

УДК 621.317

DOI: <http://doi.org/10.20535/2219-3804222020213280>Ю. В. Бобков¹, доцент, к.т.н.

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУЖЕНОСТІ (ІНДУКЦІЇ) ЗМІННИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

En

The current state of technology is characterized by the wide use of electricity, the application of various electrical, electronic and radio devices. This resulted in the expansion of magnetic measurements and the need to develop new highly sensitive measuring equipment for a wide range of frequencies. One of the main elements, that largely determines the accuracy, frequency and dynamic ranges, is the primary measuring sensor of strength (induction) of alternating magnetic fields.

Many works have been devoted to the analysis and development of various sensors of strength (induction) of magnetic fields. At the same time, it can be noted the lack of a systematic approach to the measurement of alternating magnetic fields. The problem of the general classification of measurement methods of alternating magnetic fields and, accordingly, primary measuring sensors of strength (induction) of alternating magnetic fields is not solved. In most cases, separate issues of measuring alternating magnetic fields and certain types of sensors are considered. That does not allow obtaining a holistic picture in this area and make the right choice of direction for solving assigned tasks.

The comprehensive analysis of methods of measuring alternating magnetic fields was carried out in this work. Based on it, the classification of primary measuring sensors of strength (induction) of alternating magnetic fields on the physical principles of transformation was proposed.

Accordingly, the available measuring sensors of alternating magnetic fields following to the group of used physical phenomena can be divided into: magnetomechanical, induction, galvanomagnetic, quantum, magneto-optical and photomagnetic. Depending on the characteristics of each of these phenomena, separate measurement methods and types of measuring sensors were highlighted.

The current state of the development of each of the types of measuring sensors of strength of alternating magnetic fields was analyzed, their advantages and disadvantages were determined, and the limits of dynamic and frequency ranges, the maximum values of errors were outlined.

The obtained results allow to significantly simplify and reduce the time of choosing the necessary method of strength (induction) of alternating magnetic fields measuring and to choose the necessary type of measuring sensor to effectively solve the tasks.

Ru

В данной работе на основе всестороннего анализа методов измерения переменных магнитных полей предложена классификация первичных измерительных преобразователей напряженности (индукции) переменных магнитных полей, в основу которой положены физические принципы преобразования. Это позволило выделить наиболее существенные признаки каждого из

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

типов измерительных преобразователей.

Был проведен анализ современного уровня развития каждого из типов измерительных преобразователей напряженности переменных магнитных полей, определены их преимущества и недостатки, определены границы динамических и частотных диапазонов, максимальные значения погрешностей.

Полученные результаты позволяют существенно упростить и сократить время при выборе необходимого метода измерения напряженности (индукции) переменных магнитных полей и, соответственно, необходимого типа измерительного преобразователя для эффективного решения поставленных задач.

Вступ

Сучасний стан розвитку техніки характеризується масовим використанням електричної енергії, застосуванням різноманітних електричних, електронних і радіотехнічних пристроїв. Це легко пояснює широке поширення і використання різних електромагнітних явищ та неослабний інтерес до питань вимірювань магнітних полів. Спостерігається проникнення магнітних вимірювань у нові, раніше далекі від них галузі. Наприклад, за останні роки широке розгалуження набули різноманітні телекомунікаційні технології, що засновані на передачі інформації за рахунок електромагнітних хвиль у широкому діапазоні частот. Це обумовило загострення із однієї сторони, проблем електромагнітної сумісності електронної та електричної апаратури, а з іншої – необхідності проведення досліджень по вивченню впливу електромагнітних полів на різні біологічні об'єкти і, у першу чергу, на організм людини. Традиційними застосуваннями можна вважати різноманітні питання магніторозвідки, що на сучасному етапі перемістились у космос та стали одним із напрямків дистанційного зондування Землі. Не менш важливими є магнітні вимірювання в інших галузях промисловості.

