

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ
проф. Валерій Антонович Скришевський
Протокол №__ засідання кафедри
від “__” _____ 20__р.

**ЗВ'ЯЗАНІ КОЛИВАННЯ
В ЦИЛІНДРИЧНОМУ РЕЗОНАТОРІ
ПОВЕРХНЕВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ**

Випускна кваліфікаційна робота магістра
Студента спеціальності 105
Прикладна фізика та наноматеріали
ОП «Прикладна фізика та наноматеріали
(Високі технології)»
Кулика Дмитра Максимовича

Науковий керівник
асистент кафедри
нанофізики та наноелектроніки
к.ф.-м.н. **Малишев Володимир Юрійович**

Оцінка захисту роботи

АНОТАЦІЯ

Кулик Д.М. Зв'язані коливання в циліндричному резонаторі поверхневої електромагнітної хвилі. — Випускна кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали ОП «Прикладна фізика та наноматеріали (Високі технології)».

У роботі проведено експериментальне дослідження поведінки стоячої поверхневої електромагнітної хвилі в умовах зовнішнього магнітного поля для екранованого циліндричного феромагнітного резонатора поверхневої хвилі.

Дослідження проводилося у трисантиметровому діапазоні довжин хвиль із допомогою стандартного панорамного вимірювача P2-61, методом мікрохвильової рефлектометрії. У якості резонатора виступав дріт із залізо-нікелевого сплаву.

Наведено результати експериментальних досліджень залежності резонансної частоти та коефіцієнта стоячої хвилі в резонансі від магнітної індукції зовнішнього магнітного поля, та різних відстаней до екрану. Також досліджено вплив напрямку попередньої замагніченості резонатора на ці залежності.

Експериментально спостережено зсув резонансної частоти ФРПЕХ близько 183 МГц в повздовжньому магнітному полі з індукцією $B = 18$ мТ, зміна величини коефіцієнта стоячої хвилі в резонансі в 2,3 рази, та їх залежності від ступеню екранування.

Дані ефекти можуть бути пояснені взаємодією коливань поверхневих електромагнітних хвиль зі спіновими хвилями у середовищі резонатора. Тобто виникненням магнон-плазмон-поляритонів у розглянутому феромагнітному резонаторі поверхневої хвилі.

Ключові слова: поверхневий плазмонний резонанс, резонатор поверхневої електромагнітної хвилі, сантиметровий діапазон, спінові хвилі, залізо-нікелевий сплав, надвисокі частоти, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою

ABSTRACT

Kulyk D. Coupled oscillations in the cylindrical surface electromagnetic wave resonator. — graduate master's degree qualifying work. This paper presents an experimental study of the behavior of surface standing wave resonance under the influence of an external magnetic field for a shielded cylindrical ferromagnetic surface wave resonator. The study was conducted for wire of Fe-Ni in the three-centimeter wavelength range using a standard panoramic analyzer R2-61 and the method of microwave reflectometry. The experimental results show the dependence of the resonance frequency and the standing wave ratio in resonance on the magnetic induction of the external magnetic field, for cases of different and co-directed external magnetic fields and the intrinsic field of the resonator, as well as different distances to the shield.

An experimental shift of the resonance frequency by about 183 MHz in a longitudinal magnetic field with an induction of $B = 18$ mT was observed, along with a change in the standing wave ratio magnitude in resonance by 2,3 times depending on the degree of shielding. These effects can be explained by the interaction of surface electromagnetic wave oscillations with spin waves in the resonator medium, i.e., the formation of magnon-plasmon-polaritons in the structure of real metal – shielded dielectric.

Keywords: surface plasmon resonance, surface electromagnetic wave resonator, centimeter range, spin waves, iron-nickel alloy, microwaves, standing wave ratio

Зміст

Вступ	6
Розділ 1. Огляд літератури	8
1.1. Поверхнева електромагнітна хвиля	8
ПЕХ згідно теорії Друде	8
1.2. Резонатор поверхневої електромагнітної хвилі	11
Керування ПЕХ	12
Розділ 2. Експериментальна частина	14
2.1. Постановка задачі	14
2.2. Методика дослідження	14
2.2.1. Узагальнений опис методики дослідження	14
2.2.2. Опис експериментальної установки	15
Основні вузли та їх положення в системі	15
Вимірювальна секція	18
Досліджувані ФРПЕХ	20
2.2.3. Загальний порядок роботи	20
2.2.4. Виявлення та усунення систематичних похибок	21
2.3. Результати	24
2.3.1. Розгляд отриманих залежностей	24
Циліндричний резонатор	24
Плаский резонатор	31
Залежність форми кривих від ступеню екранування	31
2.3.2. Основні отримані числові значення	32
2.3.3. Оцінка похибки	32
Висновки	34
Перелік посилань	35

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЕХ	Поверхнева електромагнітна хвиля;
РПЕХ	Резонатор поверхневої електромагнітної хвилі;
ФРПЕХ	Феромагнітний резонатор поверхневої електромагнітної хвилі;
НВЧ	Надвисока частота, надвисокочастотний;
КСХН	Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою;
АЧХ	Амплітудно частотна характеристика;
ГКЧ	ГКЧ-61, пристрій для генерації та перелаштування НВЧ-сигналу;
АРП	Автоматичне регулювання потужності;
НВ	Направлений відгалужувач.

Вступ

поверхневі електромагнітні хвилі (ПЕХ) — електромагнітні хвилі що зв'язуються з колективними осциляціями приповерхневих вільних зарядів, і виникають на стику двох середовищ із діелектричними проникностями ϵ протилежних знаків. Зазвичай, ці середовища — метал та діелектрик.

У рамках квантової механіки ПЕХ описується такою частинкою як плазмон-поляритон.

Зовнішня електромагнітна хвиля потрапляючи в такі умови "пристає" до поверхні металу, і може поширюватись в її площині. І плазмон-поляритони які поширюються саме поверхнею металів називають поверхневими.

Однією з особливостей ПЕХ є те, що вона зменшує свою довжину відносно оригінальної незв'язаної хвилі. Це дає можливість використовувати для концентрації енергії електромагнітного випромінювання у розмірах менших за її довжину.

Галузь науки та техніки, плазмоніка вичає поверхневі хвилі і знаходить велику кількість застосувань на практиці у створенні різноманітних зондів та біосенсорів.

В нормальних умовах НВЧ-хвилі не здатні підтримуватися на поверхні через занадто низьку частоту порівняно до оптичного діапазону — у електродинамічному наближенні метал поводить ся як ідеальний провідник.

Традиційним підходом для подолання цього обмеження, на сьогоднішній день, є створення на поверхні штучних структур, що змінюють її характеристики. Зазвичай це отвори різної форми та розмірів що розташовані із певною періодичністю. Утворюються метаматеріали, що створюють умови необхідні для поширення ПЕХ.

У НВЧ-діапазоні розвиток плазмоніки актуальний у зв'язку з високою придатністю ПЕХ до передачі інформації. У інтегральних мікросхемах використовуються частоти якраз у цьому діапазоні, і сьогоднішні методи передачі інформації у межах одного чіпа, між його внутрішніми вузлами вже не можуть забезпечити необхідної пропускну здатності. Можливості плазмоніки могли б дати новий поштовх для розвитку сучасної електроніки.

Також лінії передачі на основі ПЕХ, потенційно значно виграють порівняно до традиційних мікросмушкових ліній. Так у роботі [1] показано, як за допомогою моделювання, так і експериментально, що втрати інформації

в гарно продуманих лініях на основі ПЕХ можуть бути значно нижчими порівняно до мікросмужок — поля поверхневих хвиль значно щільніше розташовані у просторі, і зменшений фактор їх накладання. Факт уповільнення ПЕХ дає перспективи до створення на їх базі керуючих пристроїв: змінювати фазу, затримки сигналу та іншими способами модулювати його.

Крім цього існують альтернативні напрямки плазмоніки у мікрохвильовому діапазоні частот. Одним із них є збудження ПЕХ на поверхнях резонансних розмірів, що називаються резонаторами поверхневої електромагнітної хвилі (РПЕХ). Усталеним підходом при цьому є використання екрану НВЧ-випромінювання, який дозволяє отримати великі щільності струму у поверхні в якій існує ПЕХ. На базі цього підходу є перспективною розробка пристроїв для дослідження характеристик металевих поверхонь, зокрема діелектричної проникності у цьому частотному діапазоні [2]. Також РПЕХ можуть застосовуватися для створення пристроїв для НВЧ-ліній хвильового типу. Наприклад смугозагороджувальних фільтрів сигналу. Теорія і практика цих пристроїв започаткована науковою групою проф. Г. Мелкова. І розглядається у їх роботах [3–9]

Очевидно, що через електромагнітну взаємодію зв'язок коливань поля зовнішньої хвилі може відбуватися не лише із вільними електронами. Будь-які інші носії зарядів або магнітних моментів можуть ускладнювати та модифікувати їх рух. Актуальність дослідження способів використання магнітних матеріалів у плазмоніці добре розглянута у оглядовій статті [10].

У цій роботі експериментально досліджуються такий зв'язок і способи його посилення на прикладі циліндричного феромагнітного резонатора поверхневої хвилі у мікрохвильовому діапазоні частот.

Розділ 1. Огляд літератури

1.1. Поверхнева електромагнітна хвиля

ПЕХ згідно теорії Друде

Взаємодія поверхонь металів та електромагнітного випромінювання переважно визначається вільними електронами. Для оптичних довжин хвиль їх поведінка подібна до плазми і визначається діелектричною функцією: $\varepsilon = 1 - \omega_p^2/\omega^2$, як можна бачити вона набуває від'ємних значень при частотах нижчих за ω_p . Унаслідок цієї різниці знаків ε , метали можуть підтримувати колективні коливання електронів прив'язані до середовища металу.

Діелектрична константа для металів визначається за теорією Друде, і пов'язана із плазмовою частотою металу співвідношенням:

$$\varepsilon_M(\omega) = 1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2 - i\Gamma\omega}, \quad (1.1)$$

тут

$$\omega_P = \sqrt{\frac{ne^2}{m\varepsilon_0}} \quad (1.2)$$

де, ω_P — частота коливань об'ємної плазми, ω — кутова частота побіжної електромагнітної хвилі, Γ — швидкість розсіяння руху електронів, ε_0 — діелектрична проникність вакууму, n — щільність носіїв вільного заряду. e та m — відповідні заряд та маса електрона.

Завдяки великій кількості вільних електронів, метали мають високу плазмову частоту, у більшості з яких вона лежить між інфрачервоною та ультрафіолетовою областями електромагнітного випромінювання. Якщо частота супроводжуючої електромагнітної хвилі менша за плазмову частоту, то діелектрична функція набуває уявного вигляду, відповідно поширення хвилі крізь метал у такому випадку моментально згасає.

Проте у [11] та подальших роботах автора, підтверджується той факт, що ПЕХ можуть поширюватись також за межами зазначених вище частот: у межах від $\omega = 0$ до $\omega = \omega_P/\sqrt{2}$. При цьому ПЕХ локалізована на границі

розділу середовищ, але проникає в них на певну відстань (рис. 1.1). Енергія поля при цьому розподілена за експоненційним полем в залежності від віддалення (рис. 1.2). Ця відстань не однакова по різні сторони від поверхні, у металі вона значно менша, при цьому відповідним чином збільшується густина енергії.

