмами, сформульовані мета та завдання роботи, визначено об'єкт, предмет та методи досліджень, показана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Визначено особистий внесок здобувача та наведені відомості про апробацію результатів на наукових конференціях та семінарах. Надані відомості про структуру і зміст роботи.

У **першому розділі** дисертації розглянуто стан проблеми побудови перетворювачів магнітного поля ферозондового типу, їхнє місце серед інших типів магнітних сенсорів, та тенденції в їхньому розвитку, викликаних потребами перспективних застосувань магнітометрії. Такі перетворювачі призначені для векторного вимірювання слабого сталого або повільно змінного магнітного поля. Попри те що ферозонди здатні вимірювати магнітні поля нижчого рівня, ніж багато інших типів сенсорів, їхній поріг чутливості, все ж, обмежений. Основним обмеженням зниження порогу чутливості ферозондів є магнітний шум осердя, пов'язаний зі стрибкоподібним рухом міждоменних меж при його перемагнічуванні полем збудження. Ефективно здолати таке обмеження можна завдяки оборотному або безгістерезисному перемагнічуванню. Для цього осердя не повинно розбиватися на домени, тобто бути у монодоменному стані. Різними авторами пропонуються різні способи забезпечення монодоменності. Одним з них є використання як осердя тонкого диску з магнітом'якого матеріалу, який перемагнічується магнітним полем, що обертається у площині диску, амплітуда якого повинна бути достатньою для намагнічування осердя до насичення. Матеріалом осердя можуть служити магнітом'які феромагнітні метали або діелектричні феромагнетики з високою магнітною проникністю. При перемагнічуванні осердя полем високої частоти останні можуть мати перевагу в порівнянні з металічними осердями завдяки уникненню вихрових струмів, що призводять до зростання рівня шуму перетворювача. Окрім того, було показано, що завдяки кубічній магнітній анізотропії (111)-орієнтованої монокристалічної

плівки ферогранату ітрію, перетворювач, що використовує її як чутливе середовище, володіє чутливістю до трьох ортогональних компонент магнітного поля. Попри це, вплив магнітної анізотропії, як і кристалографічної орієнтації монокристалічного осердя, на відгук ферозондового перетворювача докладно не вивчався, як і багато інших аспектів, пов'язаних з практичним конструюванням, збудженням та реєстрацією інформаційного сигналу такого типу перетворювачів магнітного поля. На основі аналізу стану вивченості проблеми сформульована мета та завдання дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** описуються підходи до моделювання сигналу відгуку перетворювача магнітного поля ферозондового типу на основі оборотного перемагнічування магнітом'якої плівки кубічного магнетика. Перемагнічування під дією магнітного поля збудження з частотою порядку десятків кГц розглядається як рівноважний, тобто стан намагніченості в кожний момент часу відповідає мінімуму вільної енергії плівкового осердя, анізотропна частина якої складається з енергії осердя у зовнішньому магнітному полі, енергії розмагнічуючих полів намагніченого осердя та енергії магнітної анізотропії, яка для кристалічного осердя з епітаксійної плівки ферогранату містить як кубічну кристалографічну, так і індуковану одновісну магнітну анізотропію, з віссю нормальною до площини плівки.

Передбачається, що в об'ємі осердя у формі тонкого диску магнітне поле та намагніченість є однорідними. Магнітне поле, що діє на осердя складається з поля збудження, що створюється системою намагнічування, та вимірюваного поля, яке вважається достатньо малим і повільно змінним у порівнянні з амплітудою поля збудження. Вектор поля збудження здійснює обертання у площині для випадку обертального перемагнічування або поворотні коливання у площині. Для створення поля збудження використовуються котушки з ортогональними осями. Для обертального перемагнічування струми у котушках гармонічні, мають однакову амплітуду та зсунуті за фазою на 90° , а у випадку поворотних коливань поле збудження створюється сталим полем зміщення та ортогональним до нього гармонічним полем. В обох випадках передбачається, що амплітуда вектора поля збудження завжди є достатньою для намагнічування осердя до насичення.

Вектор намагніченості намагніченого до насичення осердя має сталу амплітуду і здійснює вимушені повороти вслід за рухом вектора зовнішнього поля, тому його рух описується двома координатами – азимутальним та полярним кутом. Мінімізація анізотропної частини вільної енергії системи, що відповідає рівноважному і, відповідно, оборотному перемагнічуванню, дозволяє отримати аналітичні співвідношення, за якими можуть бути обчислені часові залежності компонент вектора намагніченості у нерухомій системі координат. Індукційний відгук створюється за законом електромагнітної індукції внаслідок виникнення електрорушійної сили, пропорційної до швидкості зміни магнітного потоку через витки вимірювальної котушки, а, відтак, і зміни компоненти намагніченості осердя вздовж осі вимірювальної котушки, і може бути зареєстрований як різниця потенціалів на виводах котушки. Наявність вимірюваного магнітного поля окрім симетричного поля збудження, порушує симетрію системи і створює додаткову нелінійну складову у сигналі відгуку (феромодуляційний ефект), за якою можуть бути визначені компоненти вимірюваного поля.

Головною задачею моделювання було встановлення взаємозв'язку між характеристиками матеріалу осердя, конструктивними параметрами перетворювача та умовами збудження з одного боку, і нелінійною частиною відгуку, що пов'язана з компонентами вимірюваного магнітного поля, та її характеристиками, що можуть бути зареєстрованими у той, чи інший спосіб. Це у свою чергу дозволило сформулювати вимоги до матеріалу осердя, конструкції перетворювача, встановити його чутливість до компонент магнітного поля та аналізувати найкращі умови для реєстрації інформативної частини сигналу відгуку.

Як матеріал осердя розглядалися та експериментально досліджувалися епітаксійні плівки ферогранату на основі залізо-ітрієвого гранату, вирощені методом ізотермічної рідинно-фазної епітаксії на монокристалічну орієнтовану підкладку гадоліній-галієвого гранату, які володіють помірною перпендикулярною одновісною магнітною анізотропією.

У розділі також описано методи, що застосовані для експериментального дослідження феромодуляційного ефекту при побудові макетів перетворювачів з обертанням та поворотними коливаннями вектора поля збудження.

У **третьому розділі** приводяться результати моделювання ферозондового перетворювача на основі перемагнічування дископодібного осердя магнітним полем, що обертається в його площині. Він складається з осердя, двох котушок збудження та вимірювальної котушки (див. Рис 1).

Вимірюваним сигналом є сигнал ЕРС $\varepsilon(t)$, що індукується у вимірювальній котушці з віссю, паралельною до площини диску, зміною в часі відповідних компонент поля збудження та намагніченості осердя. Інформація про вимірюване поле міститься у квадратурних компонентах другої гармоніки сигналу відгуку. При цьому амплітуда другої гармоніки прямо пропорційна напруженості вимірюваного поля, а при його відсутності друга гармоніка у сигналі відгуку відсутня:

$$\varepsilon(t) = \mu_0 \omega w \left(V H_0 + \frac{1}{\mu_0} V_C M_S \right) \sin \omega t - \omega w \frac{M_S}{H_0} V_C (h_x \sin 2\omega t - h_y \cos 2\omega t). \quad (1)$$

Тут H_0 – амплітуда поля збудження, M_S – намагніченість насичення матеріалу осердя, h_x і h_y – горизонтальні компоненти вимірюваного поля, w – щільність обмотки вимірювальної котушки, V_C – об'єм осердя.

Чутливість приладу до вимірюваного поля визначається амплітудою другої гармоніки, яка лінійно зростає зі зростанням частоти поля збудження, об'єму осердя, кількості витків вимірювальної котушки на одиницю її довжини та намагніченості насичення осердя і спадає зі зростанням осердя амплітуди поля збудження, яке не може бути меншим за поле насичування осердя. Крім корисної інформації, в сигналі відгуку міститься також неінформативна перша гармоніка. Можливість виділення інформативної складової з сигналу відгуку визначається

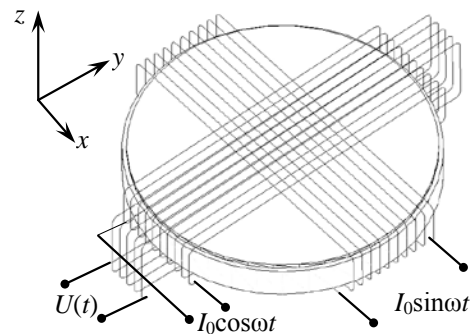


Рис. 1. Схема ферозонда на основі перемагнічування дискового осердя обертальним магнітним полем.