Постановка задачі

Розширення сфери магнітних вимірювань обумовлює нагальну потребу розробки нової високочутливої вимірювальної апаратури для широкого діапазону частот. Тому, одним із її основних елементів, що у значній мірі визначає точність, частотний і динамічний діапазони, є первинні вимірювальні перетворювачі напруженості (індукції) магнітних полів. У залежності від специфіки конкретної вирішуваної задачі до первинного вимірювального перетворювача можуть пред'являтися різні вимоги, наприклад: висока чутливість; відсутність власного електромагнітного поля, що спотворює слабке вимірюване поле; малі габарити і матеріалоємність для забезпечення можливості вимірювання у малих об'ємах із мінімальними спотвореннями вимірюваного поля; мінімум додаткової похибки через виміри поблизу достатньо великих металевих немагнітних і феромагнітних

мас; лінійність амплітудно-фазової характеристики (АФХ); сталість АФХ в заданому частотному діапазоні; стабільність параметрів перетворювача; малі власні шуми тощо. Правильний вибір вимірювального перетворювача є запорукою високих метрологічних та експлуатаційних характеристик розробленої вимірювальної апаратури.

Питанням аналізу та розробки різноманітних перетворювачів напруженості (індукції) магнітних полів присвячено дуже багато робіт [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. У той же час можна відзначити відсутність системного аналізу проблеми магнітних вимірювань. Не вирішеною є проблема загальної класифікації методів вимірювання змінних магнітних полів і, відповідно, первинних вимірювальних перетворювачів напруженості (індукції) магнітних полів. У більшості випадків розглядаються окремі питання вимірювань змінних магнітних полів та окремі типи перетворювачів, що не дозволяє отримати цілісну картину в цій галузі та зробити правильний вибір напрямку вирішення поставленої задачі.

Дана робота присвячена систематизації питань вимірювання змінних магнітних полів, класифікації та аналізу первинних вимірювальних перетворювачів напруженості (індукції) змінних магнітних полів.

Далі, для спрощення викладу, будемо говорити про вимірювальні перетворювачі напруженості змінних магнітних полів, з огляду на те, що для вимірювання індукції потрібне лише відповідне градування тих же самих перетворювачів (відповідно із фізичним зв'язком напруженості та індукції).

Основна частина

Для вимірювання напруженості змінних магнітних полів у наш час використовуються різноманітні перетворювачі. За основу їх класифікації можуть бути покладені різні принципи [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. На думку автора найбільш прийнятною для даних вимірювальних перетворювачів слід вважати класифікацію за фізичними принципами перетворення. Відповідно до цього наявні вимірювальні перетворювачі напруженості змінних магнітних полів по групі використовуваних фізичних явищ можна розділити на: магнітомеханічні, індукційні, гальваномагнітні, квантові, магнітооптичні і фотомагнітні (рис. 1). У свою чергу, гальваномагнітні перетворювачі поділяються на перетворювачі Холла і магніторезистивні перетворювачі; квантові – на перетворювачі на основі ефекту Джозефсона (або надпровідні квантові інтерферометри) і перетворювачі із використанням електронного спінового резонансу; магнітооптичні – на перетворювачі на основі ефектів Фарадея, Зеємана і Керра. Індукційні перетворювачі, що базуються на використанні закону електромагнітної індукції Фарадея, можуть будуватися без використання додаткової енергії – пасивні індукційні перетворювачі, або із введенням додаткової енергії – активні індукційні

перетворювачі. Додаткова енергія призначена для зміни одного із параметрів активного індукційного перетворювача, наприклад, магнітної проникності осердя у ферозондах. Магніторезистивні перетворювачі у залежності від причини, що викликає зміну опору у змінному магнітному полі, можна розділити на перетворювачі на основі ефекту Гауса (магнітоопору), перетворювачі на основі ефекту феромагнітоопору, гальваномагніторекombінаційні перетворювачі, магнітодіоди і магніотранзистори (рис. 1).