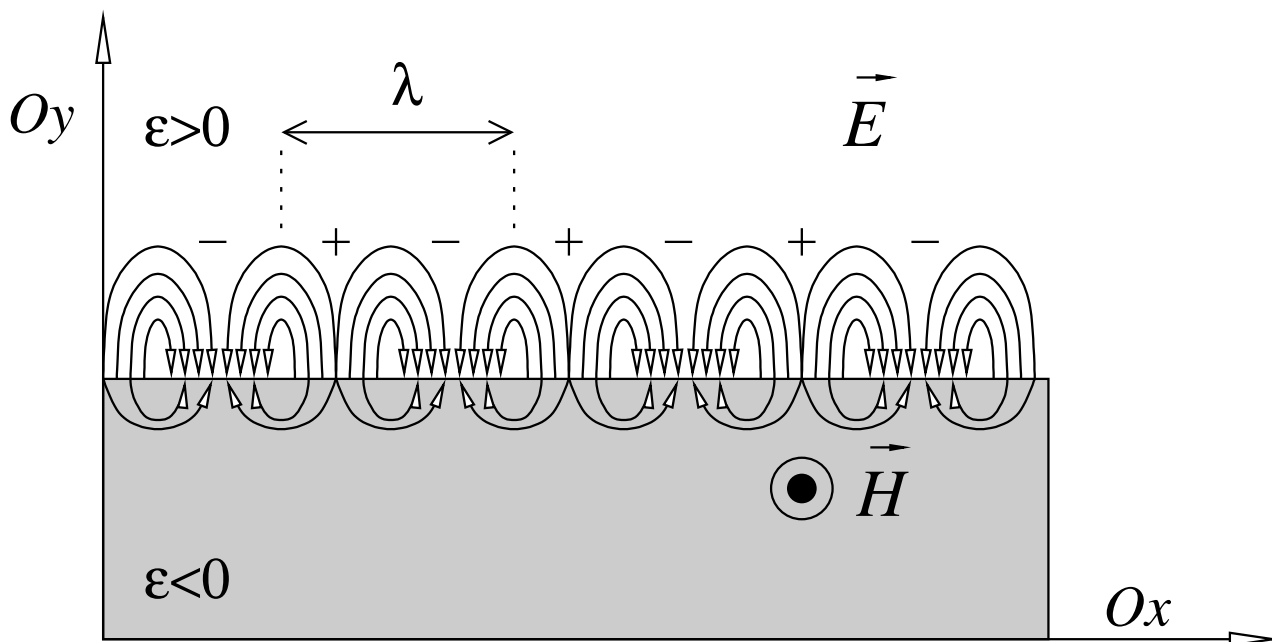


Рис. 1.1. Поверхнева хвиля на межі двох середовищ із протилежними за знаком ϵ

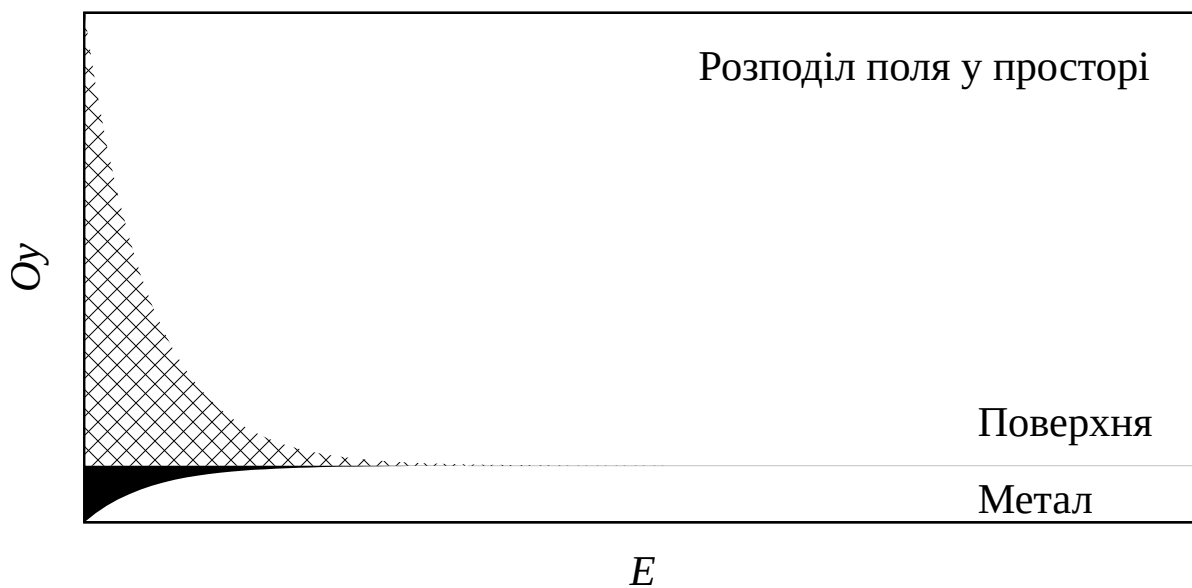


Рис. 1.2. Енергія поля ПЕХ спадає при віддаленні від межі поділу за експоненційним законом

Підставивши діелектричну константу до рівнянн Максвелла отримаємо

дисперсійне співвідношення для данного металу:

$$\omega^2 = (Kc)^2 + \omega_P, \quad (1.3)$$

де K — хвильовий вектор, а c — швидкість світла.

Якщо позначити компоненту хвильового вектора ПЕХ що рухається у поверхневій площині, то отримаємо:

$$K_x = K_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_I \varepsilon_M}{\varepsilon_I + \varepsilon_M}}, \quad (1.4)$$

Тут ε_I — комплексна діелектрична проникність оточуючого простору, а ε_M — металу. Обидві залежать від частоти хвилі. K_0 — хвильовий вектор у вакуумі, $K_0 = \omega/c$. Позначимо ε_{MR} та ε_{MI} , як дійсну та уявну частини комплексної діелектричної проникності металу:

$$\varepsilon_M = \varepsilon_{MR} + i\varepsilon_{MI} \quad (1.5)$$

Через дійсну складову ε_{MR} пов'язується ступінь поляризації ПЕХ під дією зовнішнього електричного поля, а уявна ε_{MI} пов'язана із втратами на речовині. Через ε_I оточуюча речовина інтенсивно розсіює енергію, тому відносна діелектрична проникність металу ε_{MI} відіграє ключову роль у підтриманні ПЕХ. Фактично процес що дозволяє ПЕХ існувати пов'язаний із поверхневими зарядами: за-для того щоби компенсувати поверхневі заряди, нормальна компонента поля має змінити свій знак уздовж всієї поверхні. Компонента витісняючого поля, нормальна до поверхні, має бути сталою щоби задовольнити співвідношення: $D_z = \varepsilon E_z$, де D_z , E_z — нормальні до поверхні компоненти витісняючого та компенсуючого поля відповідно. Таким чином, щоб коливання ПЕХ не згасали, ε_I та ε_M повинні бути протилежні за знаком.

Оскільки хвильовий вектор ПЕХ у вільному просторі коротший за хвильовий вектор в металі, то ПЕХ можуть бути збуджені лише якщо їх хвильові вектори співпадають. Якщо для ПЕХ $K_x \rightarrow \infty$, а $Re[\varepsilon_M] = -\varepsilon_I$, при $\varepsilon_I > 0$, то

$$\omega = \frac{\omega_P}{\sqrt{1 + \varepsilon_M}}. \quad (1.6)$$

Якщо покласти що ε є дійсною та від'ємною, то з 1.6 випливає, що умовою підтримання металом ПЕХ є $\omega < \omega_P$.

1.2. Резонатор поверхневої електромагнітної хвилі

РПЕХ докладно розглянуті у дисертаційній роботі [12]. У широкому розумінні РПЕХ може бути представлений будь-якою провідною поверхнею. РПЕХ можуть мати різну геометричну форму, загальноприйнятими варіантами є прямокутна та циліндрична форма, можуть використовуватись плівки. РПЕХ також можуть додатково вкриватись діелектричним шаром з однієї або двох сторін.

Мікрохвильові властивості такого РПЕХ залежать від його розмірів, матеріалу, фактури поверхні, наявності на ній дефектів.

Для збудження РПЕХ у міліметрових та субміліметрових діапазонах застосовуються квазіоптичні методики із використанням діелектричних призм. За більш низьких частот прибігають до хвилеводного методу збудження, в якому РПЕХ розміщується всередині прямокутного хвилеводу. Метод спирається на те, що прямокутними хвилеводами зазвичай поширюється лише один тип хвиль, і коливання відбуваються лише в одній площині, що дозволяє розмістити РПЕХ в оптимальному для збудження місці.

Зазвичай маємо хвилю TE_{10} , електричне поле якої направлене від однієї широкої стінки до іншої, і його максимум знаходиться у центрі хвилевода. Тому, для найкращого збудження резонатора, його розміщують в центрі хвилевода, орієнтуючи його відносно силових ліній так, щоб вони були направлені вздовж поверхні резонатора. ПЕХ у такому резонаторі виглядає як стояча хвиля ТМ-типу, компоненти якої рухаються вздовж поверхні і силових ліній електричного поля збуджуючої хвилі.

У залежності від того чи буде резонатор гальванічно з'єднаний із стінками хвилевода чи ізольований від нього, він може бути, відповідно, чвертьхвильовим або півхвильовим.

Необхідність ізоляції або замикання резонатора на стінку хвилевода, обумовлює відмінності у способах їх збудження.

Для збудження (прямокутного) чвертьхвильового РПЕХ його розміщують поперек хвилевода, від однієї широкої стінки до іншої, паралельно до осі хвилевода, для регулювання зв'язку РПЕХ із падаючою хвилею, його рухають відносно центра широкої стінки.

Для розміщення півхвильового резонатора необхідно використовувати додаткові підтримуючі вставки з діелектричного матеріалу, наявність якого

не має вносити зміни до поведінки резонатора.

Для цього резонатор або розміщують під нахилом уздовж основного хвилевода, регулюючи інтенсивність його збудження кутом нахилу відносно осі хвилевода. Або використовується позамежний хвилевід, тобто такий що має розміри менші за критичні для падаючої хвилі. Хоча хвиля не може поширюватись таким хвилеводом, частково вона в нього проникає. Змінюючи глибину розміщення РПЕХ у позамежному хвилеводі можна контролювати його збудження. На практиці, у якості позамежного використовується відрізок хвилеводу, що є ідентичним до основного у перерізі, але обернутий на 90° , замінивши таким чином широку стінку хвилеводу на вузьку.

Окрім як направлення падаючої хвилі до резонатора хвилевід також виконує функцію екрану ПЕХ. Як зазначалося у 1.1, поле хвилі знаходиться з обох сторін межі розділу середовищ, і за нормаллю від неї розподілене за експоненціальним законом, причому параметри розподілу для різних сторін відрізняються — у металах поле спадає швидше. Це збільшує щільність енергії у приповерхневих шарах металу. У той самий час обидві половини хвилі взаємно пов'язані. При екрануванні частини поля хвилі розташованого в діелектрику збільшується щільність поля в металі.

Добротність Q_0 таких резонаторів визначається втратами в самій поверхні, оточуючому діелектрику (не залежно від того чи є він частиною резонатора), та в стінках хвилевода. Для звичайних металів у нормальних умовах добротність має порядок $Q_0 \sim 10^2$. Надпровідники мають кількакратно вищу добротність. Зі збільшенням відстані до екрану добротність зростає, але зменшується зв'язок осциляцій намагніченості із ПЕХ.

В той час як для інших частотних діапазонів не можливе існування ПЕХ за умов додатніх значень дійсної компоненти комплексної діелектричної сталої $\varepsilon' > 0$, для ПЕХ у НВЧ діапазоні, при виконанні додаткової умови $\varepsilon_m'' \gg |\varepsilon_m'|$, це можливо.

Керування ПЕХ

Як зазначалося (1.1), довжина ПЕХ суттєво коротша за довжину відповідної їй звичайної хвилі. Це дозволяє концентрувати енергію в малих об'ємах та долати дифракційну межу. Крім того якісно посилюється взаємодія електромагнітної енергії із речовиною.

Щоб отримати можливість для використання властивостей ПЕХ у електроніці, необхідні основні керуючі пристрої на їх основі: різноманітні перемикачі, модулятори, та інші активні пристрої. Для цього потрібно мати способи керування їх властивостями та напрямком розповсюдження. Для цього, зазвичай, на металічну поверхню наноситься додатковий діелектричний прошарок [13–15]. Оскільки частина хвилі знаходиться ззовні металу, у залежності від властивостей діелектрика хвильовий вектор може змінюватися. Впливаючи на новий шар сторонніми засобами, можна модулювати якості самої ПЕХ. Серед існуючих робочих способів є використання температури або прикладання напруги, але такі варіанти мають низьку швидкодію.

Використання для керування розповсюдженням ПЕХ магнітного поля є новим перспективним напрямком досліджень. Показники ПЕХ залежатимуть не тільки від величини, а й напрямку поля. Крім того його дія надзвичайно швидка, якщо утворювати магнітне поле засобами, що розташовані безпосередньо на чіпі, можна досягти швидкостей модуляції порядку гігагерц [16], що дозволяє ефективно використовувати цей принцип, в тому числі, в оптичному діапазоні.

Розділ 2. Експериментальна частина

2.1. Постановка задачі

На меті було дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на ефективність зв'язування спінових хвиль із ПЕХ. Із міркувань потенційної можливості, опосередковано через цей зв'язок керувати розповсюдженням поверхневих електромагнітних хвиль, діючи за допомогою керованого магнітного поля на елементарні магнітні моменти речовини.

Конкретною задачею даного дослідження стояло дослідити зміни частотних та амплітудних характеристик циліндричного ФРПЕХ під дією зовнішнього поля, для різних умов його екранування, у трисантиметровому діапазоні в основній моді коливань. Для можливості порівняння, крім циліндричного, також досліджувався плаский резонатор.

