

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

Методичні вказівки  
до виконання курсового проекту  
для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування»,  
професійного спрямування «Прилади і системи неруйнівного контролю»  
(частина 1)

*Рекомендовано вченою радою  
приладобудівного факультету  
(протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ р.)*

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2016

**Електромагнітні методи неруйнівного контролю:** Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», професійного спрямування «Прилади і системи неруйнівного контролю» денної форми навчання (частина 1) [Текст] / Уклад.: А. Г. Протасов, Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – \_\_\_\_ с.

Методичні вказівки призначено для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», професійного спрямування «Прилади і системи неруйнівного контролю» денної форми навчання. У методичних вказівках наведено мету і завдання проекту, його зміст та обсяг, а також типові завдання. Розглянуто організаційні питання роботи над проектом, послідовність та методику його виконання, наведено вимоги щодо оформлення та процесу захисту готового проекту.

Навчальне електронне мережне видання

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Методичні вказівки

до виконання курсового проекту

для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування»,  
професійного спрямування «Прилади і системи неруйнівного контролю»  
(частина 1)

Укладачі: *Протасов Анатолій Георгійович, д.п.н., доцент*  
*Куц Юрій Васильович, д.т.н., професор*  
*Лисенко Юлія Юріївна, асистент*

Відповідальний  
редактор: *Петрик В.Ф., к.т.н., доцент*

Рецензент: *Єременко В.С., к.т.н., доцент*

*За редакцією укладачів*

ЗМІСТ	стр.
ВСТУП .....	4
1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	5
2. ТИПОВІ ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЕКТ .....	6
2.1. Ферозондовий вимірювач напруженості магнітного поля .....	6
2.2. Ферозондовий вимірювач градієнта напруженості магнітного поля .....	7
3. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	8
4. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ .....	8
5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ .....	9
5.1. Короткі теоретичні відомості про ферозондові прилади .....	10
5.2. Методика розрахунку диференціального ферозонду з позовжнім збудженням .....	19
5.2.1. Вибір матеріалу осердь та їх геометричних розмірів.....	20
5.2.2. Вибір частоти струму збудження .....	20
5.2.3. Розрахунок вимірювальної котушки .....	20
5.2.4. Розрахунок збуджуючої котушки .....	24
5.2.5 Розрахунок граничного струму збудження (намагнічування) .....	25
5.2.6 Порядок розрахунку ферозонду .....	26
5.3. Структурний розрахунок ферозондових приладів .....	27
5.4. Аналіз похибок ферозондових приладів.....	34
6. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЕКТУ.....	35
7. ВКАЗІВКИ ПРО ПОРЯДОК ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ .....	36
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	37
ДОДАТОК 1. Магнітні властивості холоднокатаної стрічки з найвищою магнітною проникністю у слабких магнітних полях .....	39
ДОДАТОК 2. Мідний дріт для намотування котушок .....	40
ДОДАТОК 3. Вивід формули для визначення ефективного значення абсолютної диферентної магнітної проникності осердя ферозонда.....	42

## ВСТУП

Курсовий проект є окремим кредитним модулем дисципліни «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» та відноситься до самостійної творчої роботи студента. Метою виконання курсового проекту є закріплення, поглиблення та систематизування знань, одержаних студентами за період навчання, а також формування у студентів вміння проводити навчально-наукові дослідження, інженерні розрахунки, формування навичок творчої індивідуальної роботи, опанування загальними та спеціальними методами сучасних наукових досліджень.

Курсовий проект з дисципліни «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» спрямований на вирішення конкретних фахових задач у сфері проектування та розробки приладів електромагнітного неруйнівного контролю. Під час виконання проекту майбутній фахівець має продемонструвати глибоке розуміння матеріалів отриманих на лекціях, інформації викладеної у підручниках, навчальних посібниках та публікаціях в технічних журналах, та провести критичний аргументований аналіз опрацьованого матеріалу.

Основним завданням даних методичних вказівок до виконання курсового проекту є своєчасне ознайомлення студентів з тематикою курсового проекту, переліком, змістом та об'ємом необхідних розділів, етапами роботи над проектом, правилами оформлення пояснювальної записки та графічної частини, умовами оцінювання готового проекту.

В даних методичних вказівках розглянуто методику розрахунку ферозондових приладів для магнітного неруйнівного контролю, яка буде корисна під час курсового та дипломного проектування студентам спеціальності «Прилади і системи неруйнівного контролю» та інших споріднених спеціальностей приладобудівного спрямування.

## 1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект з дисципліни «Електромагнітні методи неруйнівного контролю» є завершальним етапом її вивчення та сприяє набуттю студентами навичок розрахунку типових перетворювачів та електричних схем оброблення інформаційних сигналів у приладах для електромагнітного неруйнівного контролю.

Основна мета виконання курсового проекту - закріпити та поглибити теоретичні знання, одержані на лекціях, набутти практичні навички самостійного теоретичного дослідження, розрахунку перетворювачів різних типів, проектування конструкції перетворювачів, структурних та функціональних схем приладів електромагнітного неруйнівного контролю.

Головні завдання курсового проекту у структурі підготовки фахівця:

- набутти навички користування нормативною, довідковою, бібліографічною літературою;
- розвинути навички самостійної роботи з навчальною та науковою літературою за профілем дисципліни;
- закріпити знання щодо методів розрахунку й проектування первинних перетворювачів для неруйнівного контролю;
- набутти знання принципів побудови структурних та функціональних схем приладів неруйнівного контролю.

Завдання на курсовий проект видається протягом першого тижня другого семестра викладання дисципліни.

Орієнтовний час закінчення роботи студента над курсовим проектом складає 12 тижнів з моменту видачі завдання, але не пізніше, ніж за два тижні до початку екзаменаційної сесії. Регулярна, покрокова постійна робота над проектом протягом відведеного терміну - необхідна умова високої якості його виконання.

Загальний контроль за видачею завдань, ходом курсового проектування здійснює керівник проекту, який складає графік консультацій і подає відомості про роботу студентів завідувачу кафедри. Явка студентів до керівника курсового проектування за графіком консультацій обов'язкова. Консультації проводяться в години, визначені графіком, але не рідше одного разу на тиждень.