відношенням другої гармоніки до першої і чим воно вище, тим легше це здійснити технічно. Для підвищення чутливості приладу до вимірюваного поля і забезпечення кращих умов для виділення інформативної складової сигналу відгуку на фоні першої гармоніки потрібно вибирати осердя з більшим об'ємом, більшою намагніченістю і меншим полем насичення.

На роботу перетворювача з перемагнічуванням обертальним полем впливають неоднаковість амплітуд полів, що створюються котушками збудження, відхилення зсуву фаз між ними від $\pi/2$, не ортогональність самих котушок збудження, відхилення площини осердя від площини обертання поля, а у випадку використання як осердя монокристалічної плівки – її кристалографічна розорієнтація та параметри магнітної анізотропії. Аналіз вищезгаданих факторів здійснюється на основі розгляду рівноважного перемагнічування, тобто забезпечення мінімуму густини енергії осердя у зовнішньому магнітному полі. З нього випливає, що відхилення ΔH між полями, що створюються котушками збудження, вносить свій вклад у першу, другу, третю і четверту гармоніки. При цьому третя гармоніка прямо пропорційна відхиленню ΔH , а отже може бути використана для контролю ступеня еліптичності поля збудження. Вклад у другу гармоніку, який спричиняється відхиленням ΔH прямо пропорційний добутку $\Delta H h_x$ і обернено пропорційний квадрату амплітуди поля збудження, а отже незначний, беручи до уваги те, що вимірюване поле – мала величина. Крім того він може бути послаблений в процесі калібрування ферозонда в магнітному екрані. Незначне відхилення зсуву фаз між гармонічними струмами в котушках збудження від $\pi/2$ є еквівалентне еліптичному збудженню активного середовища, тому наслідки такого відхилення та можливі способи контролю такого роду фактору будуть такі самі, як розглянуті вище. Відхилення площини обертання поля збудження від площини осердя приводить до модифікації фази другої гармоніки. Отже, воно може впливати на результати вимірювання компонент магнітного поля. З іншого боку складова, яка з'являється при відхиленні площини обертання поля від площини осердя обернено пропорційна квадрату амплітуди поля збудження і прямо пропорційна добутку $H_{\perp} h_z$, де h_z – вертикальна компонента вимірюваного поля є малою величиною, а отже, в такому випадку спостерігатимуться лише незначні зміни в сигналі відгуку. Крім того, при наявності відхилення площини обертання поля від площини чутливого елемента відбувається зміщення „нуля” вимірюваного поля. Встановити величину зміщення „нуля” можна, прикладаючи каліброване магнітне поле у напрямках x та y у додатному чи від'ємному напрямку. Отже, негативний вплив цього фактору також може бути усунений при калібруванні перетворювача.

Окрема увага приділяється використанню як осердя ферозондового перетворювача монокристалічної плівки кубічного магнетика. Проаналізовано осердя з орієнтаціями (100), (110) та (111). Для двох орієнтацій (100) та (110) у спектрі індукованого сигналу інформація про ортогональні компоненти магнітного поля, що знаходяться в площині осердя, міститься лише в другій гармоніці індукційного відгуку, а чутливість до перпендикулярної до осердя складової відсутня зовсім на відміну від використання епітаксійної плівки орієнтації (111), причому, чутливість до x - та y -компонент вимірюваного поля не пов'язана з анізотропією плівки. З іншого боку, в спектрі сигналу відклику містяться непарні

гармоніки (3-тя та 5-та), які пов'язані з кристалографічною анізотропією і не пов'язані зі зміною симетрії системи, викликану наявністю вимірюваного поля, а у випадку орієнтації (110) як кристалографічна, так і ромбічна магнітні анізотропії модифікують також амплітуду першої гармоніки. Для орієнтації чутливого елемента (111) у спектрі сигналу відгуку аналогічно (як прояв кубічної анізотропії) виникають 5-та та 7-ма гармоніки, тоді як чутливою до планарних компонент вимірюваного поля є друга, а до перпендикулярної компоненти – 2-га і 4-та. Очевидно, що такі відмінності пов'язані з особливостями результуючої симетрії осей легкого намагнічування (ОЛН), що виникає внаслідок накладання кристалографічної та індукованої магнітної анізотропії, а також анізотропії форми чутливого елемента. Ці результати спонукали до постановки нової задачі дослідження – встановлення, як симетрія осей легкого намагнічування пов'язана з гармонічним складом сигналу відклику та можливістю окрім двох планарних компонент вимірювання перпендикулярної складової магнітного поля. Розташування ОЛН об'ємного кристалу гранату по відношенню до площини орієнтації розглянутих чутливих елементів показано на Рис. 2, а їх розташування в чутливому елементі в площинах, перпендикулярних до його площини – на Рис. 3.

Рис. 2. Розташування осей легкого намагнічування об'ємного кристалу ферогранату по відношенню до площин (100) – *a*, (110) – *б* та (111) – *в*.

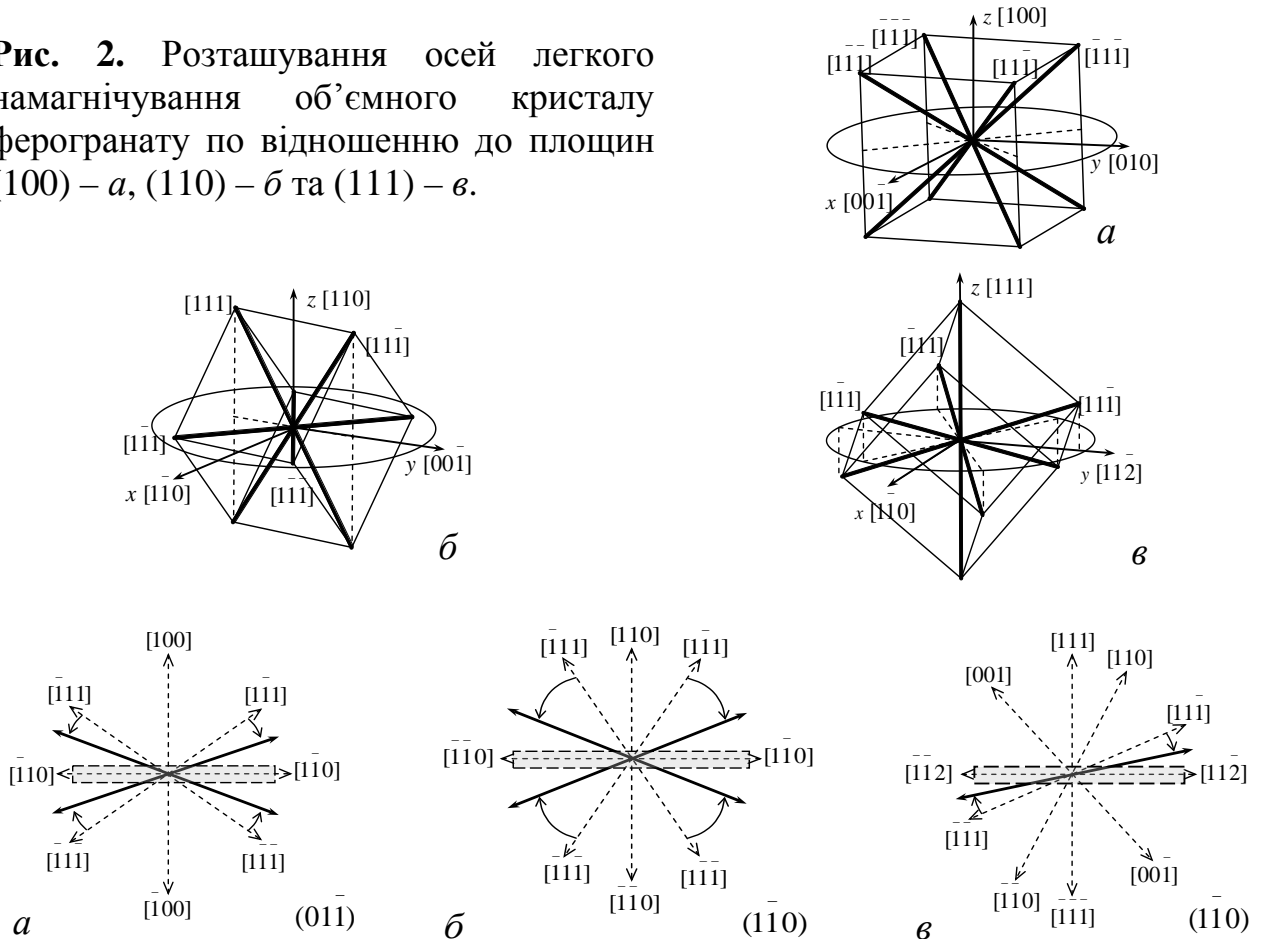


Рис. 3. На рис. *a-в* показано взаємне розташування осей легкого намагнічування (ОЛН) (суцільні лінії) та їх відхилення від ОЛН об'ємного кристалу у плівках орієнтації відповідно (100), (110) та (111) у площинах, перпендикулярних до площини чутливого елемента. Пунктиром позначені основні кристалографічні напрямки.