2.2. Методика дослідження

2.2.1. Узагальнений опис методики дослідження

У роботі використовувався метод мікрохвильової рефлектометрії. Ідея методу полягає у наступному. Зразок опромінюється НВЧ-випромінюванням частота та амплітуда якого відома, відбитий від зразка сигнал детектується. За відмінностями падаючого та відбитого сигналу можна робити висновки про амплітудну характеристику досліджуваного явища для даної частоти. Розгортка частоти дає змогу отримати повну амплітудно-частотну характеристику (АЧХ). З АЧХ ми можемо, зокрема, дізнатися резонансну частоту. Це пов'язано із процесом дисипації НВЧ-енергії на резонаторі. У резонансі ФРПЕХ ефективно поглинає випромінювання, і амплітуда відбитого сигналу спадає, на АЧХ у відповідній точці видно просідання.

В дослідженні нас цікавив вплив зовнішнього магнітного поля на ФРПЕХ. Змінюючи його, паралельно контролюючи за магнітометром його значення, спостерігали зміни в АЧХ. Таким чином отримувалися залежності резонансної та частотної характеристик від магнітної індукції.

Крім того досліджувався фактор екранування ФРПЕХ як параметр цих залежностей. Для цього вимірювання проводились для різних відстаней резонатора від стінки секції в якій його було розташовано.

2.2.2. Опис експериментальної установки

Основні вузли та їх положення в системі

Принципову схеми установки наведено на рис. 2.1, опис установки можна знайти у [17–20]. Основу установки складав панорамний вимірювач коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) та послаблення — Р2-61. У Р2-61 використовується діапазон частот від 8,24 до 12,051 ГГц, відповідно розміри основного хвилеводу 23x10 мм [17, с.5]. Як вимірювач послаблення він застосовується в досліджах на проходження, у нас вимірювання проводяться на відбиття, тому реєструється КСХН. Вибір схеми з'єднання на відбиття чи пропускання не є принциповим але у п. 2.2.2 будуть зазначені деякі переваги обраного варіанту.

Фактично панорамний вимірювач являє собою два різні прилади: Я2Р-67 та ГКЧ-61, що з'єднуються за допомогою хвилеводів та коаксіальних кабелів у єдину систему.

ГКЧ-61, далі просто ГКЧ — це генератор НВЧ-сигналу. ГКЧ не тільки генерує сигнал, а й виконує його перелаштування: частота НВЧ циклічно змінюється у заданому інтервалі.

Для генерації НВЧ використовується діод Ганна, для точного керування частотою використовується сфера з монокристалу фериту у якості зв'язаного контура високої добротності. Сфера розташовується у полі електромагніта, поле якого визначає частоту, яка прямопропорційно залежить від напруги на котушці магніта. Значення генерованої частоти отримані вбудованим вольтметром виводяться на цифровому табло. Для виходу на робочий режим, та отримання штатного діапазону генерації необхідне прогрівання системи, для цього пристрій облаштований системою терморегуляції [18, с.9-11]. Від температури залежать як частота генерації так і покази вольтметра, таким чином вноситься систематична похибка до оцінки значень частоти, для абсолютних значень вона складає ± 200 МГц, проте коли пристрій виходить на сталий температурний режим, точність оцінки частот відносно одне-одної складає

одиниці мегагерц (див. 2.3.3).

Я2Р-67 — це індикатор НВЧ, обладнаний електронно-променевою трубкою (ЕПТ), на яку виводиться АЧХ відбитого від зразка сигналу. Для достовірної оцінки отриманих значень КСХН необхідно щоби не було незалежних від досліджуваних явищ коливань амплітуди сигналу що генерує ГКЧ, зокрема амплітуда сигналу не повинна залежати від частоти генерації. Тобто для ненавантаженого вимірювача АЧХ повинна бути сталою лінією. Тому для виправлення коливань потужності генерованого сигналу використовується система автоматичного регулювання потужності (АРП), про яку йтиметься далі за текстом.

При опроміненні зразка відбитий сигнал інтерферує із падаючим, і в головному тракті утворюється стояча хвиля. Щоб виокремити зі стоячих коливань обидві компоненти використовуються направлені відгалужувачі (НВ). НВ фактично, являється відрізком хвилеводу що має спільну стінку із основним трактом. У стінці періодично розташовані отвори на відстані $\frac{\lambda}{4}$. НВЧ що проникає через отвори інтерферує таким чином, що результуюча хвиля поширюється НВ лише в одному напрямку, досягнувши кінця НВ вона відбивається і прямує назад. На протилежному кінці розміщується узгоджене навантаження, яке поглинає відбитий сигнал. Таким чином у НВ виникає стояча хвиля утворена лише тією частиною НВЧ із основної лінії, яка поширюється у конкретному напрямку. У пучності її електричної складової розміщується детектор. Зняті сигнали через коаксіальні кабелі передаються на відповідні входи індикатора.

Принцип роботи АРП будується на негативному зворотному зв'язку, індикатор приймаючи вихідний сигнал з ГКЧ, направляє пропорційний йому керуючий сигнал назад до ГКЧ окремим кабелем, цей сигнал модулює потужність вихідного сигналу ГКЧ, і таким чином отримується стабільна АЧХ. Для цього в індикаторі, за допомогою аналогового поділювача напруги, відбувається ділення сигналу відбитої хвилі на падаючу. Звідси отримується модуль коефіцієнта відбиття за напругою:

$$\rho = \sqrt{\frac{U_r}{U_f}}, \quad (2.1)$$

де U_r — амплітуда відбитої хвилі, U_f — амплітуда падаючої хвилі.

Звідси отримується значення КСХН, як:

$$K = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}. \quad (2.2)$$

Окрім як для АРП, на рисунку показано, що ГКЧ та індикатор з'єднані іще однією коаксіальною лінією. Вона потрібна тому, що окрім основного сигналу ГКЧ також генерує сигнали для створення міток та візирів на екрані ЕПТ. Одна із них дозволяє визначати значення КСХН: за допомогою проградуєваного електромеханічного пристрою змінюється її положення на екрані для співставлення із потрібною точкою, а за логарифмічною шкалою можна визначити значення КСХН. Для контролю частоти, використовувався механічний резонансний частотомір Ч2-32. Який монтувався на головному тракті. Так само як і досліджуваний ФРПЕХ, за рахунок резонансу частотомір розсіює НВЧ-енергію, і на екрані ЕПТ виникає мітка — провал на АЧХ, який знаходиться на тій частоті на яку налаштований резонатор частотоміра. Обертаючи ручку на корпусі, ми можемо налаштовувати його, розташовуючи мітку в довільних місцях АЧХ. Сама ручка при цьому механічно зв'язана зі шкалою пристрою. Таким чином, співставляючи мітку частотоміра, ми можемо визначати частоту. На відміну від показів ГКЧ значення отримані за допомогою частотоміра точні за абсолютним значенням, і на практиці не залежать від зовнішніх факторів, тому вважаються істинними. Недоліком є його нижча точність порівняно до вбудованого частотоміра ГКЧ при вимірюваннях відносних значень частоти.

За частотоміром знаходиться резонаторна секція про яку йтиметься у п. 2.2.2. Основний НВЧ-сигнал відбивається від стику хвилеводів, а частина що падає на сам зразок — поглинається, за свідношенням відбитого сигналу із падаючим визначаються резонансні характеристики ФРПЕХ. Щоб завадити підтриманню сторонніх мод, на протилежному кінці секції встановлюється узгоджене навантаження.

Секція розташовується в зазорі між накінечниками електромагніта СП-78, магнітне поле в ньому розподілене рівномірно. Поряд із секцією, у магнітному полі, розміщується зонд від вимірювача магнітної індукції Ш1-8, на базі датчика Хола. Вимірювання індукції виконується шляхом балансування гальванічного мосту. Саме поле утворюється подачею електричного струму на контакти електромагніта. В якості джерела струму використовується

цифровий лабораторний блок живлення, який підтримує напругу постійною, і дозволяє задавати точні її значення. Для зміни полярності магнітного поля (див. п. 2.2.3) змінюється полярність під'єднання клем електромагніта до виходів блоку живлення.

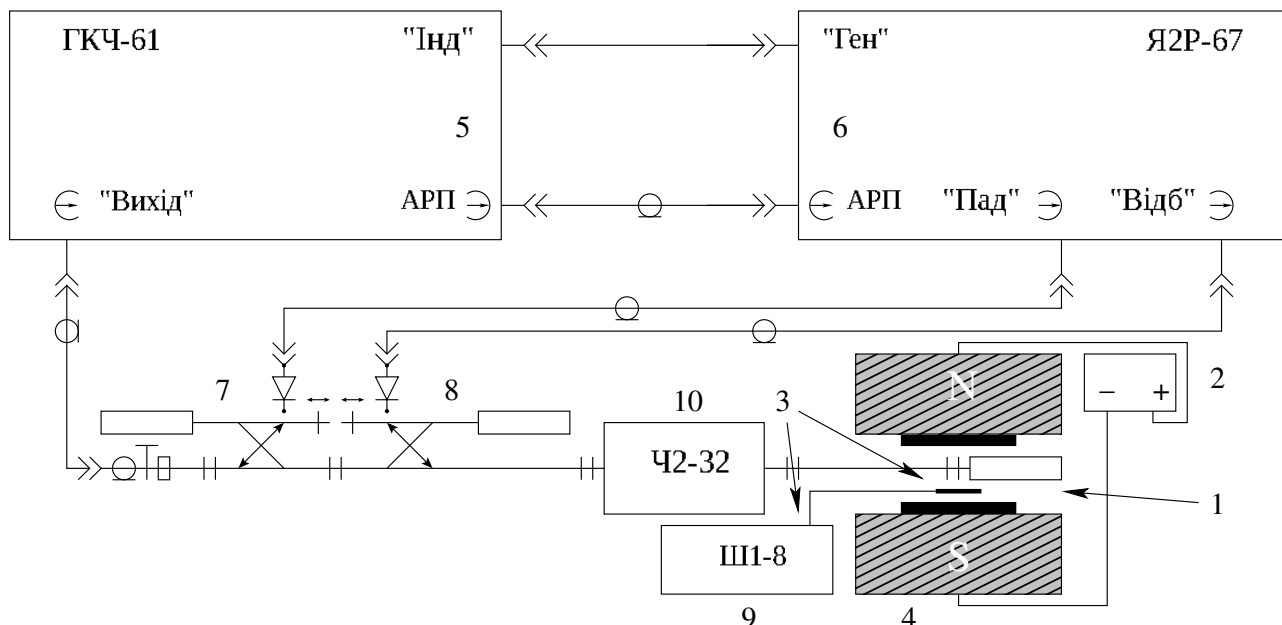


Рис. 2.1. Експериментальна установка. Зазначені назви головних виходів панорамного вимірювача. Інші елементи установки: 1 — вимірювальна секція, 2 — лабораторний блок живлення, 3 — магнітометр, та його зонд, 4 — електромагніт, 5 — генератор, 6 — індикатор, 7 і 8 — направлені відгалужувачі падаючого та відбитого сигналу відповідно, 9 — резонансний частотомір.

Вимірювальна секція

Резонатор розміщувався в позамежному хвилеводі, тобто хвилеводі розміри якого менші за критичні. Формально хвиля не може ним поширюватись, але частково проникає до нього, при цьому її амплітуда коливань експоненційно зменшується по мірі заглиблення.

У даному експерименті позамежний хвилевід являв собою відрізок основного хвилеводу повернутий на 90° , і виступав у ролі екрану електромагнітного випромінювання. Схематичне зображення секції наведено на рис. 2.2

Використання позамежного хвилеводу обумовлене наступними міркуваннями:

У основному хвилеводі маємо H_{10} хвилю, тобто коливання електричної компоненти НВЧ відбуваються між широкими стінками хвилеводу (вісь Ox на рис. 2.2). Для збудження основної моди коливань ФРПЕХ, електричне

поле має коливатися по його довжині. Для збудження резонатора в основному хвилеводі довелося би розміщувати його поперек хвилевода, крім того що це обмежує його розміри, екранування в різних частинах резонатора буде відрізнятися. Використання позамежного хвилевода дозволяє уникнути цих проблем.

Використання в якості позамежного хвилевода відрізка основного повернутого навколо власної осі, є поширеним рішенням для подібного роду дослідів. Окрім того ще це технічно просте рішення, у такому випадку стінка що не бере участь в екрануванні (вісь Oy) збільшує відстань від ФРПЕХ і втрати енергії в ній зменшуються.