Згідно положення про рейтингову систему оцінювання оцінка за курсовий проект має дві складові. Перша (стартова) характеризує роботу студента під час курсового проектування та її результат, якість пояснювальної записки та графічного матеріалу. Друга складова характеризує якість захисту студентом курсового проекту.

Проект оцінюється керівником та членами комісії, визначеними на засіданні кафедри. Узгоджену загальну оцінку виставляють у відомість і на титульний лист пояснювальної записки.

При оцінці проектів враховується якість виконання, оригінальність рішень, глибина доповіді та відповідей на запитання, своєчасність захисту готового проекту, намагання студента підкріпити свої розрахунки результатами експериментальних досліджень виконаних в лабораторіях кафедри, представленням отриманих результатів у доповідях на студентських наукових конференціях, публікаціях.

Курсові проекти, що не представлені в термін і не затверджені керівником курсового проектування, представляються до захисту тільки з дозволу завідувача кафедри.

## 2. ТИПОВІ ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

### 2.1. Ферозондовий вимірювач напруженості магнітного поля

Вихідні дані для виконання розрахунку диференціального ферозонду з поздовжнім збудженням за схемою полеміра наведені в табл. 1.

Таблица 1.

Вихідні дані для розрахунку ферозондів за схемою полеміра

№ завд.	Тип ферозонду	Форма осердя	Діаметр (товщина) осердя, мм	Діапазон вимірюваним напруженості магн. поля, $A/m$	Чутливість ферозонда по 2-й гармоніці, $\frac{mB \cdot m}{A}$	Відносна апаратура похибка, %
1	2	3	4	5	6	7
1	Диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням (за схемою полеміра)	○	0,05	10÷1000	$5 \cdot 10^{-2}$	1
2		□	0,1			
3		○	0,2		$10^{-1}$	1,5
4		□	0,05			
5		○	0,05	100÷3000	$10^{-3}$	2
6		□	0,1		$5 \cdot 10^{-3}$	
7		○	0,15		$5 \cdot 10^{-2}$	
8		□	0,2			

1	2	3	4	5	6	7
9		○	0,05	50÷1500	$2 \cdot 10^{-2}$	1,5
10		□	0,08			
11		○	0,1			
12		□	0,15			

## 2.2. Ферозондовий вимірювач градієнта напруженості магнітного поля

Вихідні дані для виконання розрахунку диференціального ферозонду з поздовжнім збудженням за схемою градієнтміра наведені в табл. 2.

Таблиця 2.

Вихідні дані для розрахунку ферозондів за схемою градієнтміра

№ завд.	Тип ферозонду	Форма осердя	Діаметр (товщина) осердя, мм	Відстань між осердиями, мм	Градієнт напруженості магн. поля, $A/m$	Чутливість ферозонда по 2-й гармоніці, $\frac{mB \cdot m}{A}$	Відносна апаратура похибка, %
1	Диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням (за схемою градієнта)	○	0,05	1,5	0,1÷10	$10^{-2}$	4
2		□	0,1				
3		○	0,15		1÷100	$10^{-3}$	2,5
4		□	0,2				
5		○	0,25		0,5÷50	$5 \cdot 10^{-3}$	
6		□	0,35				
7		○	0,05	2,5	0,1÷10	$10^{-2}$	4
8		□	0,1				
9		○	0,15		0,5÷50	$10^{-3}$	2,5
10		□	0,2				
11		○	0,25		1÷100	$5 \cdot 10^{-3}$	
12		□	0,35				

### 3. СКЛАД, ОБСЯГ І СТРУКТУРА КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект оформлюється у вигляді розрахунково – пояснювальної записки (20...30 сторінок тексту формату А4) та графічної частини (до трьох листів формату А1).

До складу записки входять: титульний лист; завдання на курсове проектування; анотація; зміст; огляд сучасних методів та засобів розв'язання поставленої задачі; розрахункова частина; опис роботи структурної та функціональної схем; розрахунок електричної схеми приладу; висновки до курсового проекту та список використаної літератури, додатки.

Розрахунково-пояснювальну записку та графічну частину проекту оформлюють у відповідності до вимог стандартів, ЄСКД та ДСТУ з врахуванням специфіки курсового проектування.

### 4. ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Анотація повинна відображати основний зміст курсового проекту і містити:

- відомості про об'єм проекту, кількість ілюстрацій, та таблиць в пояснювальній записці, об'єм додатків та кількість використаних інформаційних джерел;
- перелік основних слів, характерних для змісту проекту;
- текст анотації, яка повинна відображати суть виконаної роботи, її мету, об'єкт, місце, методи і результати дослідження, короткі висновки відносно особливостей, ефективності та можливості застосування одержаних результатів.

Анотація до проекту виконується трьома мовами (українською, російською та іноземною, що вивчається студентом в університеті) по 650 знаків без урахування пробілів.

На початку текстової частини пояснювальної записки розміщують її зміст. Зміст записки поділяють на розділи, а кожен розділ на підрозділи. Розділи повинні мати порядкові номери, що позначаються арабськими цифрами з крапкою. Підрозділи повинні мати порядкові номери в межах кожного розділу. Номери підрозділів складаються з номеру розділу та підрозділу, розділених крапкою. В

кінці номеру підрозділу також повинна ставитися крапка. Номер пункту повинен складатися з номеру розділу, підрозділу, та пункту, розділених крапками.

Найменування розділів та підрозділів повинні бути короткими, відповідати змісту та записуватися у вигляді заголовків прописними літерами. Переноси слів у заголовках не допускаються. Крапки в кінці заголовку не ставляться.

Аркуші пояснювальної записки нумеруються в наступному порядку: 1 – титульний лист, 2 – завдання на курсову роботу, 3 – анотація українською, 4 – анотація російською, 5 – анотація англійською, 6 та далі аркуші пояснювальної записки в порядку, який вказаний у змісті.

Всі ілюстрації, які розміщені в записці, нумеруються арабськими цифрами, наприклад: рис. 1, рис. 2, рис. 5 і тощо. В тексті записки даються посилання на ілюстрації по типу «рис. 2», при повторному згадуванні ілюстрації посилання дається зі скороченим словом «дивись», наприклад: «див. рис. 7».