Питання про вибір типу перетворювача індукції змінних магнітних полів для конкретної задачі може бути вирішено лише на основі всебічного аналізу особливостей їх роботи. Розглянемо основні характеристики, позитивні якості і недоліки існуючих перетворювачів.

Магнітомеханічні перетворювачі мають досить значну інерційність, оскільки їхній частотний діапазон обмежений частотою механічного резонансу і, у більшості випадків, не перевищує декількох герц [1, 2, 3]. Нижня границя вимірювань за допомогою мініатюрних рамок, що утворюють механічний момент під дією сили Лоренца, становить 0,01 А/м [11]. На показання магнітомеханічних перетворювачів істотно впливають феромагнітні маси. Їх використання у магнітовимірювальній апаратурі обмежується випадками контролю повільних магнітних процесів, наприклад, варіації магнітного поля Землі.

Одними із найбільш поширених у разі вимірювання напруженості змінних магнітних полів є пасивні індукційні перетворювачі, що у загальному вигляді є котушкою або рамкою із певним числом витків із осердям із високо проникного матеріалу або без нього. Пасивні індукційні перетворювачі використовуються у дуже широкому частотному (від одиниць герц до сотень мегагерц) і динамічному (від 10^{-7} до 10^8 А/м) діапазоні змінних магнітних полів [4, 5, 6, 7, 10, 12]. Основними перевагами цих перетворювачів є: простота конструкції і виготовлення; надійність; велика переважувальна здатність; мала залежність показань від параметрів навколишнього середовища, зокрема температури; малий рівень власних шумів, який визначається тільки шумами Найквіста; відсутність власних джерел завад. Проте сигнал на виході пасивного індукційного перетворювача пропорційний першій похідній напруженості вимірюваного магнітного поля і залежить від частоти зміни поля, що призводить до необхідності застосування інтегруючих кіл або інших способів для усунення частотної залежності. Зниження чутливості на низьких частотах вимагає застосування спеціальних заходів для її підвищення. Впровадження за цією метою осердь із високо проникних матеріалів призводить до нелінійності амплітудної характеристики перетворювача, залежності чутливості і вихідного опору від впливу постійних магнітних полів, та може спотворити картину вимірюваного поля. Частотний діапазон кожного конкретного перетворювача обмежений.