Основна відмінність симетрії ОЛН плівок з орієнтацією (100) та (110) від плівки з орієнтацією (111) полягає в тому, що існують пари дзеркально симетричних відносно площини плівки ОЛН з однаковими азимутами у площині, тоді як в плівці (111) така симетрія відсутня. Це призводить до того, що в розглянутих тут моделях відхилення вектора намагніченості від площини плівки залежить лише від компоненти сталого вимірюваного поля h_z і, оскільки це поле слід розглядати дуже малим, воно не може бути вимірним не лише на основі принципу дії ферозонда, але й просто індуктивним методом. У плівці орієнтації (111) цей кут залежить також від азимуту вектора намагніченості α , отже, його зміна в часі зазнає впливу перпендикулярної компоненти поля, що й призводить до чутливості парних гармонік сигналу до перпендикулярної компоненти магнітного поля. Чутливість до вертикальної компоненти виникає тоді, коли ОЛН не мають дзеркальних щодо площини плівки проєкцій, що відповідає симетрії S_n – дзеркально-поворотна вісь n -ного порядку.

У сигналі відгуку ферозонда присутні компоненти на частоті сигналу збудження, що не несуть інформації про вимірюване поле і за величиною значно перевищують інформативні. Навіть при використанні синхронного детектування інформативних компонент, вплив неінформативних складових може бути домінуючим, якщо йдеться про вимірювання слабких полів. Для зменшення їх впливу може бути застосовано диференціальне увімкнення вимірювальних котушок двох ідентичних чутливих елементів так, що в сумарному сигналі відгуку вклад від неінформативних компонент зменшується, а від інформативних зростає. Крім того, така схема увімкнення чутливих елементів перетворювача може мати також іншу перевагу – вона дає можливість вимірювати компоненти просторового градієнта магнітного поля. Такий пристрій складається з двох ідентичних чутливих елементів 1 та 2 (див. Рис. 4), розміщених у парах котушок збудження 3 і 4.

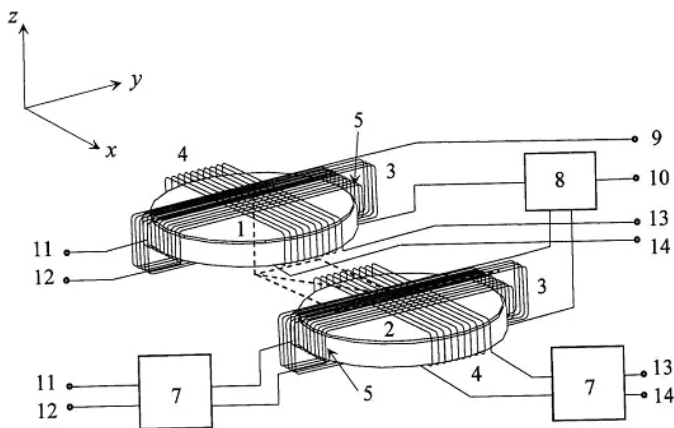


Рис. 4. Взаємне розміщення чутливих елементів магніточутливого зонда, намагнічуючих та вимірювальних котушок, під'єднання комутуючих пристроїв намагнічуючих та вимірювальних котушок: 1 і 2 – чутливі елементи, 3, 4 – котушки збудження, 5 – вимірювальна котушка, 7 – комутуючий пристрій котушки збудження, 8 – комутуючий пристрій вимірювальної котушки, 9, 10 – контакти під'єднання вимірювальної схеми, 11, 12, 13, 14 – контакти під'єднання джерела гармонічного струму збудження [7]

Кожен з чутливих елементів має також вимірювальну котушку 5. Усі котушки другого чутливого елемента повинні бути орієнтовані паралельно до відповідних котушок першого. Вимірювальні котушки обох чутливих елементів під'єднані через комутуючий пристрій 8, що дозволяє змінювати напрямок їх під'єднання. Кожна з намагнічуючих котушок другого чутливого елемента під'єднана до

джерела змінного струму через окремих пристрій комутації котушок намагнічування із забезпеченням можливості зміни напрямку струму в кожній намагнічуючій котушці другого чутливого елемента на протилежний по відношенню до напрямку струму в ідентично орієнтованій намагнічуючій котушці першого чутливого елемента. Другий чутливий елемент зонду розміщений на відстані вздовж кожної з осей x , y та z і обидва чутливі елементи орієнтовані відносно котушок збудження та між собою відповідно до магнітної анізотропії матеріалу чутливих елементів. Введення до складу магнітометричного зонда комутуючих пристроїв котушок намагнічування другого чутливого елемента забезпечують можливість змінювати напрямок обертання магнітного поля збудження в одному чутливому елементі по відношенню до іншого, а також змінити відносний фазовий зсув між полями збудження двох чутливих елементів на π . У результаті в залежності від режиму комутації у двох комутуючих пристроях 7 намагнічуючих котушок 3 і 4 другого чутливого елемента 2 та режиму комутуючого пристрою 8 вимірювальних котушок реалізуються різні можливі конфігурації магніточутливого зонда і, відповідні індуковані сигнали, які реєструються на контактах 9 і 10 (див. Рис. 4). Проаналізовано 8 конфігурацій первинного перетворювача, які дозволяють реалізувати різні комбінації вимірювання одночасно трьох компонентів магнітного поля або його просторових градієнтів, у різних комбінаціях, що може мати застосування для різноманітних прикладних задач.

У третьому розділі також аналізується перетворювач у режимі збудження від джерела гармонічної напруги (див. Рис. 5).

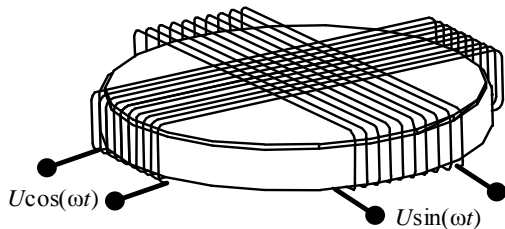
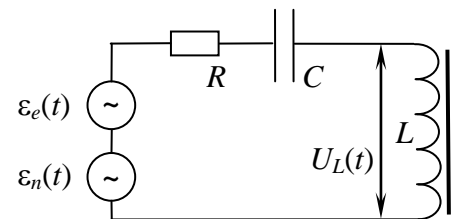


Рис. 5. Схематичне зображення котушок збудження ферозонда з обертальним перемагнічуванням дискового осердя.

При відсутності вимірюваного магнітного поля, через котушки збудження протікають гармонічні струми, оскільки їхні індуктивності є лінійними. Однак поява вимірюваного поля змінює ситуацію. Еквівалентну схему такого перетворювача показано на Рис. 6.

Рис. 6. Еквівалентна схема кола котушки збудження ферозонда при її живленні від джерела ЕРС.



Вона містить індуктивність L , що є індуктивністю котушки збудження та усіх провідників, активний опір R , що включає активний опір усіх провідників та внутрішній опір джерела живлення, ємність C , що включає частину паразитної ємності котушки та ємність конденсатора для регулювання резонансної частоти послідовного коливального контуру, а також додаткове джерело нелінійної

складової ЕРС індукції $\varepsilon_n(t)$, яке виникає у котушці за наявності вимірюваного магнітного поля.