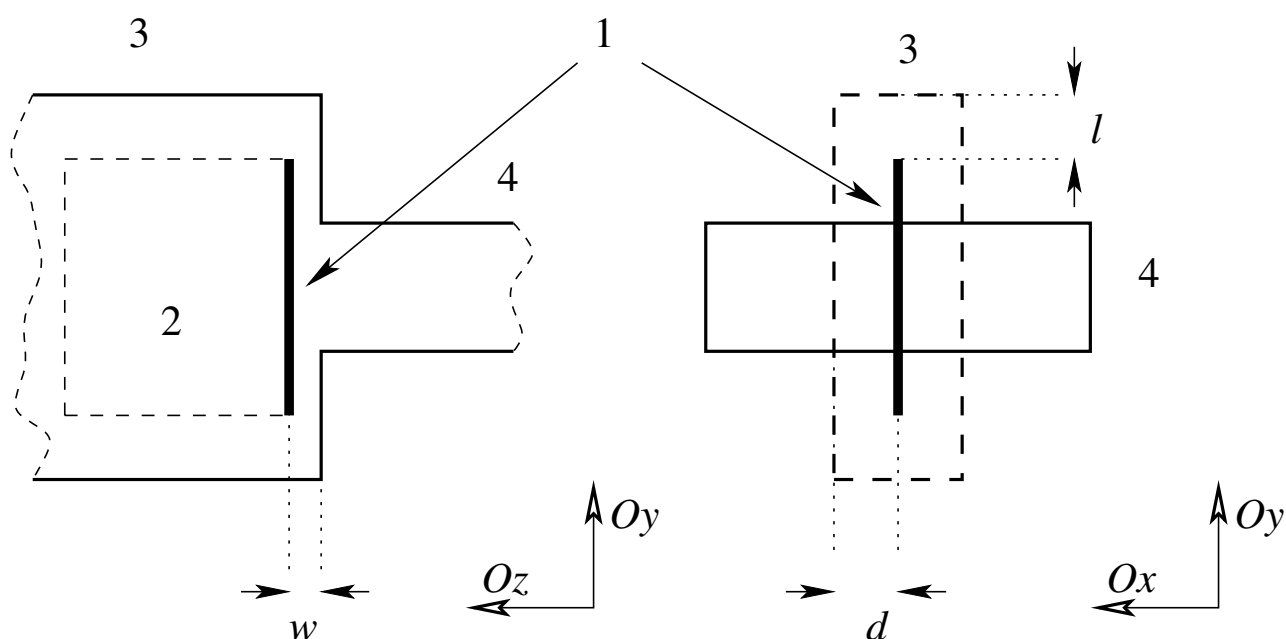


Рис. 2.2. Вимірювальна секція: 1 — положення циліндричного ФРПЕХ, 2 — положення пластини, 3 — позамежний хвилевід, 4 — основний хвилевід.

Щоб досягти максимальної взаємодії ФРПЕХ розміщувався так щоби магнітні лінії зовнішнього поля проходили вздовж осі за якою відбуваються коливання основної моди (так само вісь Oy).

Доцільно розміщувати резонатор якнайдалі від стінок які не беруть участі в екрануванні робочої моди, тому за віссю Oy намагалися розмістити резонатор по центру, таким чином, щоб відстані l були максимально можливими.

Для фіксації ФРПЕХ в позамежному хвилеводі використовувалися пінопласт та клейка стрічка. Обидва матеріали прозорі для випромінювання заданого діапазону, і мають мізерну відмінність від вакууму у діелектричній проникності, тому можемо вважати що $\epsilon = 1$, а їх наявність в системі можна

нехтувати. Розміщення резонатора у хвилеводі виконувалося із візуванням через мікроскоп зі шкалою, із точністю до 0,5 мм.

Згідно 1.2, заглиблення по осі Oz має бути на певне оптимальне значення, при його збільшенні чи зменшенні, коливання у ФРПЕХ не будуть збуджуватись. Таким чином w на рис. 2.2 визначає зв'язок зовнішніх НВЧ коливань зі зв'язаними коливаннями ФРПЕХ, і не впливає на характер внутрішніх процесів, вона підбиралася для кожного зразка таким чином щоби досягти якомога кращих значень зв'язку, тобто якомога менших початкових значень КСХН. Відстань d — визначає екранування, тобто взаємодію спінових хвиль із поверхневими. Дослідження проводилися із різними значеннями d для дроту: 1, 3 та 5 мм, для пластини використовувалася лише значення у 5 мм. Оскільки ширина позамежного хвилеводу складає всього 1 см, то 5 мм є найбільшим можливим значенням.

Досліджувані ФРПЕХ

У роботі досліджувалися два ФРПЕХ: циліндричного типу та у формі пластини.

В якості циліндричного резонатора виступав дріт із залізо-нікелевого сплаву. Більш точний його склад: Fe — 68%, Ni — 11%, Cr — 18%, Mn — 2%, 1% — домішки, — отриманий у мас-спектрометрі. Довжина — 14,6 мм, діаметр — 0,229 мм.

Другий ФРПЕХ являв собою пластину, виготовлену зі трансформаторної сталі марки 50Н, згідно даних виробника склад якої: Fe — 50%, Ni — 50%. Лінійні розміри — 11,25 × 1,35 × 0,4 мм. Перший з яких лежить на осі Oy відповідно до рис. 2.2, і коливання відбуваються саме вздовж нього.

2.2.3. Загальний порядок роботи

У ході експерименту змінювалися значення напруги на блоці живлення, фіксувалися значення магнітного поля, КСХН, резонансної частоти за частотоміром та резонансної частоти за показами на табло ГКЧ, значення часу автоматично записувалось за допомогою комп'ютера.

Вимірювання проводились за двома схемами:

1. Із попереднім замагнічуванням зразка, вимиканням поля і продовжен-

ням вимірювань за тієї-ж полярності поля.

2. Із попереднім замагнічуванням зразка, і подальшим вимірюванням в полярності протилежній до намагніченості зразка.

Таким чином, за першою схемою власна намагніченість не змінювалась у ході експерименту. А під час вимірювань за другою схемою відбувалося його перемагнічування. Вимірювання за обома схемами виконувались також по чергово.

Ідея полягала у тому щоб виключити вплив на результат залишкових намагніченостей ФРПЕХ, та перевірити здатність максимальної напруженості поля їх руйнувати.

2.2.4. Виявлення та усунення систематичних похибок

Вимірювання частоти супроводжувалося деякими складнощами, як вказувалось у п. 2.2.2, покази вольтметра ГКЧ залежать від температури. Так як процес вимірювань розтягнутий в часі, то навіть для попередньо прогрітої установки виявлялася значна розбіжність абсолютних значень частоти на початку зі значеннями у кінці. Приклад залежності розходження значень частоти на рис. 2.3. Другий механічний резонансний частотомір позбавле-

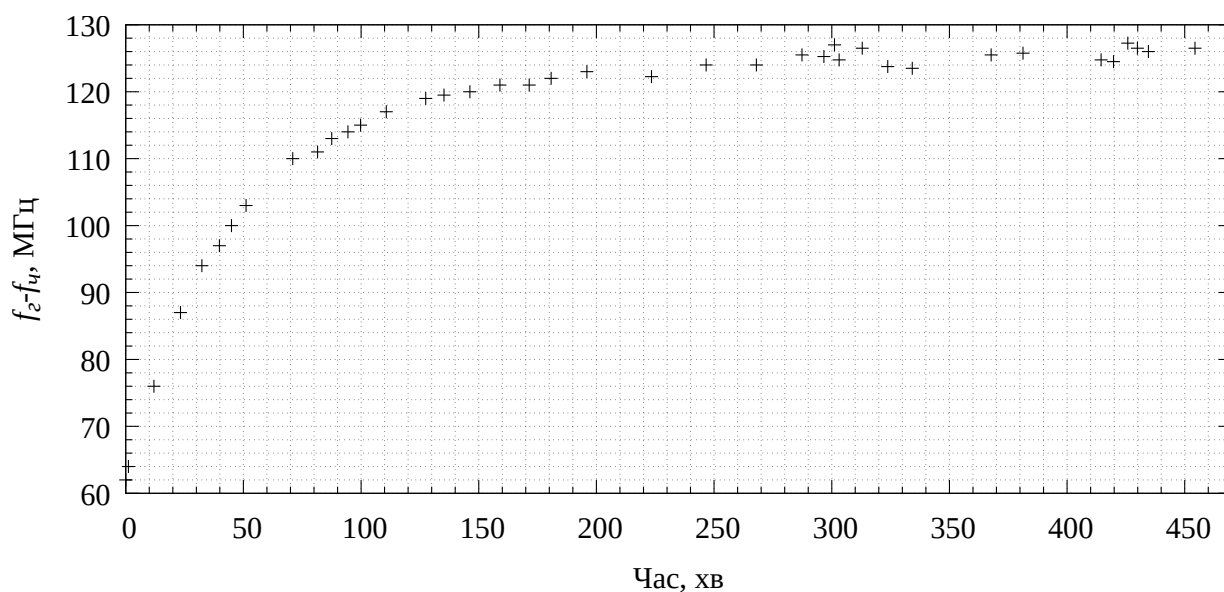


Рис. 2.3. Приклад зміщення показів вбудованого частотоміра із часом. Включені точки до початку основних вимірювань

Було помічено що ці ділянки відповідають ділянкам із залежностей резонансної частоти для її екстремальних значень. Побудувавши залежність різниці показів двох приладів, від значень частоти (рис. 2.5) бачимо кореляцію якої, очевидно, не має бути.

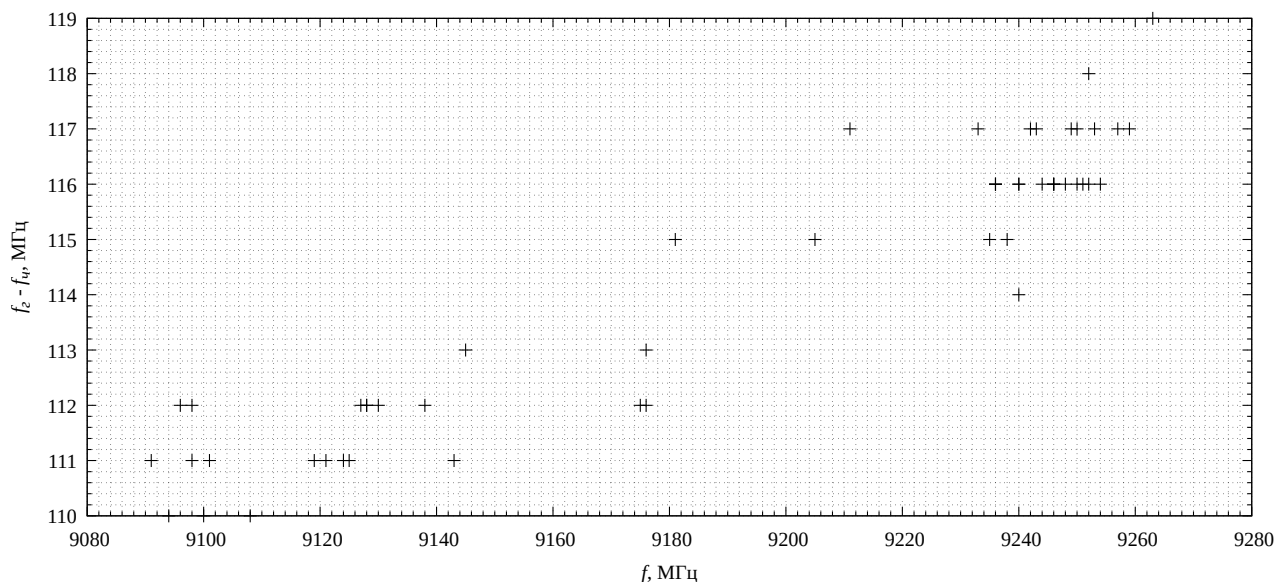


Рис. 2.5. Залежність зміщення частоти від її абсолютного значення.

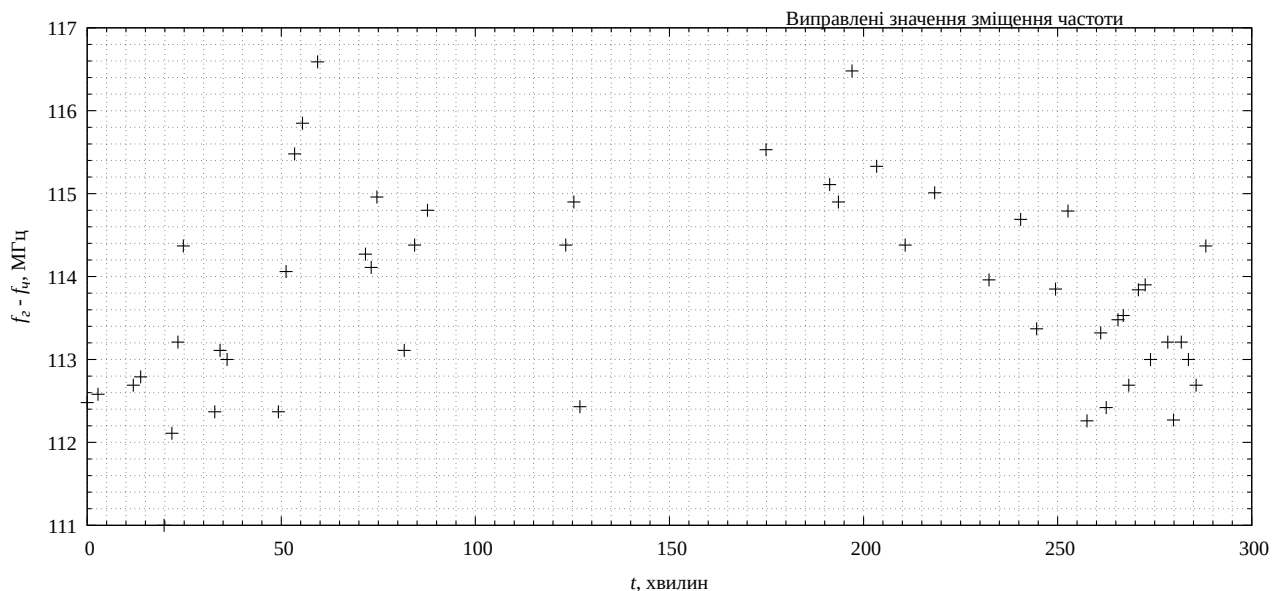


Рис. 2.6. Скориговані значення зміщення частоти у часі.