За необхідності представлення даних у таблицях, самі таблиці необхідно подавати з назвою та нумерацією арабськими цифрами в межах усєї пояснювальної записки. Над правим верхнім кутом таблиці розміщується напис «Таблиця» з вказівкою порядкового номеру таблиці. На всі таблиці повинні бути посилання в тексті пояснювальної записки. Якщо цифрові дані в графах таблиці мають різну розмірність, її вказують в заголовку кожної графи. Якщо параметри таблиці мають тільки одну розмірність (наприклад: міліметри), скорочене позначення одинці виміру (мм) розміщується над таблицею.

На обкладинці пояснювальної таблиці повинні бути вказані: інститут, кафедра, тема курсового проекту, прізвище та ініціали студента, курс, група, прізвище та ініціали керівника курсового проекту та навчальний рік.

У висновках до курсового проекту підводяться підсумки з усіх висвітлених питань, визначаються шляхи і напрями вирішення проблемних аспектів теми. Рекомендації можуть бути розроблені студентом як самостійно на підставі практичного досвіду, так і через узагальнення пропозицій, що містяться у літературних джерелах. Обсяг висновків 1-2 сторінки.

## 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Ферозондові прилади широко використовуються в магнітному неруйнівному контролі не тільки для вимірювання параметрів магнітних полів, але й для дефектоскопії виробів з феромагнітних матеріалів. Це обумовлено

тим, що магнітне поле попередньо намагніченого об'єкта контролю спотворюється дефектами останнього (поверхневими та підповерхневими тріщинами, порожнинами, сторонніми включеннями тощо). Внаслідок цього виникає можливість локалізації дефектів за результатами аналізу збурень магнітного поля об'єкта контролю.

Основою ферозондових приладів є первинний перетворювач – ферозонд, який перетворює напруженість магнітного поля у зручний для подальшої оброблення параметр – амплітуду змінної електричної напруги. Винахід і початок дослідження ферозонда відноситься до 30-40-х років минулого століття і пов'язаний з іменами німецьких вчених К. Ашенбренера і Г.Губо, які запропонували найпростішу конструкцію ферозонда з кільцевим осердям [1–4]. Пізніше німецький вчений Ф. Ферстер запропонував конструкцію з стержнями. Незалежно від нього проводив дослідження у цьому напрямі радянський учений А. Халілеев. Значний внесок у розвиток теорії ферозондів зробили й інші радянські вчені – Р.І. Янус, Л.Х. Фрідман, В.І. Дрожжина, Ю.В. Афанасьєв та ін. Відомий фізик В.К. Аркадьєв зробив у теорію магнетизму та магнітних вимірювань вагомий внесок. Він одним з перших вказав на відмінність між магнітними проникностями речовини, форми і тіла. На основі його досліджень М.А. Розенблат запропонував аналітичні формули для розрахунку магнітних проникностей та коефіцієнтів розмагнічування феромагнітних тіл кінцевих розмірів.

### 5.1. Короткі теоретичні відомості про ферозондові прилади

Ферозонди – це магніточутливі магнітотуляційні перетворювачі, в яких реалізується процес взаємодії двох полів – зовнішнього вимірюваного і власного поля збудження [3, 5 – 7].

Принцип роботи ферозондів оснований на використанні явища зміни магнітного стану феромагнетика, що намагнічується змінним магнітним полем збудження. Існує декілька різновидів ферозондів, які відрізняються способом збудження власного поля (диференціальним і недиференціальним), просторовою орієнтацією магнітних полів збудження (ферозонди з поздовжнім і поперечним збудженням) та формою феромагнітного осердя (стержневі, кільцеві, трубчасті) [7, 8].

Найпростіший ферозонд (рис. 1) – недиференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням, складається із осердя, виконаного із магнітом'якого

матеріалу з двома обмотками – збуджуючою з числом витків  $W_1$  та вимірювальною з витками  $W_2$ .

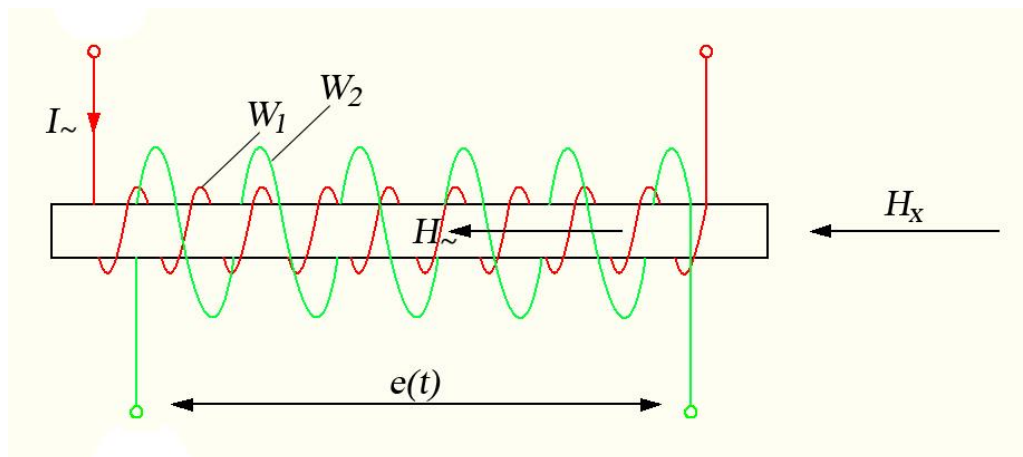


Рис. 1. Типовий недиференціальний ферозонд

Нагадаємо, що магнітом'які матеріали характеризуються високим значенням початкової і максимальної магнітної проникності та малої коерцитивної сили, здатні намагнічуватись до насичення в слабких магнітних полях і мають малі витрати на перемагнічування. Обмотка збудження живиться змінним струмом амплітуди  $I_{\max}$  достатньої для того, щоби довести осердя до стану близького до насичення. У вимірювальній обмотці такого ферозонда наводиться електрорушійна сила (ЕРС):

$$e(t) = -W_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = -W_2 S_0 \frac{dB(t)}{dt} = -W_2 S_0 H \frac{d\mu(t)}{dt}, \quad (1)$$

де  $W_2$  – число витків вимірювальної обмотки,

$\Phi$  – магнітний потік осердя,

$B$  – магнітна індукція осердя,

$S_0$  – площа поперечного перерізу осердя,

$\mu$  – абсолютна магнітна проникність осердя.