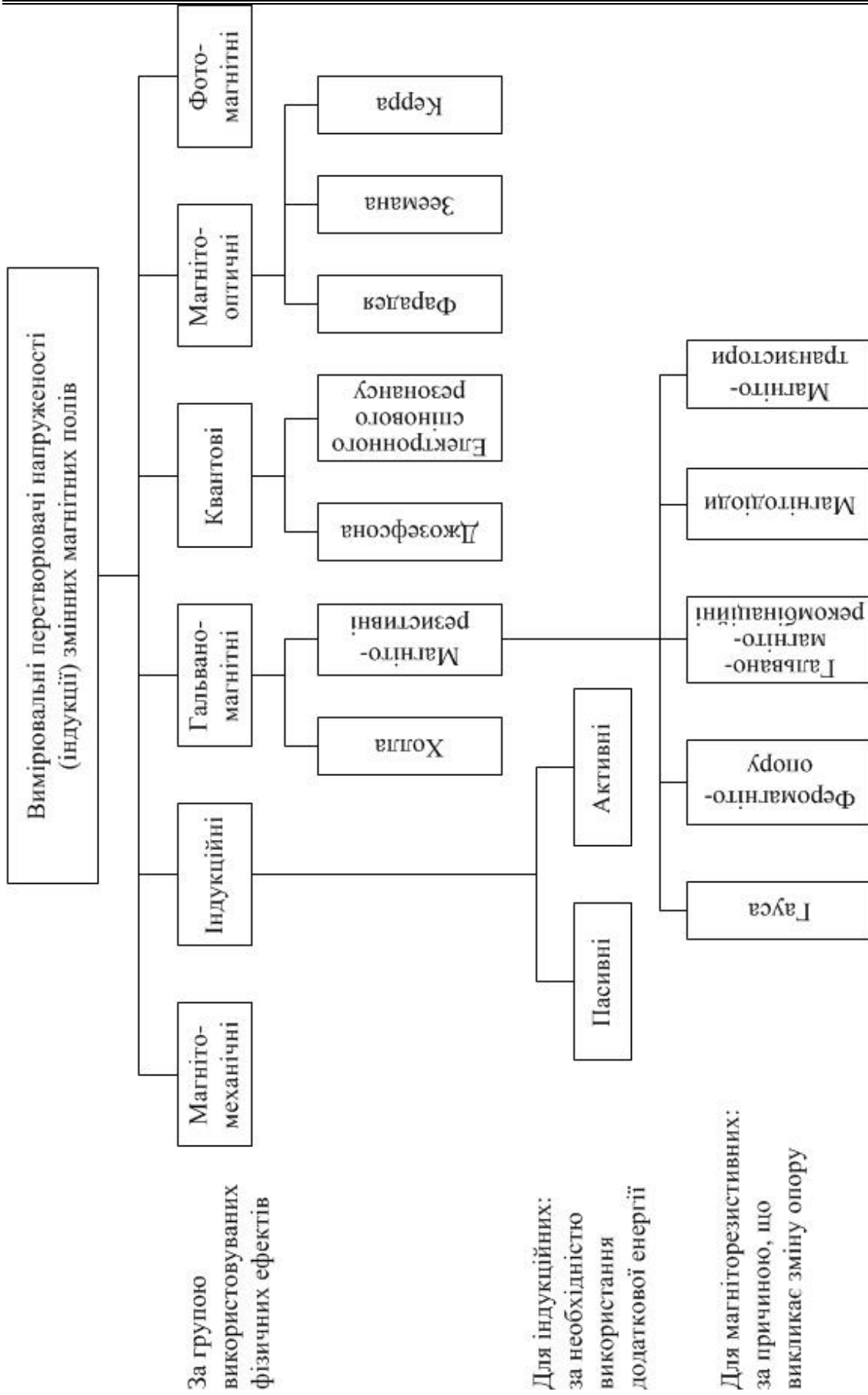


Рис. 1. Класифікація вимірювальних перетворювачів напруженості (індукції) змінних магнітних полів

Похибка індукційних перетворювачів становить 3 – 5 % [4, 5, 8]. Зазначені недоліки обмежили застосування даних перетворювачів у промисловій апаратурі.

Активні індукційні перетворювачі характеризуються введенням додаткової енергії з метою зміни одного із їх параметрів, у результаті чого відбувається посилення і модуляція індукованого досліджуваним полем сигналу. Найбільш характерними і поширеними активними індукційними перетворювачами є магнітотульові перетворювачі або ферозонди. Вони дозволяють вимірювати напруженість досліджуваного поля, а не її похідну, і мають постійну високу чутливість, у тому числі у області низьких частот. Динамічний діапазон вимірюваних ферозондами змінних магнітних полів лежить в межах $5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^4$ А/м, частотний – від 10^{-2} до 10000 Гц [2, 4, 9, 12].

Перевагами цих перетворювачів є велика завадостійкість, досить висока надійність, малі фазові спотворення, невеликі габарити і вага. Однак наявність високо проникних осердь і необхідність використання додаткового модулюючого поля зумовили ряд обмежень для застосування у вимірювальній апаратурі. У якості недоліків ферозондів можна відзначити наступні: вузький частотний діапазон вимірювань; залежність вихідного сигналу від постійних підмагнічуючих полів; залежність проникності осердь від температури, що призводить до нестабільності коефіцієнта перетворення; порівняльна складність вимірювального пристрою; спотворення вимірюваного поля модулюючим полем; досить велика похибка вимірювання (близько 5 %); великі похибки вимірювання напруженості поля із викривленою формою кривої; значна похибка вимірювання поля поблизу феромагнітних мас, викликана спотворенням модулюючого поля.