Таким чином маємо дві систематичні похибки, які усуваються наступним чином. За допомогою методу найменших квадратів знаходиться апроксимуюча функція для залежності зміщення від частоти. Для апроксимації використовувалася звичайна лінійна функція вигляду $\Delta f(f_g) = af_g + b$, де

f_g — значення частоти за показами ГКЧ, Δf — значення зміщення у точці отримуване шляхом інтерполяції, a і b — шукані коефіцієнти, що визначають нахил та положення прямої.

Оскільки нам не відомо які значення зміщення частоти ближчі до істини — більші чи менші, тому беремо середнє значення $\Delta \hat{f}$ з-поміж усіх, і наближаємо усі інші до нього. Отримуємо виправлені значення Δf (рис. 2.6).

Отримані значення залежать від часу через нагрівання установки. Хоча дана залежність не є лінійною, після попереднього навмисного прогрівання зміни значення частоти відбуваються достатньо повільно для того щоби вважати їх квазілінійними.

Так само використовуючи метод найменших квадратів, знаходимо параметри апроксимуючої функції для нової залежності, з яких можемо інтерполювати значення частотоміра.

2.3. Результати

2.3.1. Розгляд отриманих залежностей

На графіках 2.9–2.18 у цьому підрозділі наведено отримані залежності. Області з малими значеннями магнітної індукції для зручності винесені на окремі зображення. Залежності КСХН та резонансної частоти для зручності побудовані в спільних координатних площинах. Максимум КСХН відповідає максимальному зв'язку гібридизованих коливань в резонаторі, і співпадає із точкою перебудови резонансної частоти, у місці де вона змінюється найбільш стрімко.

Циліндричний резонатор

Розглянемо результати отримані для циліндричного резонатора, у ролі якого виступав тонкий дріт із залізо-нікелевого сплаву.

Як можна бачити з рис. 2.9-2.14, резонансна частота залежить від відстані до екрану, і є тим вищою, чим ближче розташований екран. Також із наближенням до екрану зростає зсув резонансної частоти, та зменшується необхідне для цього поле.

Значення направленості магнітного поля по відношенню до власного поля зразка проявляється лише до ~ 20 мТ, за яких відповідно відбувається

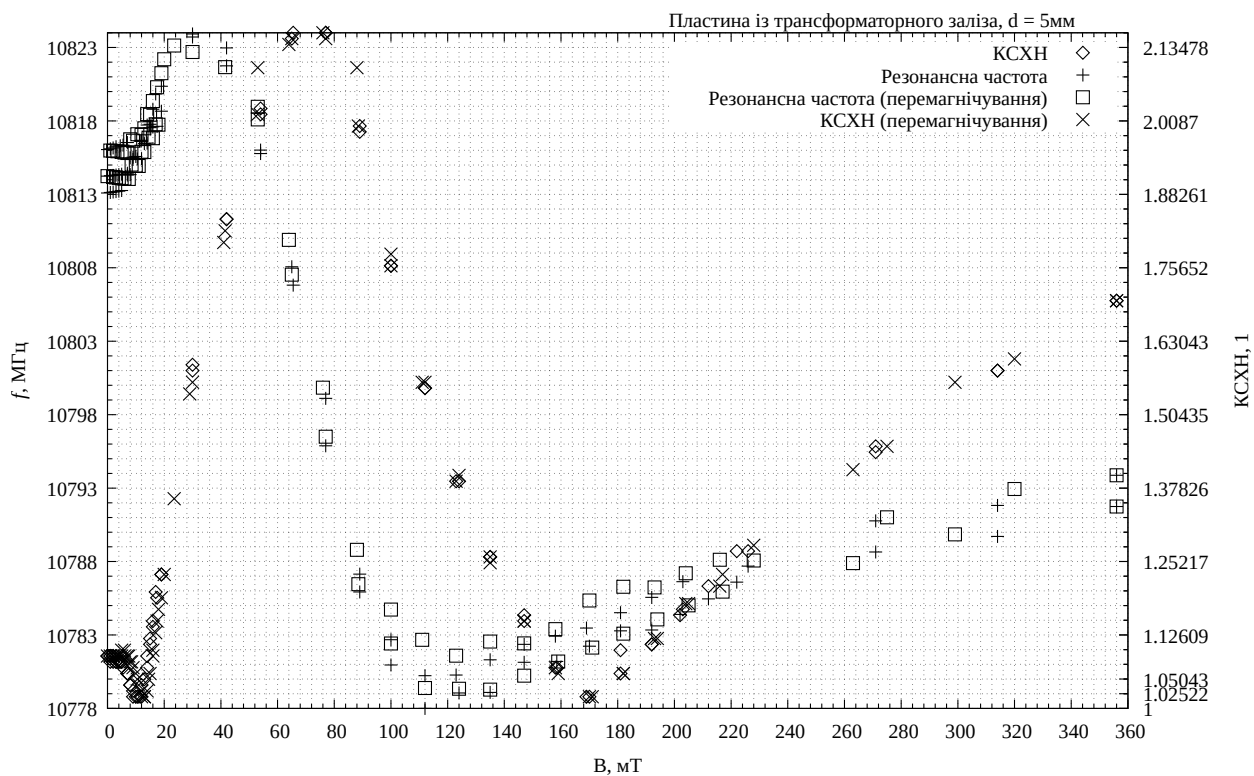


Рис. 2.7. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 5\text{ мм}$.

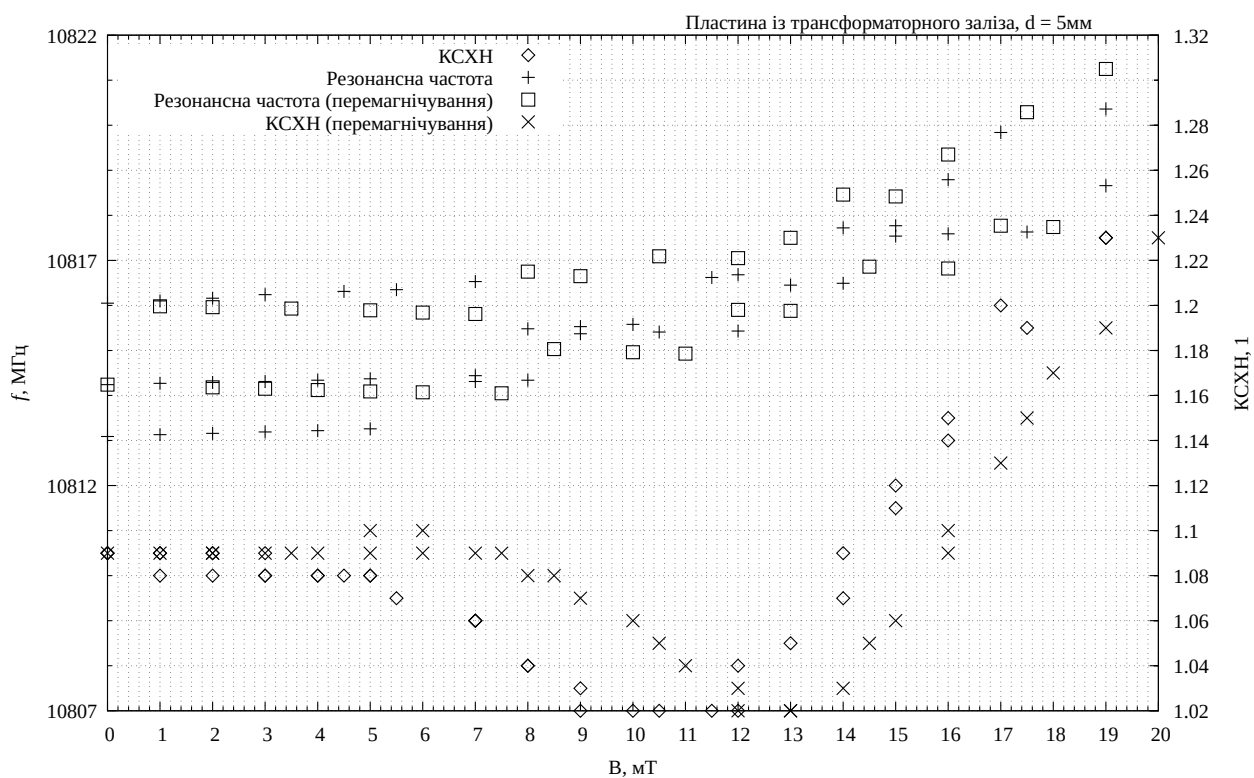


Рис. 2.8. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 5\text{ мм}$.

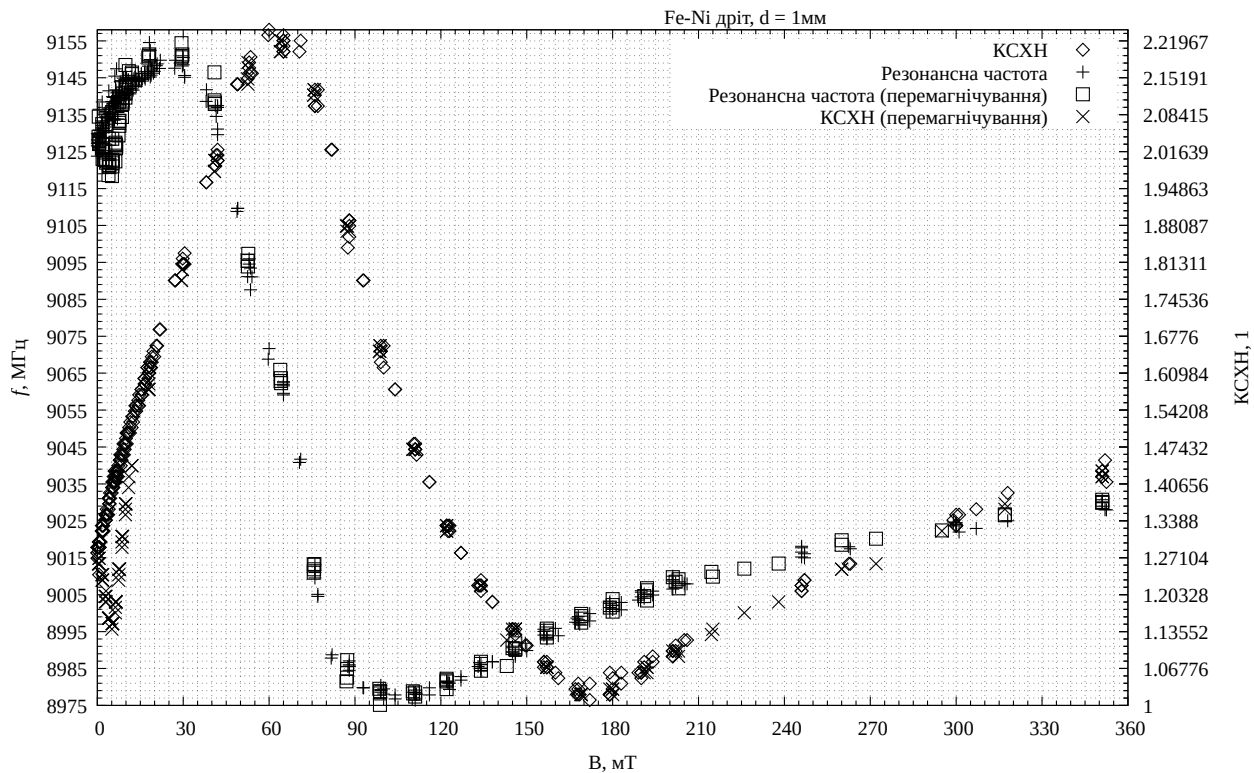


Рис. 2.9. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 1\text{ мм}$.