Рівняння, що описує часову залежність струму, що протікає в котушці збудження при прикладенні до неї гармонічної напруги має вигляд:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = j\omega U e^{j\omega t} + K_h \left(\left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + I \frac{d^2 I}{dt^2} \right). \quad (2)$$

При наявності зовнішнього сталого вимірюваного поля \mathbf{h} струм в колі, в загальному випадку, міститиме вищі гармоніки. Розв'язок рівняння (2) шукається асимптотичним методом шляхом розкладу невідомого струму за параметром

$K_h = 2n_x n_y V_c \frac{M_S}{H_0^3} (n_y h_x - n_x h_y)$, де h_x і h_y – компоненти вимірюваного поля. Для цього

струм I подається у вигляді такого степеневого ряду: $I(t, K_h) = I_1(t) + K_h \tilde{I}_2(t) + K_h^2 \tilde{I}_3(t) + \dots$. Чутливість за другою гармонікою струму залежить від співвідношення частот збудження ω та резонансної частоти контуру збудження. Характер залежності S_I від співвідношення ω_0/ω відображає Рис. 7, на якому наведені розрахункові залежності для частоти збудження 10 кГц, та різних значень декременту загасання контуру δ . Як видно з Рис. 6а, S_I має максимуми при $\omega_0 \approx \omega$ і $\omega_0 \approx 2\omega$.

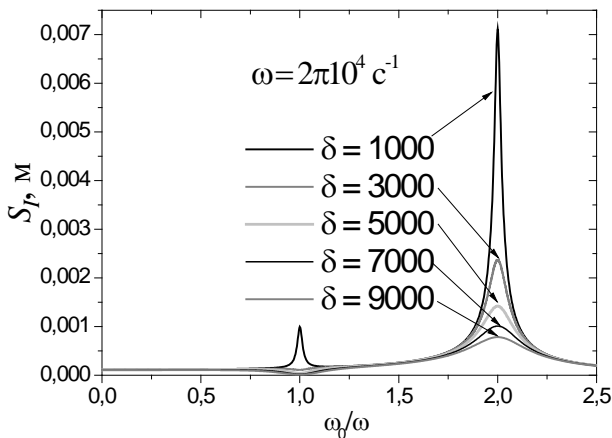


Рис. 7. Струмова чутливість другої гармоніки S_I ферозонда з обертальним перемагнічуванням у режимі живлення гармонічною напругою: (а) – як функція співвідношення ω_0/ω для різних значень декременту загасання δ .

Слід зазначити також, що амплітуда першої гармоніки спаду напруги на котушці лінійно зростає з частотою, тому відношення амплітуди другої гармоніки до амплітуди першої у режимі живлення напругою буде зростати пропорційно частоті збудження за умови $\omega = \omega_0 / 2$, що з підвищенням одночасно ω та ω_0 , окрім підвищення чутливості ферозонда, покращує також умови виділення другої гармоніки на тлі неінформативної першої. Залежності чутливості в режимі збудження гармонічною напругою S_U за умови $\omega = \omega_0 / 2$ і в режимі живлення стабілізованим струмом S_0 від частоти поля збудження показано на Рис. 8, де для розрахунку використані однакові параметри конструкції.

Як видно з Рис. 8 головною особливістю залежності S_U від частоти, яка відрізняє її від частотної залежності чутливості у режимі живлення струмом, є її квадратичний характер. Це означає, що такий режим реєстрації завжди буде мати перевагу в чутливості при перевищенні деякої частоти, яка залежить від параметрів матеріалу та конструкції.

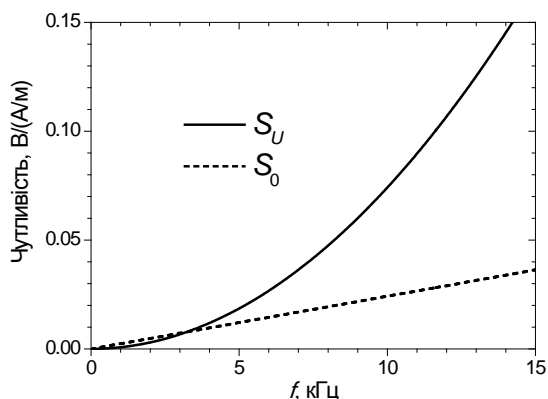


Рис. 8. Залежність чутливості обертального ферозонда від частоти поля збудження при реєстрації напруги на котушці збудження S_U у режимі живлення кола збудження гармонічною напругою за умови $\omega_0 = 2\omega$ (1) та при реєстрації ЕРС на вимірювальній котушці у режимі живлення кола збудження гармонічним струмом (2).

Четвертий розділ присвячений дослідженню різновидів ферозонда з перемагнічуванням дискового осердя магнітним полем, що здійснює поворотні коливання у його площині – маятниковоподібне перемагнічування, що розглядається як альтернативний спосіб перемагнічування дискового осердя оборотно та безгістерезисно. Схематично поперечний розріз двох конструкцій перетворювача показано на Рис. 9а–б, а взаємне розташування напрямків поля та намагніченості активного середовища – на Рис. 9в. Перетворювач у конфігурації повздожнього збудження (див. Рис. 9а) складається з двох ідентичних плівок чутливих елементів, кожен з яких розміщений у площині xu і знаходиться всередині однакових плоских котушок збудження 2, увімкнених зустрічно або у конфігурації поперечного збудження (Рис. 9б) – однієї плівки чутливого елемента. У повздожній конфігурації котушки збудження створюють магнітне поле, направлене у протилежні сторони вздовж осі u в різних чутливих елементах (Рис. 9а).

Для реєстрації індукованої ЕРС служить вимірювальна котушка 3, яка охоплює своїми витками обидва чутливих елементи 1. При такому взаємному розташуванні вимірювальної котушки та під'єднанні котушок збудження чутливих елементів, що є типовим для традиційних ферозондів, непарні гармоніки сигналу, індуковані у вимірювальній котушці кожним з чутливих елементів, компенсують одна одну, а парні гармоніки, навпаки, подвоюються. Віссю магнітної чутливості ферозонда є вісь u .

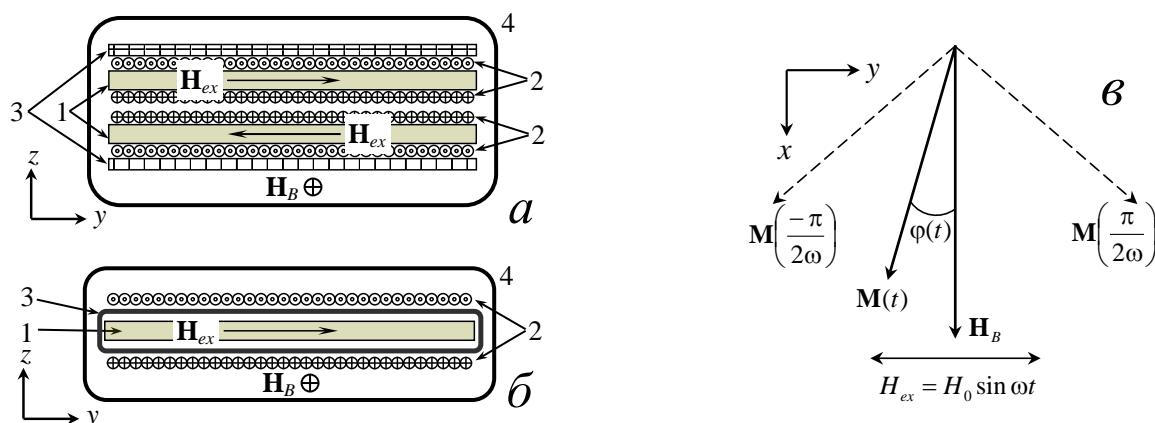


Рис. 9. Конструкція маятниковоподібного ферозонду при повздожньому збудженні двох елементів (а) та поперечного збудженні (б): 1 – чутливі елементи, 2 – котушки збудження, 3 – вимірювальна котушка, 4 – котушка для створення поля зміщення; та взаємне розташування напрямків поля збудження H_B , поля збудження H_{ex} і намагніченості M активного середовища (в).

Маятниковоподібний ферозонд відрізняється від конструкції двохстрижневого ферозонда наявністю котушки 4, яка створює постійне поле зміщення H_B , в напрямку осі x . Напруженість поля зміщення є такою, щоб магнітом'які чутливі елементи увесь час знаходилися у монодоменному стані. Тоді поле збудження призводить до коливання вектора намагніченості \mathbf{M} чутливих елементів у площині xy , як показано на Рис. 9б, що нагадують коливання маятника. Магнітний гістерезис при цьому відсутній.

При підвищенні співвідношення між амплітудою змінного поля збудження і величиною поля зміщення H_0/H_B , нелінійний характер коливань вектора намагніченості підсилюється і спектр сигналу відгуку зміщується у сторону вищих частот. Для повздовжнього збудження це дозволяє вимірювати поле h_y не лише за допомогою другої гармоніки, але й більш високих парних гармонік. Для активного середовища з магнітодіелектрика це потенційно може мати переваги, оскільки за відсутності втрат на збудження вихрових струмів в чутливому елементі вимірювання багатьох парних гармонік дає вигравш у співвідношенні сигнал/шум.