Формула (1) складена з урахуванням того, що за межами осердя магнітний потік практично дорівнює нулю. Такий ферозонд має ряд вад, найсуттєвішою з яких є та, що вихідна ЕРС залежить не тільки від напруженості  $H_x$  вимірюваного поля, але й від напруженості  $H_z$  поля збудження.

Розглянемо диференціальний ферозонд з поздовжнім збудженням (рис. 2).

Він має два ідентичних пермалоевих осердя (пермалой – це сплав Ni і Fe) з нанесеними на них обмотками намагнічування (збудження)  $W_1'$  та  $W_1''$ , які увімкнені послідовно назустріч одна одній і разом складають обмотку  $W_1$ .

Вимірювальна обмотка з числом витків  $W_2$  є спільною для обох осердь. Амплітудне значення напруженості  $H_{\sim}$  поля збудження повинно бути значно більшим напруженості  $H_x$  постійного досліджуваного поля і достатнім для намагнічування осердя до стану насичення.

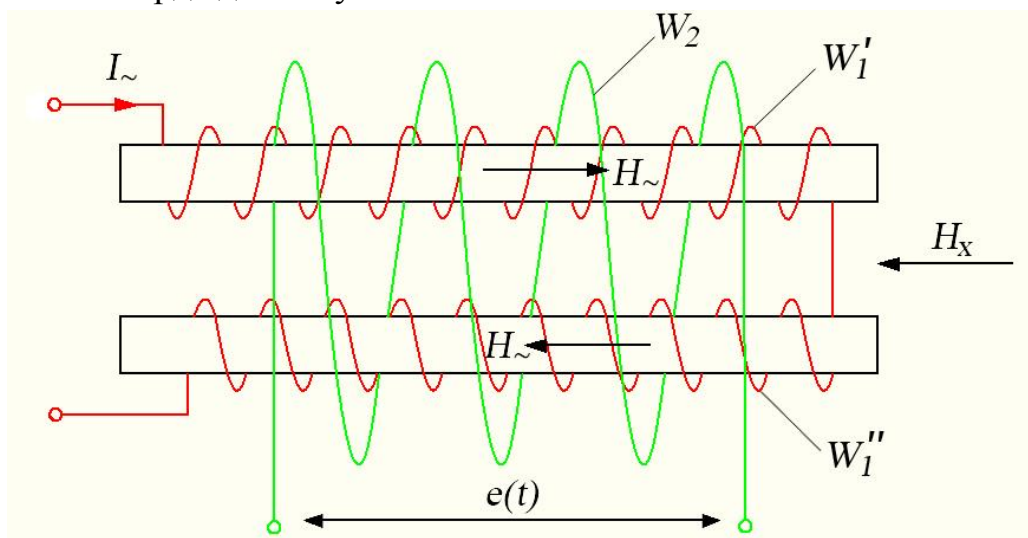


Рис. 2. Типовий диференціальний ферозонд

За відсутності досліджуваного поля ( $H_x=0$ ) на кожне з осердь діє поле  $H_{\sim}$  але в результаті зустрічного включення  $W_1'$  та  $W_1''$  ЕРС на виході вимірювальної обмотки дорівнює нулю. За наявності досліджуваного поля ( $H_x \neq 0$ ) на осердя ферозонда діють магнітні поля напруженістю  $(H_{\sim} - H_x)$  та  $(H_{\sim} + H_x)$ . Оскільки напруженості магнітного поля осердь дещо відрізняються, на виході вимірювальної обмотки наводиться ЕРС пропорційна  $H_x$  (тобто пропорційна поздовжній складовій вимірюваного поля).

Виведемо рівняння вимірювання для диференційного ферозонда. Оскільки у випадку намагнічування осердь до стану насичення повинна виконуватися нерівність  $H_x \ll H_{\sim}$ , залежність  $B(H)$  в кожному з осердь в точці  $(H_{\sim} + H_x)$ , за умови безперервності функції  $B(H)$  на інтервалі  $(H_{\sim} - H_x, H_{\sim} + H_x)$  та наявності всіх похідних до  $n$ -ої включно, можна представити рядом Тейлора. Обмежуючись першими трьома членами ряду визначимо магнітні індукції в осердях.

$$B_1(t) = B(H_{\sim}(t) + H_x) \approx B(H_{\sim}) + H_x \frac{dB(t)}{dH_{\sim}} + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d^2 B(t)}{dH_{\sim}^2}, \quad (2)$$

$$B_2(t) = B(H_{\sim}(t) - H_x) \approx B(H_{\sim}) - H_x \frac{dB(t)}{dH_{\sim}} + \frac{1}{2} H_x^2 \frac{d^2 B(t)}{dH_{\sim}^2}. \quad (3)$$

Результуюча дія магнітного потоку на вимірювальну обмотку  $W_2$  оцінюється як

$$\Phi_{\text{рез}}(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t) = S_o(B_1(t) - B_2(t)) = 2S_o H_x \frac{dB(t)}{dH} = 2S_o H_x \mu_d(t).$$

Тоді індукована в обмотці  $W_2$  ЕРС дорівнює:

$$e_2(t) = -\frac{\partial \Psi_{\text{рез}}}{dt} = -W_2 \frac{d\Phi_{\text{рез}}}{dt} = -2W_2 S_o H_x \frac{d\mu_d(t)}{dt}, \quad (4)$$

де  $\mu_d$  – диференціальна магнітна проникність осердя.

Вираз (5) свідчить про те, що ЕРС лінійно залежить від напруженості досліджуваного постійного магнітного поля і швидкості зміни диференціальної магнітної проникності. Звідси витікає, що для нормальної роботи ферозонда необхідно виконати умову  $\frac{d\mu_d}{dt} \neq 0$ .