Широке поширення у промисловій апаратурі отримали перетворювачі на основі ефекту Холла. Теоретично перетворювачі Холла можуть використовуватися для вимірювання змінних магнітних полів з частотою від нуля до сотень мегагерц (навіть 10 ГГц [11]). Однак виникнення співмірною за корисним сигналом е.р.с. електромагнітного наведення на виводах перетворювача, скін-ефект (у разі живлення змінним синусоїдальним струмом), а також виникнення струмів Фуко у пластині перетворювача обмежують частотний діапазон. У найкращих зразках він знаходиться у межах від 0 до 200 кГц [4, 5, 6, 10, 13]. Динамічний діапазон вимірювання змінних магнітних полів за допомогою перетворювачів Холла знаходиться у межах від 10^{-2} до 10^8 А/м [4, 7, 8]. Застосування концентраторів із матеріалів із високою магнітною проникністю дозволяє знизити поріг чутливості до 10^{-3} А/м, однак частотна похибка тому зростає [4, 6, 10, 13]. Найбільш сильно ефект Холла проявляється у напівпровідникових матеріалах, використання яких призводить до появи додаткових шумів: дробового і надлишкового. У якості інших недоліків перетворювачів Холла слід відзначити необхідність у спеціальному джерелі струму живлення, низьку чутливість,

залежність показань від температури навколишнього середовища, наявність напруги нееквівіпотенціальності, невисоку точність (похибка 1 – 5 % [3, 4, 8]), малу механічну міцність. Крім того, використання досить великого струму живлення призводить до спотворень малих вимірюваних полів і виникнення додаткової похибки при вимірюванні поблизу феромагнітних мас. Основною перевагою перетворювача Холла є його малі розміри, що дозволяють вимірювати магнітні поля в вузьких зазорах і малих об'ємах.

Магніторезистивні перетворювачі на основі ефекту Гауса характеризуються квадратичною функцією перетворення, що обумовлює різке зниження чутливості у слабких змінних магнітних полях. Застосування допоміжного підмагнічуючого поля для виведення робочої точки перетворювача на лінійну ділянку характеристики дозволяє підвищити чутливість. Однак у такому випадку істотно спотворюється картина вимірюваного поля, що неприпустимо для слабких змінних полів. Тому перетворювачі на основі ефекту Гауса використовуються для вимірювання магнітних полів на рівні $(1,6 - 4) \cdot 10^5$ А/м [5, 8]. Вимірювання полів нижче 80 А/м обмежене шумами опору [4]. Частотний діапазон обмежується індукційними наведеннями і вихровими струмами, і, зазвичай, не перевищує 20 кГц [5, 8]. Недоліком є також істотна залежність результатів вимірювань від температури навколишнього середовища, досить велика похибка (2,5 – 5 %) [4, 8].

Магніторезистивні перетворювачі на основі ефекту ферромагнітоопору (зміни опору тонкої феромагнітної плівки) характеризуються дуже високою швидкістю, що дозволяє використовувати їх для вимірювання магнітних полів частотою 0 – 100 МГц і напруженістю від 10^{-5} до 10^5 А/м [5, 7, 8, 11]. Однак необхідність створення додаткового поля зсуву, що спотворює розподіл вимірюваного поля; складність апаратною реалізації, властива НВЧ техніці і обумовлена високою частотою (близько 300 МГц); а також значна похибка (близько 5 % [8]) обмежили застосування цих перетворювачів у вимірювальній техніці.