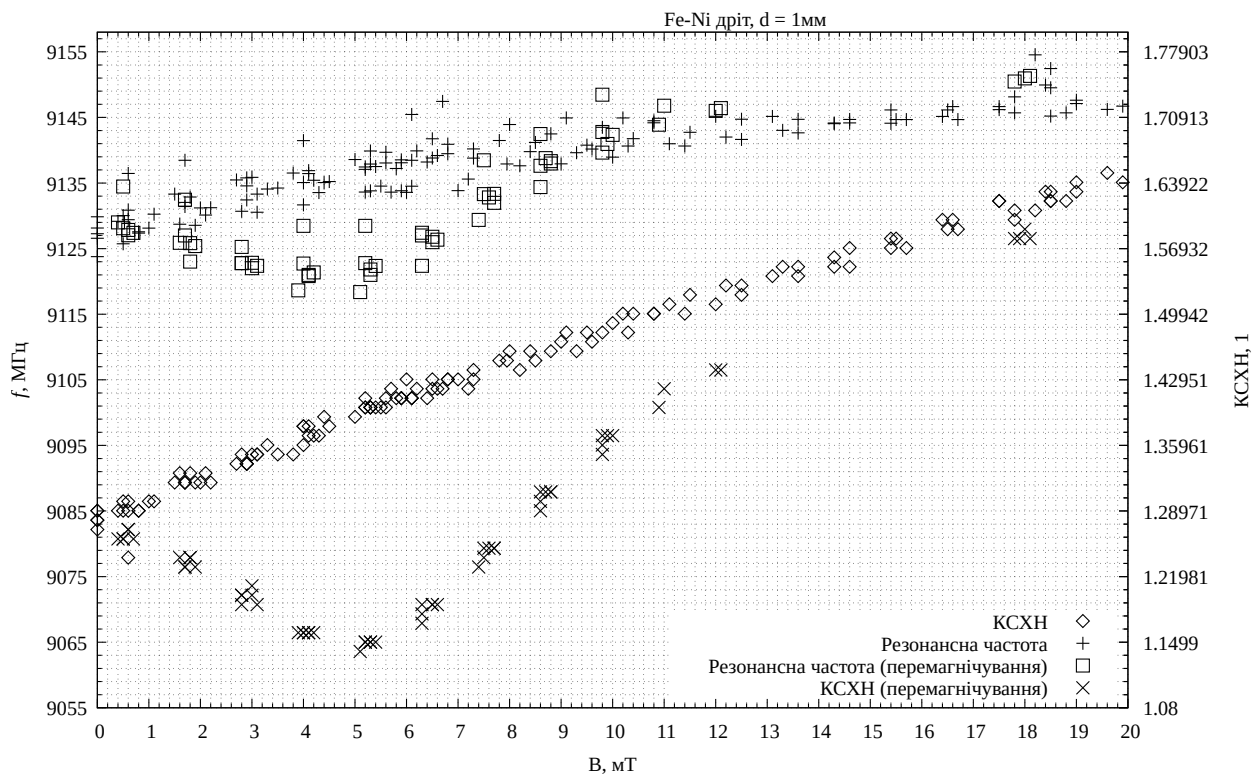


Рис. 2.10. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 1\text{ мм}$.

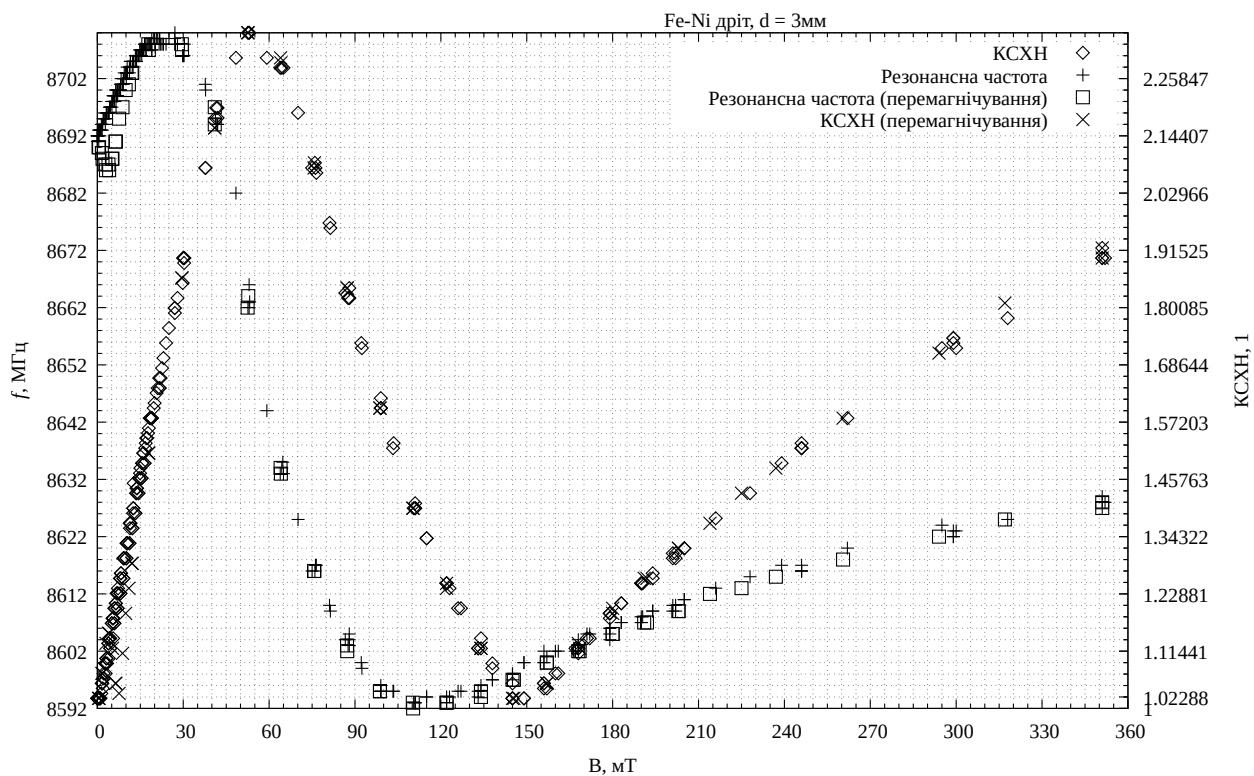


Рис. 2.11. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 3 \text{ мм}$.

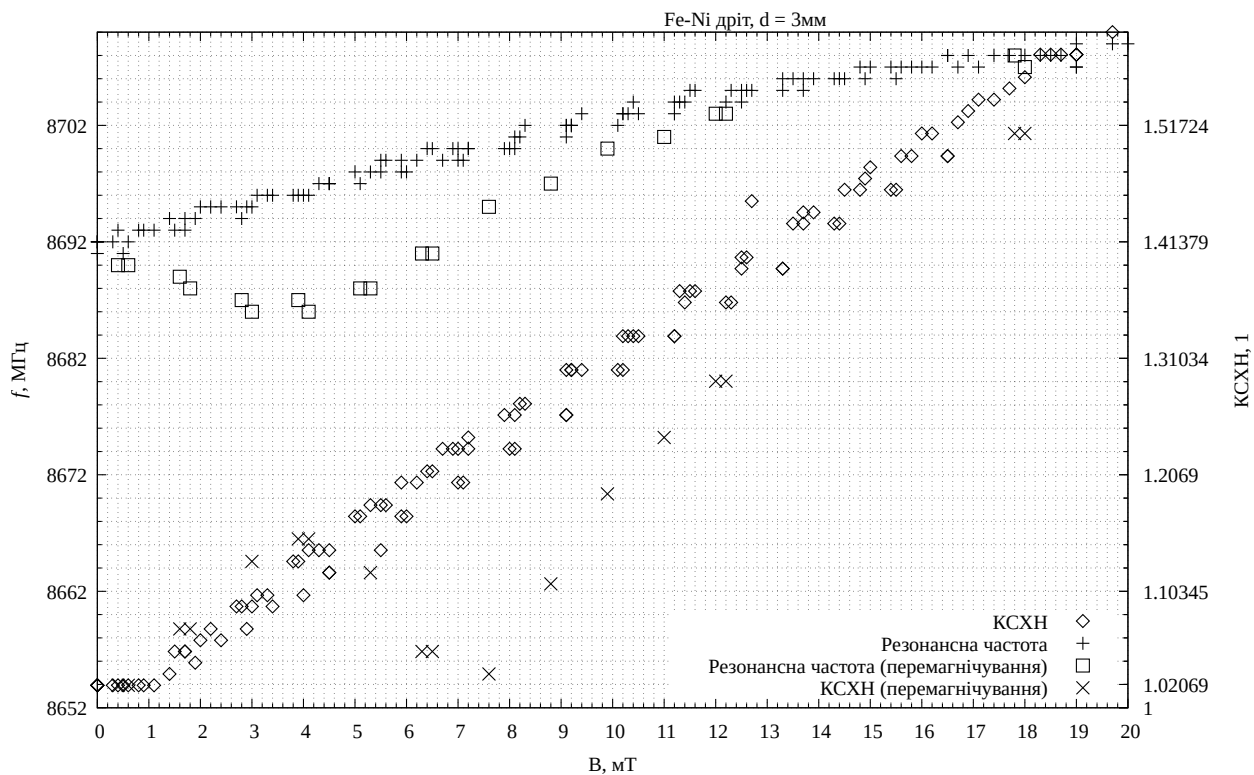


Рис. 2.12. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 3 \text{ мм}$.

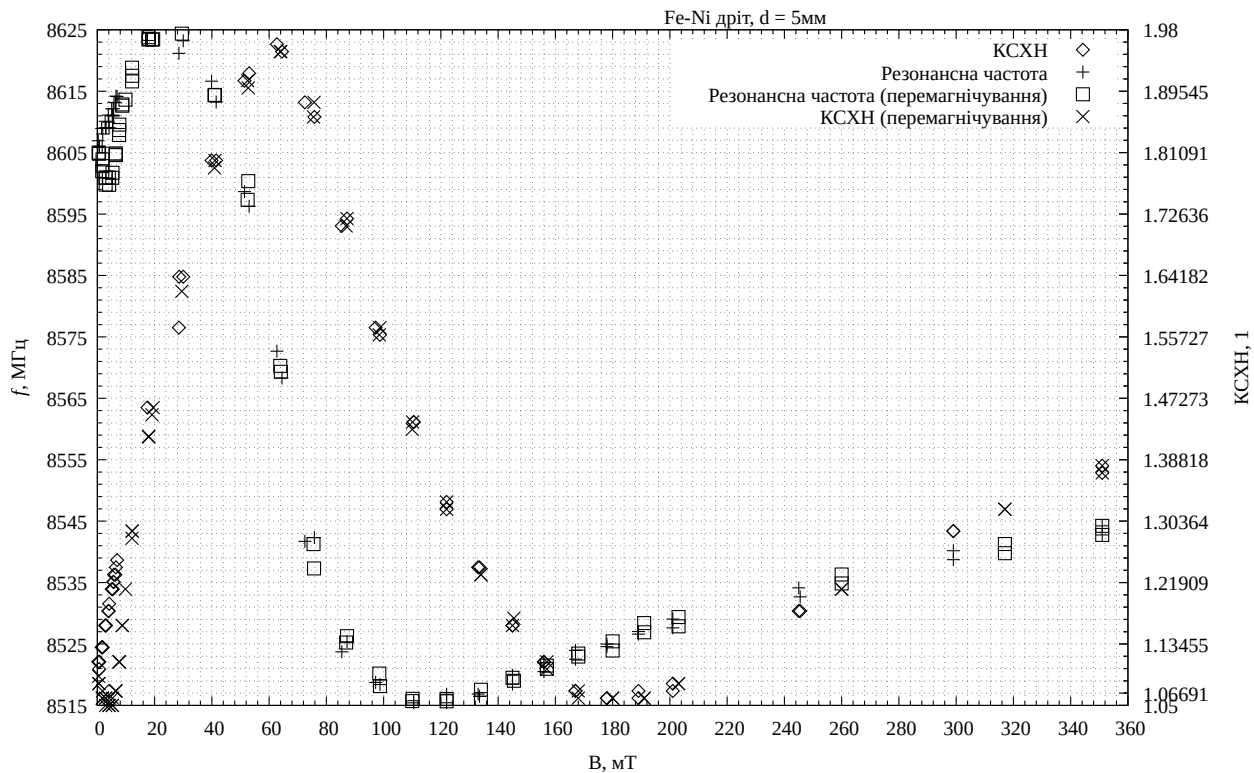


Рис. 2.13. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 5$ мм.