Аналітична залежність між  $\mu_d$  і нормальною (недиференціальною) магнітною проникністю з урахуванням відомого співвідношення  $B = \mu H$  дорівнює

$$\mu_d(H) = \mu + H \frac{d\mu}{dH}. \quad (5)$$

Вона свідчить, що  $\mu_d = \mu$  тільки тоді, коли  $H=0$  чи  $\mu = \text{const}$  (себто в слабких магнітних полях); в усіх інших випадках  $\mu_d \neq \mu$ . Крім того залежність  $\mu_d(H)$  характеризується значно більшою нелінійністю, ніж залежність  $\mu(H)$ . Співпадаючи з  $\mu$  в слабких магнітних полях,  $\mu_d$  різко зменшується для насиченого стану осердя. Залежність  $\mu_d = f(H)$  зображена на рис. 3.

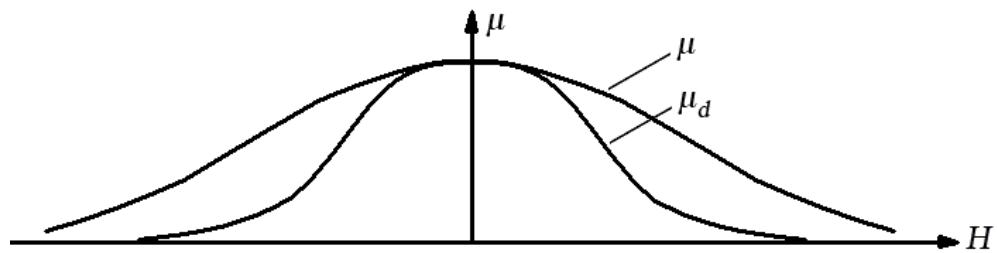


Рис. 3. Залежність магнітної проникності осердя від напруженості поля

Отримане рівняння вимірювання (4) має загальний характер і мало придатне для інженерних розрахунків, оскільки точне обчислення похідної  $d\mu_d/dt$  занадто складне. Тому в практичних розрахунках ферозондів похідну  $d\mu_d/dt$  замінюють її наближеними виразами [9]. З метою визначення таких наближень розглянемо роботу ферозонда, використавши для цього наведені на

рис. 4. епюри напруг. Якщо осердя ферозонду збуджуються синусоїдальним змінним струмом (рис. 4 б), достатнім для їх насичення, то характер зміни в часі  $\mu_d(\omega t)$  буде мати вигляд, наведений на рис. 4 в (залежність  $\mu_d(\omega t)$  отримана геометричною побудовою з кривих рис. 4 а, б).

На рис. 4 г зображена залежність  $e(\omega t)$  (для одного осердя), яка пропорційна похідній  $d\mu_d/dt$ . З рис. 4 г видно, що в точках  $\omega t = (\pi/2)k$ ,  $k=0,1,2,3,\dots$ ,  $e(\omega t)=0$  оскільки похідна  $d\mu_d/dt=0$ , а в точках  $\omega t = k\pi/2 \pm \theta$  ( $\theta$  – т.з. кут насичення осердь)  $e(\omega t)$  наближається до екстремальних значень, оскільки похідна  $d\mu_d/dt$  приймає свої максимальні і мінімальні значення. З цього приводу форма залежності  $e(\omega t)$ , навіть за наявності близького до нуля значення  $H_x$ , відмінна від синусоїдальної і має вигляд гострих піків.

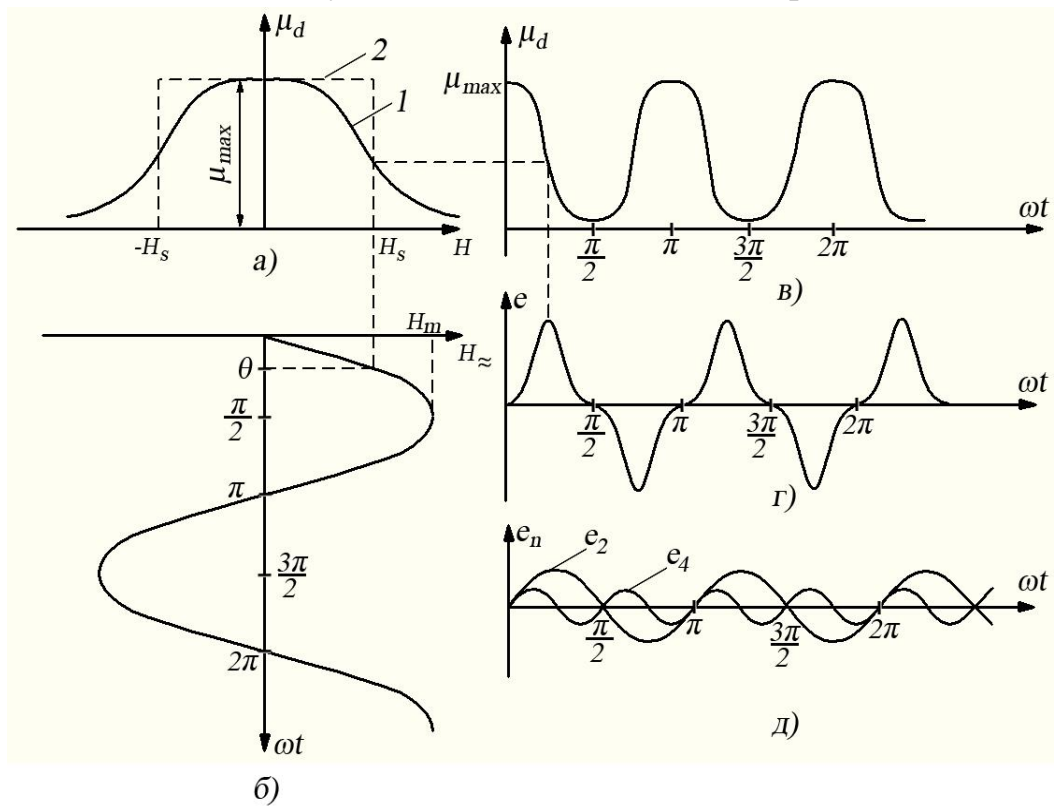


Рис. 4. Епюри напруг ферозонду

Оскільки функція  $\mu_d(H)$  парна, то криві  $\mu_d(\omega t)$  і  $e(\omega t)$  містять тільки парні гармоніки. Про це свідчать і криві на рис 4 в, г, оскільки частоти їх зміни перевищують в два рази частоту напруженості магнітного поля збудження  $H_{\sim}$  (рис. 4 б). Враховуючи це та умову  $H_{\sim} \gg H_x$  часову залежність диференціальної магнітної проникності представимо рядом Фур'є

$$\mu_d(\omega t) = \mu_{cp} + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_{2n} \cos 2n\omega t, \quad (6)$$