Гальваномагніторекombінаційні (ГМР) перетворювачі також відносяться до магніторезистивних перетворювачів. Струм їх живлення на два порядки менший струму живлення перетворювачів Холла і, відповідно, вони менше спотворюють вимірюване поле, а чутливість на 2 – 3 порядки вища, ніж у перетворювачів Холла. Поріг чутливості ГМР перетворювачів становить 10^{-1} А/м [9]. Теоретично вони можуть використовуватися для вимірювання магнітних полів з частотою 0 – 10^{14} Гц [9]. Практично ж частота, за якої ще встановлюється стаціонарне значення ГМР ефекту, дорівнює 50 кГц [8]. Істотними недоліками ГМР перетворювачів є залежність опору від температури, а також наявність додаткових шумів, властивих напівпровідниковим матеріалам.

Останнім часом все більшого поширення набувають магнітодіоди і магніотранзистори. Промисловість випускає три типи магнітодіодов:

КД 301, КД 303 і КД 304, що мають чутливість $(1 - 6) \cdot 10^{-5}$ В/(А/м), яка на два порядки вище чутливості перетворювачів Холла. Гранична робоча частота у КД 301 близько 1 кГц, а у КД 303 і КД 304 – близько 5 – 10 кГц [14, 15, 16, 17]. За допомогою схемотехнічних рішень (наприклад, мостових схем) чутливість магнітодіодов може бути доведена до 0,01 А/м [11]. Біполярні магнітотранзистори мають чутливість близько $4 \cdot 10^{-4}$ В/(А/м), що на порядок більше чутливості магнітодіодов і на три порядки – перетворювачів Холла [14, 15, 16, 17]. Поріг їх чутливості обмежує високий рівень шумів. Крім того, біполярні магнітотранзистори вимагають високої напруги живлення (близько 200 В), що ускладнює їх використання. Польові магнітотранзистори мають чутливість на два порядки нижче чутливості біполярних магнітотранзисторів. У той же час вони мають і значно менший рівень власних шумів, що дозволяє використовувати їх для вимірювання змінних магнітних полів напруженістю $10^{-1} - 10^5$ А/м [13, 14, 15]. Магнітодіодам і магнітотранзисторам властиві істотні недоліки, що обмежують їх застосування: нелінійність характеристики, залежність результатів вимірювання від температури, великий розкид характеристик, труднощі орієнтації у магнітному полі, досить високий рівень власних шумів, властивий напівпровідниковим елементам, і великий рівень власного поля, що знижує поріг чутливості.

Найбільш чутливими на даний час є перетворювачі на основі ефекту Джозефсона (надпровідні квантові інтерферометри), що дозволяють вимірювати магнітні поля напруженістю від 10^{-8} до 10^8 А/м в частотному діапазоні до 2 кГц [1, 7, 8]. Однак складність і громіздкість перетворювача і всієї апаратури, необхідність застосування криогенної техніки, досить вузький частотний діапазон ускладнюють широке поширення перетворювачів на основі ефекту Джозефсона.

Досить високу чутливість мають перетворювачі на основі електронного спінового резонансу, за допомогою яких можна вимірювати змінні магнітні поля напруженістю $10^{-5} - 10^6$ А/м на частотах до 1 – 3 кГц [1, 8]. Головною перевагою цих перетворювачів є мала похибка вимірювання (близько 0,1 %) [8]. У той же час, великі габарити перетворювача, складність НВЧ апаратури (середнє значення резонансної частоти близько 10 ГГц), особливі вимоги до вимірюваного поля (відсутність спотворення поля вихровими струмами) обмежують застосування перетворювачів на основі електронного спінового резонансу.