Реалізація обробки вимірюваного сигналу в маятниковоподібному ферозонді за загально прийнятим підходом може бути неефективною саме через багатство спектру сигналу відгуку, оскільки одночасна частотна фільтрація багатьох парних чи непарних гармонік чи спектральний аналіз, вимірюного у широкій смузі сигналу, є складними у реалізації і можуть бути неефективними. Тому було запропоновано інший метод обробки сигналу відгуку перетворювача, який дозволяє виміряти сигнал, що відповідає усій сукупності парних чи непарних гармонік. Його суть ґрунтується на симетрійних властивостях часової залежності сигналу відгуку перетворювача, з яких випливає, що уся сукупність непарних гармонік сигналу відгуку утворює антиперіодичну функцію часу. Відповідно сукупність усіх парних гармонік є періодичною функцією з удвічі коротшим періодом. Розділити ці складові зареєстрованого індукційного сигналу відгуку можна реалізуючи математичний метод розділення за допомогою затримки на пів-періоду та віднімання затриманого сигналу від незатриманого або за допомогою детектування узгодженим фільтром. Такий метод реєстрації дозволяє підняти чутливість сенсора при збереженні співвідношення сигнал/шум.

При використанні як осердя анізотропної магнітної плівки, у залежності від розташування системи її ОЛН по відношенню до поля зміщення і поля збудження перетворювача, в сигналі відгуку можуть з'явитися інформативні гармоніки навіть при відсутності вимірюваного поля – «паразитні гармоніки» [1, 2]. Для аналізу цього явища, як і у попередньому випадку, було використано симетрійні властивості сигналу відгуку. Так, відсутність паразитних гармонік у сигналі відгуку відповідає відсутності усіх парних гармонік у сигналі відгуку перетворювача з повздовжнім збудженням (періодична складова з періодом, вдвічі меншим за період сигналу збудження), а у випадку перетворювача з поперечним збудженням в сигналі відгуку відсутні усі непарні гармоніки (антиперіодична складова). Ці випадки відповідають симетричним положенням системи ОЛН осердя по відношенню до напрямків поля зміщення і поля збудження перетворювача. Так, для випадку однієї осі легкого намагнічення, що лежить в площині плівки, симетричні положення настають при куті відхилення ОЛН $\gamma = n \cdot \pi/2$ (див. Рис. 12), де n – натуральне. При використанні плівки орієнтації (100), γ

$= n \cdot \pi/4$, а у випадку плівки орієнтації (111), $\gamma = n \cdot \pi/6$, що відповідає відповідній симетрії ОЛН середовища (Рис. 2). Залежність сигналу відгуку перетворювача на основі анізотропної плівки від положення її ОЛН у системі намагнічення пристрою може бути використано для аналізу симетрії та орієнтації ОЛН плівки, а також для кількісного визначення параметрів її магнітної анізотропії.

У **п'ятому розділі** подаються результати експериментального дослідження ферозондового перетворювачів при збудженні магнітом'якої плівки на основі ферогранату ітрію магнітним полем, що обертається в її площині, та полем, що здійснює маятниковоподібні поворотні коливання. Блок-схему приладу ферозонда з обертальним полем показано на Рис. 10. Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) 1 служить джерелом напруги для обох котушок збудження. Амплітуду напруги для кожної з котушок, а також зсув фаз між ними можна змінювати за допомогою блоку регулювання 2. Після підсилення потужності підсилювачем 3, сформований сигнал збудження подається в котушки 4. Сигнал відгуку, пропорційний струму в котушці, сумується у протифазі з опорним сигналом, який відповідає першій гармоніці сигналу збудження за допомогою суматора 6. Перед суматором амплітуди двох сигналів масштабуються за допомогою блоків регулювання 2 і 5. Вимірний сигнал з частково скомпенсованою першою гармонікою через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) 8, буфер 11 та інтерфейс USB 1.1 потрапляє в комп'ютер, де вся подальша обробка здійснюється програмними засобами.

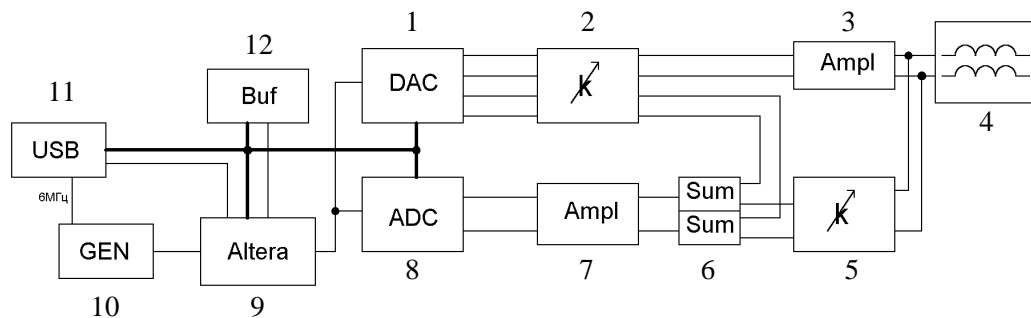
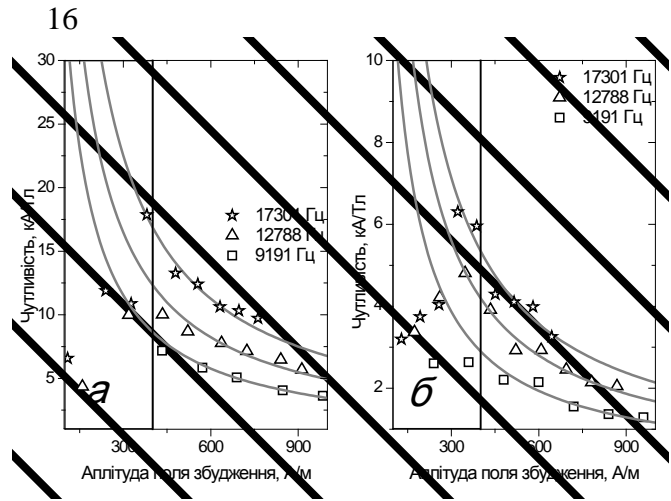


Рис. 10. Блок-схема сенсора макету ферозондового перетворювача: 1 – ЦАП; 2 – блок регулювання амплітуди та фази сигналу збудження; 3 – підсилювач потужності; 4 – котушки збудження; 5 – блок регулювання коефіцієнта підсилення підсилювача 7; 6 – суматор; 7 – підсилювач сигналу; 8 – АЦП; 9 – ПЛІС “Altera”; 10 – генератор синхроімпульсів; 11 – інтерфейс USB; 12 – буферна пам’ять.

Увесь пристрій керується за допомогою програмованих матриць 9, які разом з ЦАП і АЦП, а також контролером USB, синхронізуються від генератора синхроімпульсів 10. У макеті також передбачено можливість контролю за формою обертального поля збудження за третьою гармонікою [3]. Результати вимірювання чутливості за струмами в обох котушках збудження та розраховані залежності від амплітуди поля збудження для кількох частот збудження показано на Рис. 11 [8, 29, 31].

Рис. 11. Експериментальні (точки) і теоретичні (лінії) залежності чутливості ферозонда від амплітуди поля збудження, виміряні на різних частотах для внутрішньої (а) і зовнішньої (б) котушок. Заштрихована область, в якій порушується умова намагніченості осердя до насичення.



Видно, що експериментальна залежність чутливості від амплітуди поля збудження має характер $1/H_0$, що узгоджується з теоретичними передбаченнями. Іншою особливістю, яку помітно з порівняння двох залежностей, знятих з кожної з котушок, чутливість приладу до поля при вимірюванні сигналу з внутрішньої котушки приблизно втричі вища за чутливість при вимірюванні сигналу відгуку з зовнішньої котушки. Це можна пояснити різницею в їхньому внутрішньому об'ємі, а також тим, що внутрішня котушка має вищий коефіцієнт заповнення свого внутрішнього об'єму осердям. Відхилення експериментальних точок при амплітуді поля збудження нижче 400 А/м від розрахованої залежності чутливості, представлена суцільними лініями, пояснюється тим, що у цій області осердя знаходиться у ненасиченому стані, а отже не відповідає розглянутій моделі. Чутливість відгуку у внутрішній котушці вища за визначену у зовнішній котушці, оскільки заповнення об'єму котушки осердям у цьому випадку є значно вищим.