де  $\mu_{cp}$  – середнє значення (стала складова) проникності  $\mu_d(\omega t)$ ,

$$\mu_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d(\omega t) d\omega t, \quad (7)$$

$\mu_{2n}$  – амплітуди парних гармонік ( $n = 1, 2, \dots$ ) диференціальної магнітної проникності  $\mu_d(\omega t)$

$$\mu_{2n} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d(\omega t) \cos 2n\omega t d\omega t. \quad (8)$$

З урахуванням (6-8) ЕРС на клеммах вимірювальної котушки дорівнює

$$e(t) = 4\omega W_2 S_0 H_x \sum_{n=1}^{\infty} n \mu_{2n} \sin(2n\omega t). \quad (9)$$

Амплітуди парних гармонік диференціальної магнітної проникності (коефіцієнти розкладу Фур'є) можна обчислити, якщо відомі функціональні залежності  $B(H)$  чи  $\mu_d(H)$ . Оскільки аналітичний вираз цих залежностей невідомий, вдаються до апроксимації  $\mu_d(H)$  (рис. 4 а) ламаною лінією П-подібної форми (рис. 4 а, крива 2): на інтервалі  $(-H_s, H_s)$   $\mu_d = \mu_{max}$  і є сталою величиною, а поза межами цього інтервалу  $\mu_d = 0$  [1]. Тут  $H_s$  – це напруженість магнітного поля насичення, яка досягається для кута насичення  $\theta$ . Кут  $\theta$  визначається за вельми наближеними формулам, які витікають із рис. 4.б:

$$\frac{H_s}{H_m} \approx \frac{\sin \theta}{\sin 0.5\pi} = \sin \theta, \quad (10)$$

або

$$\frac{H_s}{H_m} \approx \frac{2\theta}{\pi}. \quad (11)$$

Для визначення коефіцієнтів  $\mu_{2n}$  та  $\mu_{cp}$  скористаємось апроксимацією (11). З урахуванням переходу від аргументу  $\omega t$  до нової змінної  $H$  отримаємо

$$\mu_{2n} \approx \frac{\mu_m}{H_m} \int_{-H_m}^{H_m} \cos \frac{\pi n H}{H_m} dH = \frac{2\mu_m}{\pi n} \sin \left( \pi n \frac{H_s}{H_m} \right) = \frac{2\mu_m}{\pi n} \sin(2n\theta), \quad (12)$$

$$\mu_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{-H_s}^{H_s} \mu_{max} \frac{\pi}{2H_m} dH = \frac{2\mu_{max}}{\pi n} \sin \left( \pi n \frac{H_s}{H_m} \right) = \frac{2\mu_{max}}{\pi} \theta. \quad (13)$$

З урахуванням (12) вираз (9) вихідної ЕРС записується у вигляді

$$e(t) = 16fW_2S_o\mu_{max}H_x \sum_{n=1}^{\infty} \sin(2n\theta)\sin(2n\omega t). \quad (14)$$

Для вимірювання вихідної ЕРС зазвичай використовують тільки одну другу гармоніку У цьому випадку амплітуда вихідної ЕРС становить

$$E_2 = 16fW_2S_o\mu_{max}H_x \sin 2\theta, \quad (15)$$

а чутливість ферозонду по другій гармоніці

$$S_{2n} = \frac{dE_2}{dH_x} = 16fW_2S_o\mu_{max} \sin(2\theta). \quad (16)$$

Формули (15), (16) набувають більш прийняттого вигляду, якщо зробити заміну  $\sin 2\theta = 2\sin \theta \cos \theta$  і урахувати апроксимацію (10). Тоді

$$E_2 = 32fW_2S_o\mu_{max} \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}, \quad (15^*)$$

$$S_2 = 32fW_2S_o\mu_{max} \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}. \quad (16^*)$$

В формулах (15\*), (16\*) введено безрозмірний коефіцієнт  $\varepsilon$ , який залежить від конструктивних параметрів ферозонда. Він визначається як добуток трьох коефіцієнтів,

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3, \quad (17)$$

де  $\varepsilon_1$  – коефіцієнт, який залежить від відстані між осердями,  $\varepsilon_2$  – коефіцієнт, який залежить від середнього діаметру вимірювальної обмотки,  $\varepsilon_3$  – коефіцієнт, який визначається шунтуючою дією осердь чи металевих частин конструкції ферозонда, які утворюють короткозамкнені витки по відношенню до вимірювальної обмотки.

Коефіцієнт  $\varepsilon_1$  у випадку  $\frac{l}{L} > 20$ , де  $l$  – довжина осердя,  $L$  – відстань між серединами осердь (рис 5) визначається за формулою

$$\varepsilon_1 = \frac{2 - \exp\left(-\frac{L}{V}\right)}{2}. \quad (18)$$

Для осердя з перерізом прямокутної форми параметр  $V$  визначається як

$$V = 2b \left( \ln \frac{kl}{b+h} - 1 \right), \quad (19)$$

де  $b$  – ширина поперечного перерізу осердя,  $h$  - його товщина,  $k$  - коефіцієнт, що залежить від форми осердя (вибирається з табл. 3).

Табл. 3

Форми осердя та коефіцієнти для них

Форма осердя	$k$	$c$
Еліпсоїд	4	0
Циліндр	2,4	0,8 - 0,85
Прямокутник	3,6	0,75

Для осердь циліндричної форми має  $b=h=d$  ( $d$  діаметр осердя), тому

$$V = 2d \left( \ln \frac{kl}{2d} - 1 \right). \quad (19^*)$$

Розмірність параметра  $dim[V] = [м]$ .