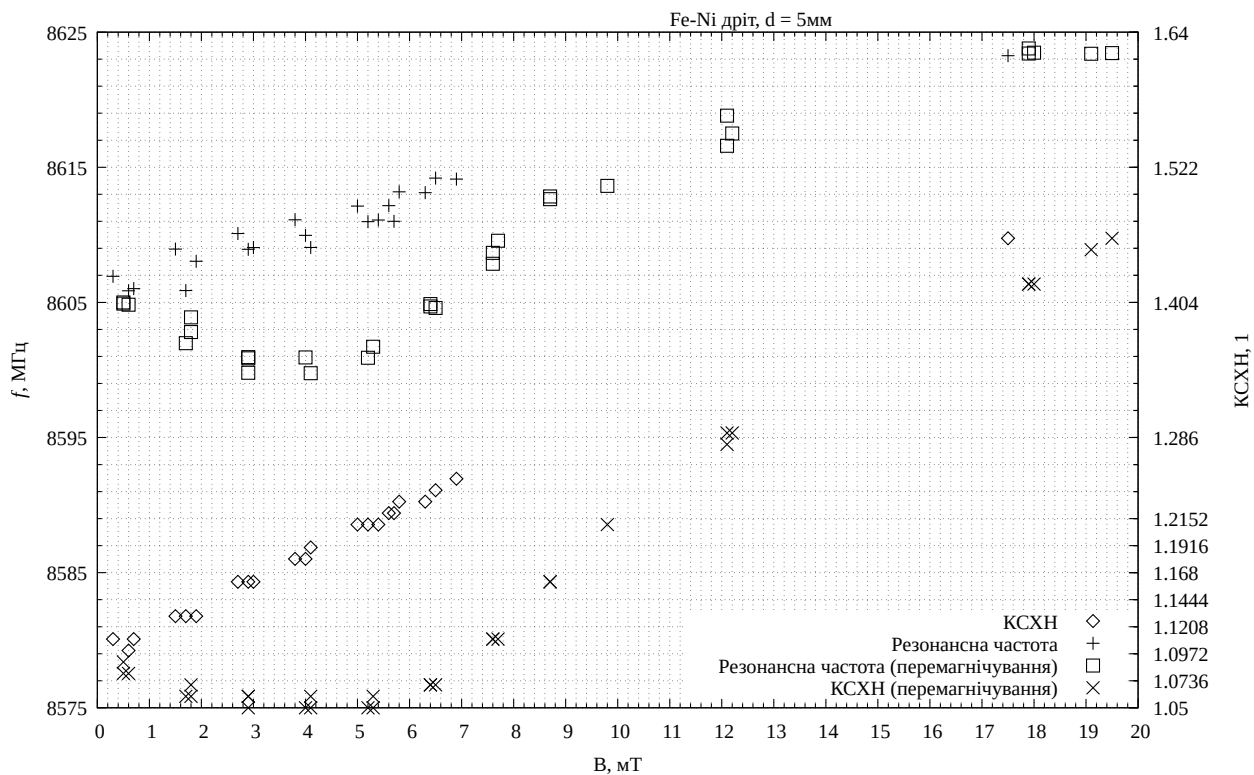


Рис. 2.14. Залежності резонансної частоти та КСХН від магнітної індукції, $d = 5$ мм.

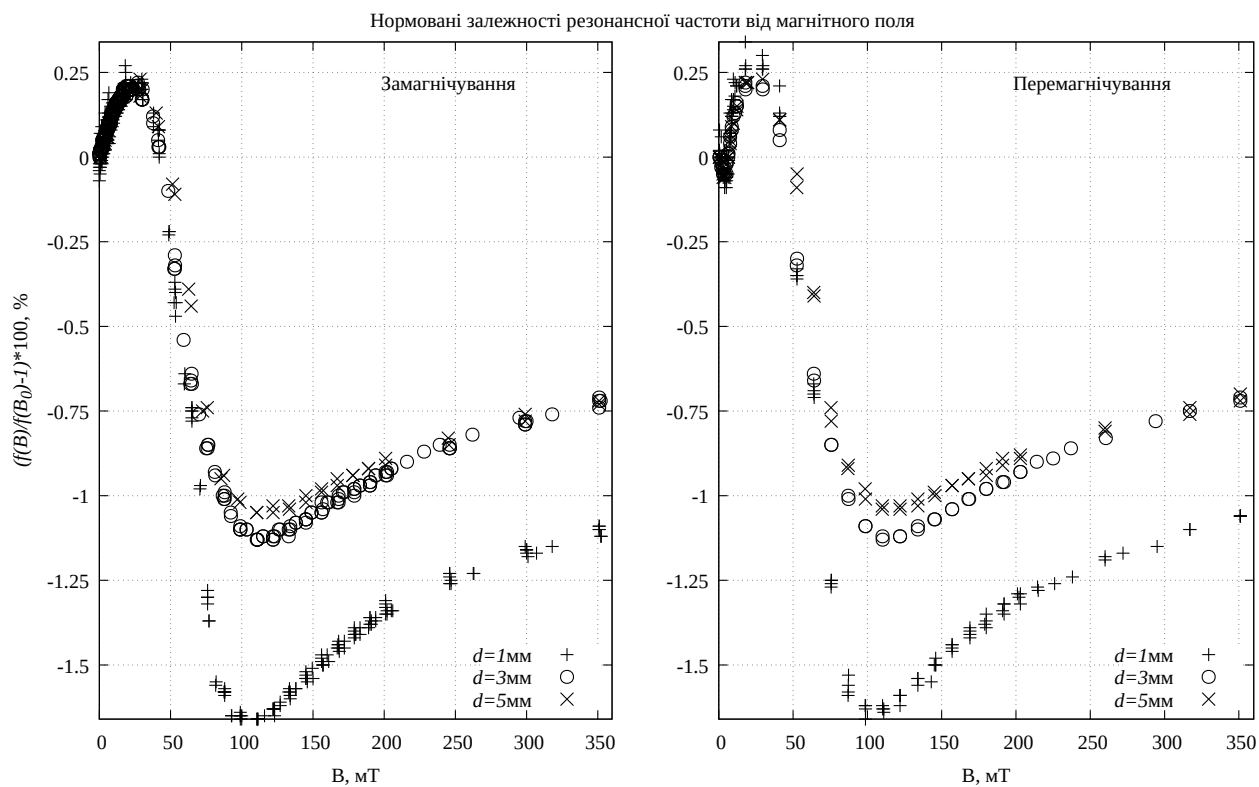


Рис. 2.15. Зведені залежності резонансної частоти від магнітної індукції для різних d

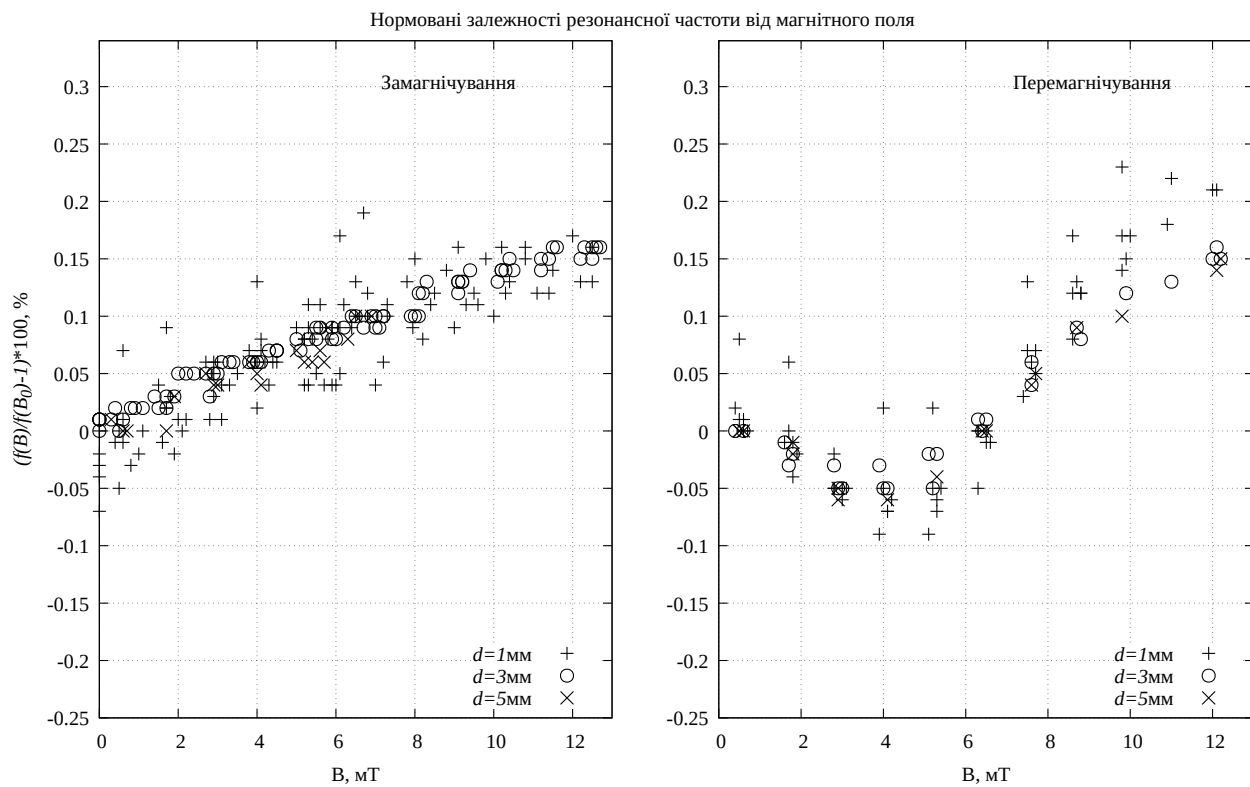
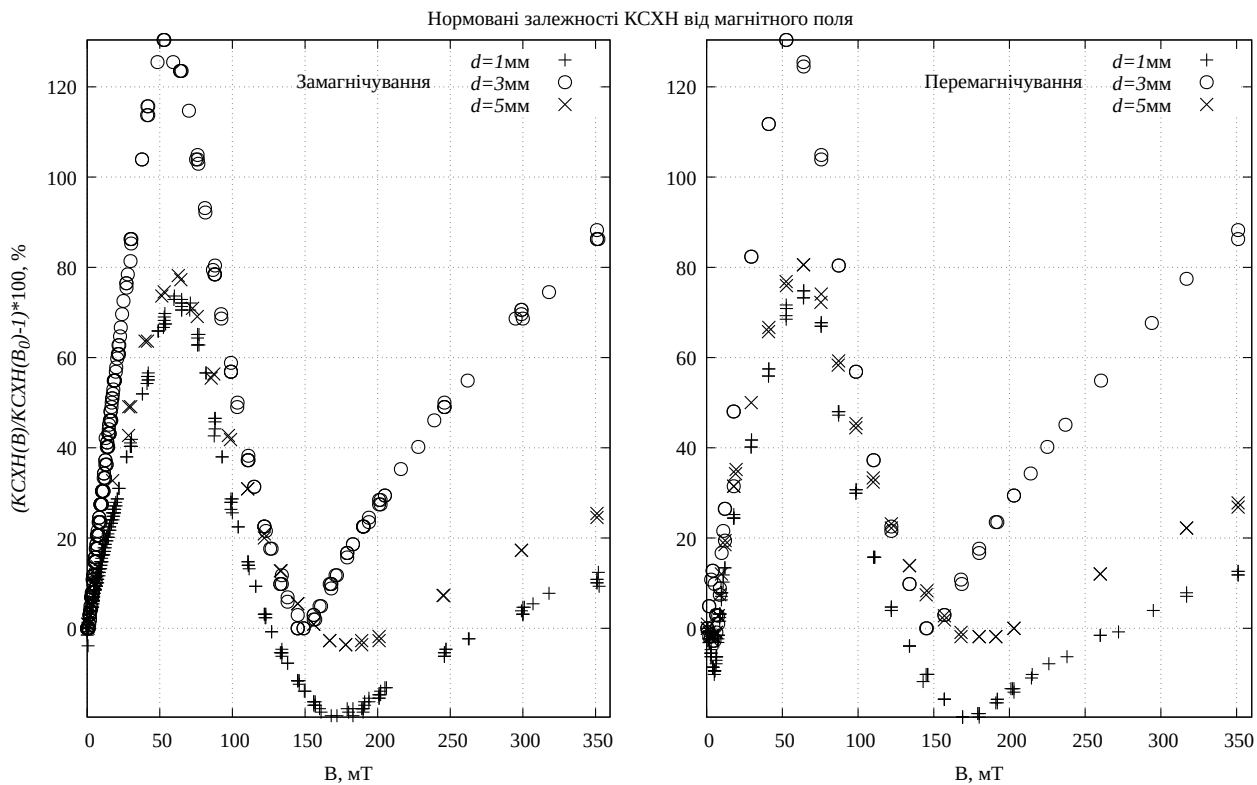
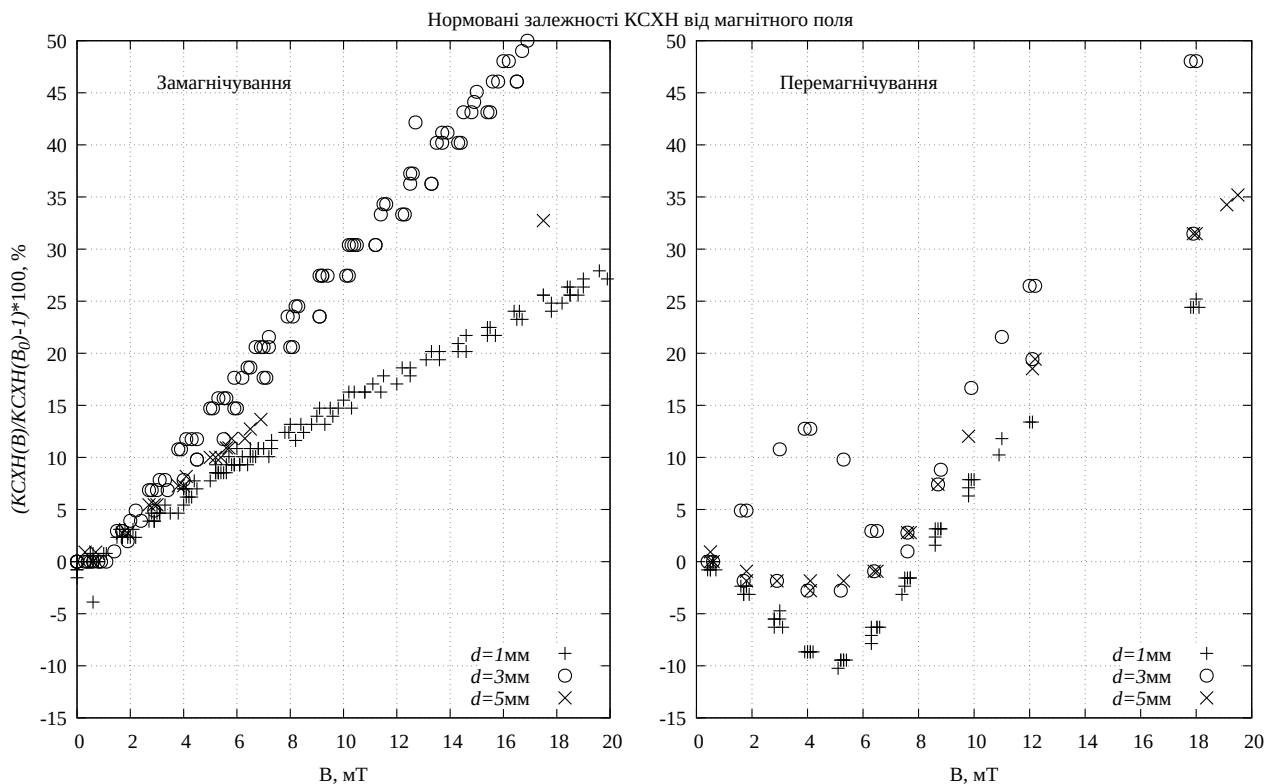