Наступну значну групу перетворювачів становлять магнітооптичні перетворювачі, що використовують ефекти Фарадея, Зеємана, Керра. Ефект Фарадея полягає в появі здатності обертати площину поляризації світла під впливом магнітного поля у речовин, які в природних умовах цієї здатності не мають. Перетворювачі на основі ефекту Фарадея характеризуються великою швидкістю і дозволяють вимірювати змінні магнітні

Розділ 1. Інформаційні системи

поля напруженістю $10^5 - 10^8$ А/м в діапазоні частот від 0 до 30 МГц із похибкою близько 7 % [1, 4, 8, 10]. Перевагами цих перетворювачів є відсутність механічного і гальванічного зв'язку між самим перетворювачем і іншою частиною апаратури, широкий температурний діапазон. У якості недоліків слід зазначити необхідність додаткової математичної обробки результатів вимірювання через нелінійної залежності між електричним сигналом і напруженістю поля, складність апаратури, низьку точність.

Поздовжній ефект Зеемана полягає у тому, що неполяризований промінь, пройшовши крізь деякі речовини у сильному магнітному полі, розпадається на дві складові з різною довжиною хвилі, поляризовані по колу. Вихідний сигнал магнітооптичного перетворювача на основі ефекту Зеемана подається на спектрограф для вимірювання подвійної зміни довжини хвилі поляризованого світла. Перетворювачі даного виду дозволяють вимірювати тільки сильні змінні магнітні поля порядку $(5-8) \cdot 10^8$ А/м із похибкою близько 5 % [4, 8]. Основним недоліком є складність вимірювальної апаратури, а також низька чутливість.

Екваторіальний ефект Керра полягає у зміні інтенсивності відбивання променя від феромагнітної плівки, напиленої на поверхню скляної пластини, у разі зміни намагніченості феромагнітного матеріалу у вимірюваному полі. Магнітооптичні перетворювачі на основі ефекту Керра застосовуються для вимірювання магнітних полів напруженістю $(0,8-1,6) \cdot 10^4$ А/м [4, 8]. Малі розміри перетворювача і відсутність підвідних дротів дозволяють вимірювати магнітні поля у невеликих об'ємах. Однак перетворювачі на основі ефекту Керра мають низьку чутливість, малий динамічний діапазоном внаслідок нелінійності характеристики, вимагають застосування складної апаратури.

Фотомагнітні перетворювачі, що використовують ефект виникнення фото-е.р.с. у напівпровідниковій пластині, застосовуються для вимірювання сильних змінних магнітних полів на рівні $4 \cdot 10^5$ А/м [8]. Вони характеризуються низькою чутливістю, великими розмірами перетворювача, що включає у себе потужне джерело світла і теплові екрани, складністю методики вимірювання і, внаслідок цього, поширення не отримали.

Основні технічні характеристики розглянутих вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних полів представлені у табл. 1.

Таблиця 1.

Вимірювальні перетворювачі напруженості змінних магнітних полів

Тип перетворювача	Частотний діапазон, Гц	Динамічний діапазон, А/м	Похибка, %
Магнітомеханічний	0 – 3	$> 10^{-2}$	–
Пасивний індукційний	1 – 10^9	$10^{-7} - 10^8$	3 – 5

Тип перетворювача	Частотний діапазон, Гц	Динамічний діапазон, А/м	Похибка, %
Активний індукційний (ферозонд)	$10^{-2} - 10^4$	$5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^4$	5
Холла	$0 - 2 \cdot 10^5$	$10^{-3} - 10^8$	1 - 5
Гауса (магнітоопору)	$0 - 2 \cdot 10^4$	$80 - 4 \cdot 10^5$	2,5 - 5
Феромагнітоопору	$0 - 10^8$	$10^{-5} - 10^5$	5
ГМР	$0 - 5 \cdot 10^4$	$> 10^{-1}$	—
Магнітодіоди	$0 - 10^4$	$> 10^{-2}$	—
Магнітотранзистори	—	$10^{-3} - 10^5$	—
Джозефсона	$0 - 2 \cdot 10^3$	$10^{-8} - 10^8$	—
Електронного спінового резонансу	$0 - 3 \cdot 10^3$	$10^{-5} - 10^6$	0,1
На основі ефекту Фарадея	$0 - 3 \cdot 10^7$	$10^5 - 5 \cdot 10^8$	7
На основі ефекту Зеемана	—	$(5 - 8) \cdot 10^8$	5
На основі ефекту Керра	—	$(0,8 - 1,6) \cdot 10^4$	—
Фотомагнітний	—	$\sim 4 \cdot 10^5$	—