Коефіцієнт  $\varepsilon_2$  визначається за формулою

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{1.5 \left( \frac{d_{cp}}{l} \right)^2 + 1}}, \quad (20)$$

де  $d_{2cp}$  – середній діаметр вимірювальної обмотки. Числові значення середнього діаметру вибираються з простих геометричних міркувань. Для випадків осердь з прямокутним (рис. 5 а) і круглим (рис. 5 б) перерізами  $d_{2cp}$  обраховується відповідно як

$$d_{2cp} = \sqrt{b^2 + (a+h)^2} + (2 \div 3) \text{ (мм)}; \quad (21)$$

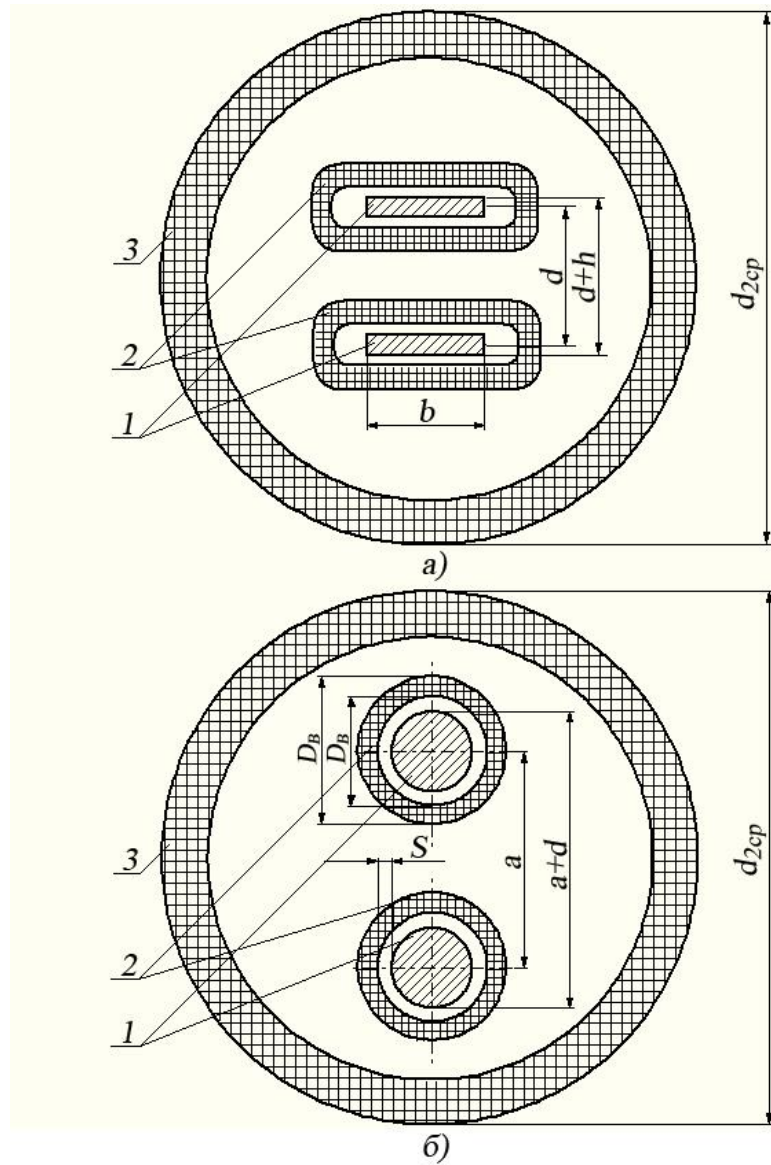
$$d_{2cp} = a + d + (2 \div 3) \text{ (мм)}; \quad (21^*)$$

Коефіцієнт  $\varepsilon_3$  може бути прирівняний до «1» оскільки у ферозондах, як правило, всі деталі крім осердь, виготовляються з непровідних (діелектричних) і немагнітних матеріалів.

З метою визначення умов, за яких досягається максимальна чутливість ферозонда, знайдемо максимум функції  $S_2 = f\left(\frac{H_s}{H_m}\right)$ . Вихідним є вираз (16').

Позначимо  $H_s/H_m = p$ , а  $32fW_2S_o\mu_{max}\varepsilon = k$ . Представимо рівняння чутливості ферозонда як

$$S_2 = kp\sqrt{1-p^2} = kp(1-p^2)^{0,5}.$$



1 – осердя, 2 – збуджуючі котушки, 3 – вимірювальні котушки  
 Рис. 5. Поперечний переріз ферозондів з різними осердями

Розв'язок рівняння  $\frac{dS_2}{dp} = k \left[ (1-p^2)^{0,5} + \frac{1}{2}(1-p^2)^{-0,5}(-2p) \right] = 0$  дає

результат:  $p = \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Отже максимальна чутливість ферозонда досягається для

$$\frac{H_m}{H_s} = \sqrt{2}.$$

Зазвичай амплітудне значення напруженості магнітного поля збудження ферозонда обирають з умови  $H_m > \sqrt{2}H_s$  для забезпечення стійкості роботи і низького рівня шумів. Згідно з цим в розрахунках ферозондів приймають

$$A = \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2} \in [0,19...0,314]. \quad (23)$$

В практиці неруйнівного контролю часто виникає потреба у вимірюванні не абсолютної напруженості  $H_x$  магнітного поля, а у визначенні нерівномірності розподілу поля. Така задача виникає, наприклад, в магнітній дефектоскопії під час пошуку дефектів за магнітними полями розсіювання останніх. Відомо, що зазвичай рівномірне магнітне поле заздалегідь намагніченого (бездефектного) об'єкта контролю різко змінюється безпосередньо над дефектом. Такі неоднорідності магнітного поля значно легше виявити вимірювачами, які дістали назву вимірювачів градієнту магнітного поля (рис. 6.а), або просто *градієнтномірів*.