Експериментальній перевірці впливу магнітної анізотропії осердя перетворювача на основі перемагнічування полем, що здійснює поворотні коливання в площині присвячено другу частину п'ятого розділу. Схема та фотографія намагнічуючої системи експериментальної установки і розміщення експериментального зразка у ній показані на рис. 12.

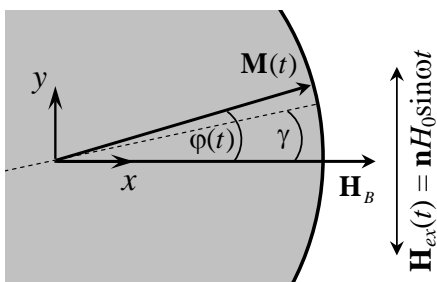
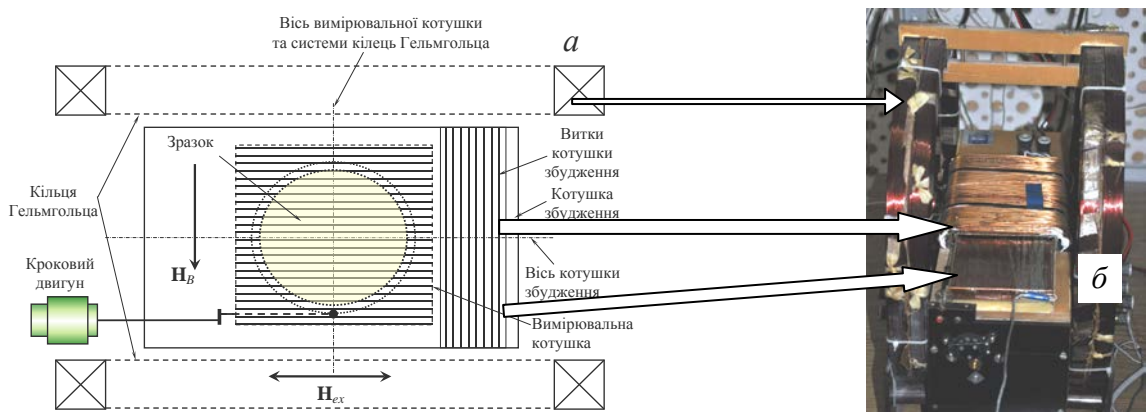


Рис. 12. Взаємне розташування напрямків сталого поля зміщення H_B , знакозмінного поля збудження H_{ex} та проєкцій намагніченості M дискового осердя й осі легкого намагнічування (пунктирна лінія) на площину диску відносно системи координат.



Експериментальні дослідження проводилися на структурі ферогранату $Y_3(FeSc)_5O_{12}$, вирощеній методом ізотермічної рідинно-фазної епітаксії на монокристалічну підкладку $Gd_3Ga_5O_{12}$ номінальної орієнтації (111) діаметром 76,2 мм. Товщина епітаксійної плівки становила 11 мкм. Для реєстрації феромодуляційного ефекту в експерименті використано реєстрацію першої гармоніки сигналу гармонічного збудження у котушці, що орієнтована своєю віссю вздовж поля зміщення H_B . У цьому разі феромодуляційний відклик лінійно залежить від амплітуди збудження в області малих її значень.

Намагнічуюча система установки складається з пари кілець Гельмгольца для створення сталого поля зміщення H_B та котушки, яка створює змінне поле збудження H_{ex} . Максимально можливе значення напруженості магнітного поля, яке здатні забезпечити котушки Гельмгольца становить 8000 А/м. Просторова неоднорідність змінного поля H_{ex} , що забезпечується котушкою збудження не перевищує 5% в межах досліджуваного зразка. Вимірювальна котушка складається з 10 шарів і намотана дротом діаметром 0,1 мм. Усі елементи конструкції макету виготовлено з немагнітних матеріалів. Експериментальні дослідження феромодуляційного ефекту полягали у вимірюванні амплітуди першої гармоніки ЕРС, що індукується у вимірювальній котушці, орієнтованій своєю віссю перпендикулярно до напрямку прикладення змінного поля збудження і паралельно до напрямку поля зміщення. За відсутності магнітної анізотропії коливання симетричні і сигнал ЕРС містить лише другу гармоніку від частоти збудження. Магнітна анізотропія спричинює відхилення вектора намагніченості від напрямку поля зміщення і появу першої гармоніки ЕРС при відхиленні напрямку поля зміщення від осей легкого або важкого намагнічування. Для модельних розрахунків використано параметри магнітної анізотропії ферогранату ітрію $Y_3Fe_5O_{12}$. Для монокристалічної плівки кубічного магнетика з кристалографічною орієнтацією (111) експериментальні кутові залежності мають симетрію шостого порядку, що підтверджує прояв саме кубічної кристалографічної магнітної анізотропії при реєстрації феромодуляційного ефекту.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі встановлено особливості впливу оборотного перемагнічування під дією магнітного поля, що обертається або здійснює поворотні коливання у площині магнітом'якого дискового осердя, на його нелінійний індукційний відгук та показано використання цих особливостей при конструюванні перетворювачів магнітного поля ферозондового типу для покращення їхніх характеристик.

1. При використанні як осердя ферозонда з обертальним перемагнічуванням монокристалічної плівки кубічного магнетика виявлено, що для (100)- та (110)-орієнтованої плівки ферозонд є чутливим лише до двох ортогональних компонент магнітного поля, що лежать у площині осердя. Встановлено, що можливість одночасно вимірювати перетворювачем даного типу усіх трьох ортогональних компонент поля пов'язана з існуванням таких осей легкого намагнічування, які нахилені до площини плівки і не мають дзеркально симетричної відносно площини плівки пари, як, наприклад, у плівці з кристалографічною орієнтацією (111), що відповідає симетрії ОЛН S_n – дзеркально-поворотна вісь n -ного порядку.

2. Встановлено фактори, які впливають на вимірювання магнітного поля перетворювачем на основі перемагнічування дискового осердя обертальним полем.

Серед них – різниця між амплітудами полів збудження в котушках, зсув фаз між полями збудження, який відрізняється від 90° , відхилення площини обертання поля збудження від площини осердя. Перші два фактори призводять до появи в сигналі відгуку непарних гармонік, а останній вносить зміни до парних. Їх вплив може бути скомпенсовано на етапі налаштування приладу внесенням відповідних поправок в фази і амплітуди полів збудження.

3. Сформульовані загальні умови до первинного ферозондового перетворювача та його збудження для забезпечення ефективного виділення другої гармоніки сигналу відгуку на фоні переважаючої першої, коефіцієнт заповнення вимірювальної котушки осердям та намагніченість насичення матеріалу осердя повинні бути якомога вищим, а поле насичування осердя – якомога нижчим.

4. При використанні резонансних властивостей кола збудження ферозонда на основі перемагнічування полем, що обертається у площині осердя, увімкненого за схемою послідовного резонансного контуру, за умови налаштування резонансу на частоту удвічі більшу за частоту збудження, чутливість реєстрації компонент вимірюваного поля за другою гармонікою квадратично залежить від частоти збудження. При одночасному підвищенні частоти резонансу та частоти збудження покращуються умови для виділення другої гармоніки, пропорційної компонентам вимірюваного магнітного поля, на тлі неінформативної першої гармоніки.

5. При використанні двоелементного первинного перетворювача на основі (111) орієнтованих ЕПФГ за рахунок варіантів взаємної орієнтації чутливих елементів, напрямків обертання, фазових зсувів та способів з'єднання вимірювальних котушок проаналізовано 8 конфігурацій первинного перетворювача, які дозволяють реалізувати вимірювання одночасно трьох компонентів магнітного поля або його просторових градієнтів у різних комбінаціях, що може мати застосування для різноманітних прикладних задач.

6. Встановлено можливість побудови ферозондового перетворювача на основі перемагнічування дискового осердя полем, що здійснює поворотні коливання у його площині, як способу, альтернативного до обертального перемагнічування. Перевагою такого способу перемагнічування є широкий спектр сигналу відгуку перетворювача, що дозволяє вимірювати поле за багатьма вищими гармоніками і як наслідок, підвищити його чутливість. Обмеженням такого підходу є те, що перетворювач володіє чутливістю лише до однієї компоненти вимірюваного поля.

7. Широкопasmтова реєстрація сигналу відгуку ферозонда на основі перемагнічування полем, що здійснює поворотні коливання у площині дискового осердя дозволяє підвищити чутливість ферозонда при збереженні практично сталого відношення сигнал/шум за потужністю. Запропонований спосіб полягає у виділенні парногармонічної складової сигналу відгуку в паралельній конфігурації і непарногармонічної в ортогональній.