Висновки

Відсутність системного підходу до питань вимірювання змінних магнітних полів і, у першу чергу, первинних вимірювальних перетворювачів напруженості (індукції) магнітних полів, не дозволяє отримати цілісну картину у цій галузі та зробити правильний вибір напрямку вирішення поставлених задач.

На основі всебічного аналізу методів вимірювання змінних магнітних полів запропонована класифікація первинних вимірювальних перетворювачів напруженості (індукції) змінних магнітних полів, за основу якої покладено фізичні принципи перетворення. Це дозволило виділити найбільш суттєві ознаки кожного із типів вимірювальних перетворювачів.

Було проведено аналіз сучасного стану розвитку кожного із типів вимірювальних перетворювачів напруженості змінних магнітних полів, визначено їх переваги та недоліки, окреслено межі динамічних та частотних діапазонів, максимальні значення похибок.

Отримані результати дозволяють суттєво спростити та скоротити час при виборі необхідного методу вимірювання напруженості (індукції) змінних магнітних полів і обрати необхідний тип вимірювального перетворювача для ефективного вирішення поставлених задач.

Список використаної літератури

1. *Афанасьев Ю. В.* Средства измерений параметров магнитного поля. / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
2. *Афанасьев Ю. В.* Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, А. П. Щелкин – Л.: Энергия, 1972. – 272 с.
3. *Сергеев В. Г.* Магнитоизмерительные приборы и установки. / В. Г. Сергеев, А. Я. Шихин. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 152 с.
4. *Бабенко Н. С.* Методы измерения переменных и импульсных магнитных полей (обзор) / Н. С. Бабенко // Приборы и техника эксперимента. – 1970. N 4. С. 7–16.
5. *Панчишин Ю. М.* Измерение переменных магнитных полей. / Ю. М. Панчишин, С. Т. Усатенко – Киев: Техніка, 1973. – 140 с.
6. *Панин В. В.* Измерение импульсных магнитных и электрических полей. / В. В. Панин, Б. М. Степанов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
7. *Котенко Г. И.* Гальваномагнитные преобразователи и их применение. / Г. И. Котенко – Л.: Энергоиздат, 1982. – 104 с.
8. *Гринберг И. П.* Измерители индукции переменных магнитных полей. / И. П. Гринберг, Е. А. Шуляковский – Киев: Техніка, 1982. – 168 с.
9. *Левшина Е. С.* Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
10. *Панин В. В.* Измерение импульсных магнитных и электрических полей. / В. В. Панин, Б. М. Степанов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
11. *Бердичевский Б. Е.* Измерение электромагнитных близких полей помех на печатных платах / Б. Е. Бердичевский // Приборы и элементы автоматизации. Испытательные стенды. – 1995. N 19. С. 32–39.
12. *Абрамзон Г. В.* Индукционные измерительные преобразователи переменных магнитных полей / Г. В. Абрамзон, Ю. П. Обоишев. – Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1984. – 117 с.
13. *Большакова І. А., Гладун М. Р., Голяка Р. Л. та ін.* Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля: Монографія / За редакцією З. Ю. Готри. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001. – 412 с.
14. *Викулин И. М.* Гальваномагнитные приборы. / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
15. *Егизарян Г. А.* Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. / Г. А. Егизарян, В. И. Стафеев – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
16. *Хомерики О. К.* Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. / О. К. Хомерики – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.

17. *Баринов И. Н.* Исследование магнитодиодов при воздействии широкого диапазона температур [Электронный ресурс] / И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. П. Евдокимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – №3. – С. 26–33. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/552738>.