Рис. 2.16. Зведені залежності резонансної частоти від магнітної індукції для різних d , за малих значень B

Рис. 2.17. Зведені залежності КСХН від магнітної індукції для різних d Рис. 2.18. Зведені залежності КСХН від магнітної індукції для різних d , за малих значень B

повне перемагнічування зразка, він виходить на індукцію насичення, і далі не відрізняється від попередньо намагніченого. На графіку 2.12, для відстані до стінки $d = 3$, в околі 4 мТ видно зростання КСХН, на відміну від залежностей із іншими значеннями d , у яких відбувається спадання. Проте, найімовірніше, це не пов'язано із ефектами досліджуваного явища, а є особливістю експерименту, і спричинене

Плаский резонатор

Графіки для плаского резонатора наведено на рис. 2.7 та 2.8. За формою вигляд кривих як для КСХН, так і резонансної частоти у пластини має відмінності від дроту в області малих значень індукції. На відміну від поведінки дроту, криві резонансної частоти не змінюють свій вигляд при протинаправленості зовнішнього і власного полів, і змінюються монотонно. Криві для КСХН подібні до аналогічних кривих попереднього зразка, проте підйом біля нуля поля удвічі ширший і менш крутий. При цьому точки для попередньо замагніченого зразка повторюють рух точок для зразка у перемагнічуванні, але зміщені ближче до нуля.

Імовірно це пов'язано із більшою товщиною цього резонатора, яка обумовлює його більшу інертність.

Залежність форми кривих від ступеню екранування

На нормованих графіках стає видно, що згаданий раніше зсув частоти посилюється із наближенням до стінки за рахунок вертикального опускання мінімуму, і за індукцією його розташування лишається тим самим. Максимум також лишається на місці. І всі нахили і точки, за винятком мінімуму, загалом лишаються незмінними. За малого поля відносні значення резонансної частоти також не залежать від ступеню екранування.

Для КСХН криві виглядають так, наче ступінь екранування змінює їх похідну. Зі зміною відстані між стінкою та ФРПЕХ зростають не окремі піки, а всі прямі стають крутішими. Це також проявляється за малих значень поля. Що свідчить про покращення взаємодії коливань намагніченості із ПЕХ. Хоча не вдається зробити однозначних висновків щодо прямої залежності цього впливу, із наближенням ФРПЕХ до стінки крутість спочатку зростає, і

потім знову спадає. Не можна виключати що це пов'язано із точним положенням ФРПЕХ за заглибленням у позамежному хвилеводі, яке визначає зв'язок резонансної системи із зовнішнім сигналом.

Крім цього можна бачити що положення мінімуму зсувається як за індукцією до 50 мТ, так і за амплітудою у межах 20%.

2.3.2. Основні отримані числові значення

Точні числові значення для ключових точок наведено у таблиці 2.1.

Табл. 2.1. Основні числові значення ключових точок кривих

Параметр	Дріт			Пластина
	1	3	5	
Відстань до стінки d , мм				5
$f_{res.max}$, МГц	9158	8710	8626	10824
$f_{res.min}$, МГц	8975	8592	8515	10778
$f_{res.max} - f_{res.min}$, МГц	183	118	110	47
$B(f_{res.max})$, мТ	17.9	27.1	28.6	46
$B(f_{res.min})$, мТ	98.7	110.03	110.5	112
K_0 , 1	1.29	1.02	1.05	1.09
K_{max} , 1	2.24	2.35	1.98	2.16
K_{min} , 1	1.02	1.02	1.06	1.03
$B(K_{max})$, мТ	60	53	58.8	77
$B(K_{min})$, мТ	1.72	1.45	1.8	1.7
$K_{max}/K_0 \times 100\%$, %	174	230	189	212

2.3.3. Оцінка похибки

Похибка резонансного частотоміра визначалася за ціною поділки його шкали, яка була не однакова в залежності від досліджуваного діапазону (див. 2.2).

Табл. 2.2. Ціна поділки частотоміра для різних діапазонів частот

Діапазон, МГц	Ціна поділки, МГц
8800 – 9700	2
9700 – 10700	1.5
10700 – 12100	2

Для ГКЧ, за паспортом, абсолютна та відносна похибки складають ± 200 МГц та $\pm(1 \div 2)$ МГц відповідно [18]. На практиці ми шукали значення резонансної частоти що виглядає як локальний мінімум на АЧХ. Оскільки його крутість була неоднакова в залежності від магнітного поля та відстані d зразка до екрану випромінювання, то вирізнити цей мінімум на екрані ЕПТ іноді було важче, і відносна похибка може зростати.

Похибка вимірювань КСХН зазначається у відсотках як: $\pm 2,4\%$ [20]. Похибка магнітної індукції: $\pm 1,5 - 2\%$ [19].

Висновки

Продемонстровано наявність та досліджено залежності резонансної частоти та коефіцієнта стоячої хвилі за напругою від магнітної індукції.

Виявилося, що ані резонансна частота, ані КСХН не залежать від фактичної полярності магнітного поля: значення виміряні при різних полярностях дають однакові значення, і лягають на одну криву. Тому графіки для окремих полярностей не наведено.

Натомість, значення мав відносний напрямок поля. Ті точки, що вимірювалися в умовах коли власне магнітне поле зразка протидіє магнітному полю прикладеному ззовні, відрізняються від тих, де поле співпадало з зовнішнім. Вони позначені окремо. Фактично це лише свідчить про те, що застосованій напруженості поля було достатньо для руйнування залишкових намагніченостей.

Виявлено що характер цієї залежності дозволяє керувати резонансною частотою прикладаючи штучне магнітне поле до резонатора, та екрануючи поле електромагнітної хвилі в середовище резонатора. Посилуючи екранування вдається збільшити зсув частоти, і, відповідно, регулювати значення резонансної частоти системи у ширшому межах. Максимальний отриманий зсув частоти склав 183 МГц.

Також помічено що амплітудні характеристики системи також суттєво залежать від ступеню екранування, хоча не визначена закономірність цієї залежності. Максимальне досягнуте зростання коефіцієнта стоячої хвилі за напругою від початкового значення у 2,3 рази.

Отримані результати можуть бути пояснені існуванням зв'язку поверхневих електромагнітних хвиль із власними осциляціями намагніченості в резонаторі. При посиленні або послабленні його зовнішнім магнітним полем, відповідним чином змінюється дисипація енергії.

Перелік посилань

1. Q. Gan, Z. Fu, Y.J. Ding, F.J. Bartoli, Ultrawide-bandwidth slow-light system based on THz plasmonic graded metallic grating structures, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008)256803.
2. Малишев В.Ю., Зависляк І.В., Мелков Г.А., Попов М.О., Прокопенко О.В. Мікрохвильові магнон-плазмон-поляритони в структурі феромагнітний метал - екранований діелектрик. *Український фізичний журнал.* – 2020. – Т. 65, № 10. – С. 932-941.
3. Іванюта О. М. Методи підвищення власної добротності резонатора поверхневої електромагнітної хвилі / О. М. Іванюта, О. В. Прокопенко. — *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки.* – 2007. – №. – С. 248–252.
4. Іванюта О.М. Вплив діелектричних підкладинок на добротність напівхвильового резонатора поверхневої хвилі / О.М. Іванюта [та ін.]. — *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки.* – 2002. – No 2. – С. 328-336.
5. Melkov G.A. Rarefaction of the natural oscillation spectrum of a surface wave resonator / G.A. Melkov, A.V. Prokopenko, V.N. Raksha. — *Radio electronics and communications systems.* – 2004. – Vol. 47. – No.1. – P. 20 – 22.
6. Г.А. Мелков, Ю.В. Єгоров О.М. Іванюта, В.Ю. Малишев. Мікрохвильові резонатори на поверхневій хвилі. *Вісник Київського ун-ту. Сер.: фіз.-мат.науки*, 3, – P. 334 - 338 (1998).
7. G.A. Melkov, Y.V. Egorov, O.M. Ivanyuta, V.Y. Malyshev, H.K. Zeng, Kh. Wu, J.Y. Juang. HTS Surface Wave Resonators. *J. Supercond.* 13, 95 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1007734428003>
8. Г.А. Мелков, Ю.В. Єгоров О.М. Іванюта, В.Ю. Малишев. Чвертьхвильові резонатори на поверхневій хвилі. *Вісник Київського ун-ту. Сер.: фіз.-мат. науки* 2, – P. 395 (1999).
9. Melkov G.A., Egorov Y.V., Ivanyuta A.N., Malyshev V.Yu. Surface Wave HTS Resonators // *Proceedings of the Third International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Sub-millimeter Waves” (MSMW 1998, September 15-17, 1998).* – V1. – Kharkov (Ukraine). – 1998. – P. 625-628.

10. Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities / [Armelles G., Cebollada A., García-Martín A., González M. U.] — Advanced Optical Materials
11. R. Ritchie, Plasma losses by fast electrons in thin films, *Phys. Rev.* 106 (1957) 874.
12. Малишев В.Ю. Мікрохвильові властивості магнітокерованих пристроїв на основі резонатора поверхневої електромагнітної хвилі: дис.кандидата фіз.-мат. наук: Малишев Володимир Юрійович 01.04.03 — К., 2021. — 158 с.
13. Temnov, V. V. et al. *Nature Photon.* 4, 107–111 (2010).
14. Hermann, C. et al. *Phys. Rev. B* 64, 235422 (2001).
15. Sepúlveda, B., Calle, A., Lechuga, L. M. & Armelles, G. *Opt. Lett.* 31, 1085–1087 (2006).
16. Hillebrands, B. & Fassbender, J. *Nature* 418, 493–495 (2002).
17. ГКЧ 52, 53, 54, 57, 59, 60, 61. Генераторы качающейся частоты: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — 0.221.002. ТО.
18. ГКЧ 52, 53, 54, 57, 59, 60, 61. Генераторы качающейся частоты: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — 0.221.002. ТО.
19. Измеритель магнитной индукции Ш1-8: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — 1984.
20. Индикатор КСВН и ослабления Я2Р-67: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — 2.043.030. ТО.