8. Гармонічний склад сигналу відгуку перетворювача на основі перемагнічування полем, що здійснює поворотні коливання в площині анізотропного дискового осердя залежить від параметрів анізотропії останнього. Визначення залежності феромодуляційного відгуку від орієнтації осі коливань поля збудження у площині магнітної плівки може бути використано для визначення параметрів її магнітної анізотропії.

9. Проведено експериментальні дослідження та перевірено адекватність побудованих моделей та запропонованих підходів до конструювання та оптимізації ферозондового перетворювача магнітного поля. Підтверджено, що модель чутливості ферозонда на основі перемагнічування дискового осердя обертальним полем як якісно, так і кількісно описує залежність параметрів інформаційного сигналу від умов збудження.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Убізський С.Б., Павлик Л.П., Климович Є.М.* Вплив різних факторів на вимірювання магнітного поля парногармонічним перетворювачем з обертальним перемагнічуванням монокристалічної плівки ферогранату // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Електроніка. – 2006. – № 558. – С. 133–138.
2. *Убізський С.Б., Павлык Л.П., Христофору Е.* Моделирование вращательного перемагничивания монокристаллической феррогранатовой пленки в качестве сердечника преобразователя магнитного поля // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, Серия Физика. – 2006. – Т. 19(58), №1. – С. 68–75.
3. *Убізський С.Б., Павлик Л.П.* Вплив симетрії магнітної анізотропії активного середовища на можливість векторного вимірювання магнітного поля феромодуляційним перетворювачем // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” Серія Електроніка. – 2007. – № 592, – С. 173–181.
4. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* The pendulum-like fluxgate magnetic field sensor // Sensors and Actuators A. – 2008. – № 141. – P. 440–446.
5. *Павлик Л.П., Убізський С.Б., Лозинський А.Б., Савицький Г.В.* Аналіз реактивного кола збудження ферозонда з обертальним перемагнічуванням дискового осердя // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Електроніка. – 2009. – № 646. – С. 202–211.
6. *Убізський С.Б., Павлик Л.П.* Взаємозв’язок феромодуляційного ефекту з симетрією магнітної анізотропії у разі маятниковподібного перемагнічування магнітної плівки // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Електроніка. – 2010. – № 681. – С. 151–160.
7. *Убізський С.Б., Павлик Л.П., Лозинський А.Б., Савицький Г.В.* Експериментальне дослідження струмового відгуку ферозондового перетворювача зі збудженням дискового осердя магнітним полем, що обертається в його площині // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Електроніка. – 2011. – № 708. – С. 154–159.
8. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P. and Syvorotka I.I.* Ferromodulation effect usage for the magnetic film anisotropy investigation // Solid State Phenomena. – 2012. – Vol. 190. – P. 234–237.
9. Пат. 92384, МКИ G 01 R 33/00. Магніточутливий зонд: Пат. 92384 Україна: Пат. 92384, МКИ G 01 R 33/00 С.Б. Убізський, Е. Хрістофору, Л.П. Павлик (Україна); Заявл. 28.10.2008; Опубл. 25.10. 2010, – 9с.
10. *Ubizskii S.B., Hristoforou E., Pavlyk L.P., Petridis C.* Modelling of rotational magnetization of single crystalline iron garnet layers as magnetic field sensor core //

- Joint European Magnetic Symposia JEMS'06. – San Sebastian (Spain), 2006. – P.123.
11. *Petridis C., Dimitropoulos P.D., Pavlyk L.P., Ubizskii S.B., Hristoforou E.* A miniature 3D hybrid fluxgate-like magnetic-field sensor based on YIG films // 6th European Magnetic Sensors & Actuators Conference EMSA'06. – Bilbao (Spain), 2006. – P. 79.
 12. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Pendulum-like Fluxgate Magnetic Field Sensor // International Conference Functional Materials ICFM 2007. – Partenit (Ukraine), 2007. – P. 163
 13. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Wide band registration of the fluxgate inductive response signal // III International conference “Electronics and applied physics”. – Kyiv (Ukraine), 2007. – P. 42 – 43
 14. *Павлик Л.П., Убізський С.Б.* Метод дослідження анізотропних властивостей магнітно упорядкованих структур // Міжрегіональний науковий семінар “Сучасні проблеми електроніки”. – Львів (Україна), 2008. – С. 63.
 15. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* The fluxgate transducer wide-band response detection using correlation processing // IXth International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science TCSET 2008. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2008. – P. 33.
 16. *Убізський С.Б., Павлик Л.П., Андрєєв Д.В.* Чутливий елемент маятникоподібного ферозонду на основі (111) – орієнтованої епітаксійної плівки YIG // 3-тя міжнародна науково-технічна конференція СЕМСТ-3. – Одеса (Україна), 2008. – С. 332.
 17. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Pendulum-like fluxgate magnetic field sensor in orthogonal configuration // 7th European Magnetic Sensors & Actuators Conference EMSA'08. Caen (France), 2008. – P. 134.
 18. *Ubizskii S., Pavlyk L.* The (111) oriented YIG film as a core of a pendulum like fluxgate magnetic field sensor // Joint European Magnetic Symposia JEMS 08. – Dublin (Ireland), 2008. – P. MS 003.
 19. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Pendulum like magnetization reversal of anisotropic magnetic film // International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering OMEE-2009. – Lviv (Ukraine), 2009. – P. 163.
 20. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Anisotropic rotation magnetization reversal of thin film // International Conference Functional Materials ICFM – 2009. – Partenit (Ukraine), 2009. – P. 449.
 21. *Pavlyk L.P., Ubizskii S.B.* Rotation magnetization reversal fluxgate excited by the voltage source // Xth International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science TCSET'2010. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2010. – P. 333.
 22. *Ubizskii S., Pavlyk L.* The sensitivity model of the fluxgate sensor with rotational magnetization reversal of the core // 8-th European Magnetic Sensors and Actuators Conference EMSA 2010. – Bodrum (Turkey), 2010. – P. 27.
 23. *Pavlyk L., Ubizskii S.* Peculiarities of magneto-modulation effect under rotational magnetization // Joint European Magnetic Symposia JEMS 2010. – Krakow (Poland), 2010. – P.172.

24. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Sensitivity model of the fluxgate with rotational excitation of the disc core // 15th International scientific-technical conference Electromagnetic and acoustic methods of nondestructive control of materials and products LEOTEST – 2010. – Slavske (Ukraine), 2010. – P. 28–29.
25. *Pavlyk L., Ubizskii S.* The reactive excitation circuit analysis of the fluxgate with rotational magnetization reversal of the disc core // Fourth International Conference on Sensing Technology. – Lecce (Italy), 2010. – P. 70–74.
26. *Убізський С.Б., Павлик Л.П., Сиворотка І.І., Кушка Р.І., Королюк О.В.* Феромодуляційний відгук (111)-орієнтованої монокристалічної плівки ферогранату при гармонічному маятнікоподібному перемагнічуванні // 16-та Міжнародна науково-технічна конференція “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів” ЛЕОТЕСТ – 2011. – Славське (Україна), 2011. – С. 146–149.
27. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P., Syvorotka I.I.* Ferromodulation effect usage for the magnetic film anisotropy investigation // Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2011. – Moscow (Russia), 2011. – P. 420.
28. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P., Syvorotka I.I.* New approach to the magnetic anisotropy characterization of soft films and structures // 20-th International conference on Soft Magnetic Materials SMM 2011. – Kos Island (Greece), 2011. – P. 494.
29. *Pavlyk L.P., Ubizskii S.B., Lozynskyy A.B., Savytskyu G.V., Syvorotka I.I.* Experimental investigation of the current response of the fluxgate with the disc core excited by the in-plane rotating magnetic field // 20-th International conference on Soft Magnetic Materials SMM 2011. – Kos Island (Greece), 2011. – P. 134.
30. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P., Syvorotka I.I.* Experimental investigation of magnetic anisotropy of thin magnetic films // International Conference “Functional Materials” ICFM-2011. – Partenit (Ukraine), 2011. – P. 130.
31. *Pavlyk L.P., Ubizskii S.B., Lozynskyy A.B., Savytskyu G.V.* Fluxgate magnetometer with rotation magnetization reversal excitation of the disc magnetic core // XIth International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science TCSET’2012. – Lviv-Slavske (Ukraine), 2012. – P. 482–483.
32. *Ubizskii S.B., Pavlyk L.P.* Application of ferro-modulation effect for magnetic field sensing and materials characterization // International Conference “Actual problems of modern physics 2012”. – Sevastopol (Ukraine), 2012. – P. 95–96.

АНОТАЦІЯ

Павлик Л.П. Використання оборотного перемагнічування у перетворювачах магнітного поля ферозондового типу. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. Національний університет „Львівська політехніка”. Львів, 2015.

Дисертацію присвячено вивченню використання оборотного перемагнічування магнітом’яких плівок як осердя перетворювача магнітного поля ферозондового типу на основі збудження магнітним полем, що обертається або здійснює поворотні коливання в площині осердя.

Розроблено метод контролю форми поля збудження в перетворювачі на основі перемагнічування обертальним полем. Встановлено, що чутливість до компоненти вимірюваного магнітного поля, перпендикулярної до площини обертання поля

збудження, поява паразитної складової сигналу відгуку, пов'язаної з відхиленням площини обертання поля збудження від площини дискового осердя та відхилення її кристаллографічної орієнтації, мають однакову природу і виникають лише за умови, що симетрія осей легкого намагнічування осердя відповідає симетрії S_n – дзеркально-поворотна вісь n -ного порядку. Встановлено оптимальні умови для збудження та реєстрації сигналу нелінійного індукційного відгуку ферозондового перетворювача на основі оборотного перемагнічування. Встановлено умови використання двохелементного перетворювача зі збудженням чутливих елементів магнітними полями, що обертаються, для покращення умов виділення інформаційних гармонік та для побудови градієнтометра магнітного поля. Розроблено перетворювач, який живиться від джерела гармонічної напруги. В резонансному режимі збудження залежність його чутливості від частоти поля збудження зростає квадратично. Розроблено перетворювач зі збудженням полем, що здійснює поворотні коливання в площині осердя. Його сигнал відгуку ширококутовий і це може бути використано для підвищення чутливості перетворювача, якщо застосовувати ширококутову реєстрацію. Також такий метод збудження дозволяє вимірювати параметри магнітної анізотропії осердя.

Ключові слова: ферозонд, перетворювач магнітного поля, магнітна анізотропія, магнітом'яка плівка.

АНОТАЦІЯ

Павлык Л.П. Использование обратимого перемагничивания в преобразователях магнитного поля феррозондового типа. На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. Национальный университет „Львовская политехника”. Львов, 2015.

Диссертация посвящена исследованию использования обратимого перемагничивания магнитомягких пленок в качестве сердечника преобразователя магнитного поля феррозондового типа на основании перемагничивания сердечника магнитным полем, вращающимся в плоскости сердечника.

Разработано метод контроля формы поля возбуждения в преобразователе на основании перемагничивания вращающимся полем. Установлено, что чувствительность к компоненте измеряемого поля, перпендикулярной к плоскости вращения поля возбуждения, появление в сигнале отклика паразитной составляющей как следствие отклонения плоскости вращения поля возбуждения от плоскости дискового сердечника а также отклонение его кристаллографической ориентации имеют одну природу и возникают только при условии, что симметрия осей легкого намагничивания соответствует симметрии S_n – зеркально-поворотная ось n -ного порядка. Установлены оптимальные условия для возбуждения и регистрации сигнала нелинейного индукционного отклика феррозондового преобразователя на основании вращательного перемагничивания. Установлены условия для использования двухэлементного преобразователя с возбуждением чувствительных элементов вращающимися магнитными полями для улучшения условий выделения информационных гармоник и для построения градиентометра магнитного поля. Разработано преобразователь с питанием от источника гармонического напряжения. В резонансном режиме возбуждения его

чувствительность в зависимости от частоты поля возбуждения растет квадратически. Разработано преобразователь на основании возбуждения полем, выполняющим вращательные колебания в плоскости сердечника. Его сигнал отклика широкополосный и это может быть использовано для улучшения чувствительности прибора при условии использования широкополосной регистрации. Также такой метод возбуждения позволяет измерять параметры магнитной анизотропии сердечника.

Ключевые слова: феррозонд, преобразователь магнитного поля, магнитная анизотропия, магнитомягкая пленка.

ABSTRACT

Pavlyk L.P. Reversible magnetization reversal usage in the fluxgate-type magnetic field transducers. Manuscript.

Thesis for a candidate's degree of technical sciences in speciality 05.27.01 – solid state electronics. – Lviv Polytechnic National University. Lviv 2015.

The thesis is devoted to investigation of the usage of coherent magnetization reversal of the soft magnetic films as a core of the fluxgate-type magnetic field transducer based on magnetization reversal of the core by the field rotating in the core's plane.

The method of controlling the shape of the excitation field of the transducer with magnetization reversal by the rotating filed was developed. Influence of the factors of deviation of the excitation field parameters from the ideal ones affecting the measured signal was estimated: when the amplitudes of the excitation fields provided by the excitation coils differ one from the other by ΔH (elliptical motion of the excitation field vector) and when the plane of rotation of the excitation field deviates from the plane of the core. It was shown that in case of elliptical motion of the excitation field vector some additional components appear in the response signal of the transducer related to this factor. One of them which is directly proportional to ΔH and inversely proportional to the amplitude of the excitation field and appears in the third harmonic of the sensor's response can be used to adjust the amplitudes of the excitation fields. Another one is the part of the second harmonic of the sensor response. It is proportional to the product of ΔH and the value of the measured signal and inversely proportional to the squared amplitude of the excitation field. That's why it gives a negligible contribution to the measured signal. When the plane of rotation of the excitation magnetic field deviates from the plane of the core the component that modulates the second harmonic phase appears in the response signal. This component is directly proportional to the product of the tangent of the deviation field angle and the vertical component of the measured field and is inversely proportional to the amplitude of the excitation field. That's why it also gives insignificant contribution to the measured signal. It was discovered also that sensitivity of such a sensor to the magnetic field component orthogonal to the surface of the rotating excitation field, appearance of the spurious component in the response signal due to declination of the surface of the excitation field rotation from the surface of the core and it's crystallographic orientation deviation are of the same nature. They appear only on the condition when the symmetry of the axis of easy magnetization of the core corresponds to the symmetry S_n – rotation-reflection axes of the n 's order. Optimal conditions for excitation and registration of the coherent magnetization reversal based

fluxgate nonlinear response signal were determined. It was shown that the filling factor of the sensing coil and the saturation magnetization of the material of the core should be as large as possible and the saturation field of the core should be as small as possible. In order to improve the conditions of the informative harmonics extraction as well as for the magnetic field gradiometer construction there were determined conditions of the two-element rotation magnetization reversal transducer usage. The possibility of usage of two such elements situated at a fixed distance one from the other to measure the magnetic field components or its gradient depends on the mutual phase of the excitation fields in the coils of transducer, mutual connection of the sensing coils of transducer and the mutual orientation of the sensing elements.

Voltage powered mode of magnetic field transducer based on magnetization reversal of the soft magnetic core by rotating magnetic field was investigated. It is shown that when the excitation frequency is twice less than the circuit resonance frequency the fluxgate sensitivity depends on the excitation field frequency quadratically and can exceed the current driven fluxgate sensitivity. At a simultaneous increase of the circuit resonance frequency and the excitation frequency keeping constant their ratio we receive an improved possibility to extract the second harmonics component on the background of the first one. In addition the sensing coil is not needed anymore that simplifies the fluxgate design. The developed model permits to estimate the fluxgate sensitivity and to optimize its design parameters. Taking into account the sensitivity advantages of such a fluxgate at the excitation frequency increase the ferroelectric materials like the epitaxial iron-garnet films as an active media of such fluxgates should be considered.

Transducer based on magnetization reversal of the core by the field performing rotational vibrations in the plane of the core was developed. It has wideband response signal – the effect can be used to improve the sensitivity of the sensor when using the wideband registration method. It was shown also that the ferromodulation effect manifestation in the response signal of such a sensor is connected with magnetic anisotropy of the core when the magnetically anisotropic material is used as sensor core. Experimentally measured angular dependencies of the ferromodulation effect amplitude and their behaviour with a bias field change corresponds well with the model of coherent rotation of the magnetization vector in the uniformly magnetized sample. Ferromodulation response registration can be used for magnetic anisotropy parameters determination and to determine the crystallographic axis directions in the plane of the single crystalline film.

Keywords: fluxgate, magnetic field transducer, magnetic anisotropy, soft magnetic film.