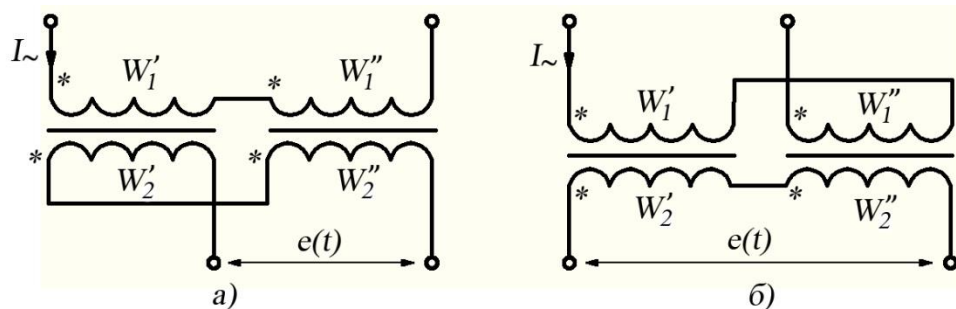


Рис. 6. Схеми вимірювачів градієнту магнітного поля

Такий ферозонд принципово не відрізняється від розглянутого вище і дістав назву *полеміра*. Єдина відмінність полягає у підключенні котушок: у градієнтномірі збуджуючі котушки включаються послідовно та узгоджено, а дві вимірювальні – послідовно назустріч (рис 6а); у *полеміра* (вимірювача напруженості магнітного поля) навпаки, збуджуючі котушки включені послідовно назустріч, а вимірювальні – послідовно узгоджено (рис. 6.б) Рівняння перетворення для градієнтноміра лишається практично незмінним з тією різницею, що у (15\*) замість  $H_x$  необхідно врахувати  $\Delta H_x = H_x'' - H_x'$  де  $H_x'', H_x'$  – напруженості контрольованого магнітного поля, що діють на осердя ферозонда.

## 5.2. Методика розрахунку диференціального ферозонду з поздовжнім збудженням

Вихідними параметрами для розрахунку, ферозонда є розміри та форма осердя, чутливість ферозонду по другій гармоніці та діапазон вимірюваних напруженостей (або градієнта напруженостей для дефектоскопа) магнітного поля.

### 5.2.1 Вибір матеріалу осердь та їх геометричних розмірів

Зазвичай осердя виготовляються із залізо-нікелевих сплавів, які характеризуються найбільшим значенням магнітної проникності і малим значенням коерцитивної сили  $H_c$ . Найбільш прийнятними для осердь ферозондів є сплави 80НХС, 79НМ, 79НМ-9 [1, 10]. Ці сплави дозволяють виготовляти осердя різної форми, мають прийнятну температурну стабільність і достатньо високий питомий електричний опір. Магнітні властивості цих сплавів наведені у додатку 1.

Якщо осердя стержневої форми, то рекомендується вибрати їх товщину  $h$  (або діаметр  $d$ ) з умови забезпечення конструктивної жорсткості не менше ніж 0,1 мм, а довжину  $l$  осердя – набагато більшою від  $h$ . Числове значення  $l$  доцільно вибирати як

$$l = (80 \dots 100)h.$$

### 5.2.2 Вибір частоти струму збудження

Товщина осердя  $h$  (або його діаметр  $d$ ) пов'язана з частотою струму збудження емпіричним співвідношенням

$$h \leq \frac{2 \dots 4}{\sqrt{f}}, \quad (24)$$

в якому не виконується співвідношення розмірностей: значення  $h$  підставляють у [мм], а значення  $f$  у [Гц]. З (24) вимога до частоти струму збудження набуває виду

$$f \leq (4 \dots 16)h^{-2}. \quad (24^*)$$

### 5.2.3 Розрахунок вимірювальної котушки

З умови розташування вимірювальної котушки в однорідному магнітному полі осердя вибирають аксіальну довжину  $l_2$  вимірювальної котушки

$$l_2 = (0,4 \dots 0,5)l. \quad (25)$$

Припускається, що вимірювальна обмотка розташовується на осердях симетрично відносно їх центрального поперечного перерізу. За умови дотримання цієї вимоги можна обчислити коефіцієнт  $N$  розмагнічування осердь

$$N = \frac{4S_o \left( \ln \frac{kl}{b+h} - 1 \right)}{\pi \left( l^2 - \frac{c}{3} l_2^2 \right)}, \quad (26)$$

де  $b$  - ширина осердя. Коефіцієнти  $k$  і  $c$ , які залежать від форми осердь, вибирають з табл. 3.

Для осердя циліндричної форми  $b=h=d$  тому

$$N = d^2 \frac{\ln \frac{kl}{2d} - 1}{l^2 - \frac{c}{3} l_2^2}, \quad (26^*)$$

Коефіцієнт  $N$  використовується для визначення відносної магнітної проникності осердя. Слід згадати, що магнітна проникність матеріалу відрізняється від магнітної проникності тіла кінцевих розмірів, виготовленого з того ж матеріалу. Це пов'язано з ефектом розмагнічування, який полягає у такому. У випадку намагнічування у зовнішньому постійному магнітному полі напруженістю  $H_x$  тіл що мають розімкнену форму, на кінцях тіл утворюються магнітні полюси, які створюють в тілі поле розмагнічування напруженістю  $H_p$  і яке діє назустріч  $H_x$ . Отже відносна магнітна проникність тіла (осердя) визначається

$$\mu_T^* = \frac{1}{\mu_o} \frac{B}{H_x} = \frac{1}{\mu_o} \frac{\mu H_i}{H_i + H_p} = \mu^* \frac{H_i}{H_i + H_p} = \mu^* \frac{1}{1 + NJ/H_i} = \mu^* \frac{1}{1 + N(\mu^* - 1)}, \quad (27)$$

де  $\mu_o = 4\pi 10^{-7}$  [Гн/м] – магнітна стала,

$H_I$  – напруженість магнітного поля в осерді,

$\mu = B/H_I$  – абсолютна магнітна проникність речовини осердя,

$\mu^* = \mu/\mu_o$  – відносна магнітна проникність речовини осердя.

Для виведення (27) використано відоме співвідношення

$$H_p \approx NJ \approx N\chi H_i \cong N(\mu^* - 1)H_i,$$

де  $J$  – намагніченність речовини,  $\chi$  – магнітна сприйнятливість.

З (27) витікає, що для феромагнетиків ( $\mu^* \gg 1$ ) у випадку дотримання вимоги  $N\mu^* \gg 1$  впливає, що

$$\mu_T^* \approx \frac{1}{N}. \quad (28)$$

Оскільки  $\mu^*$  для слабких полів практично співпадає з максимальним значенням відносної диференціальної магнітної проникності  $\mu_{d\max}^*$  (рис 3), то останню вимогу можна сформулювати наступним чином

$$N\mu_{d\max}^* \gg 1. \quad (29)$$

Значення  $\mu_{d\max}^*$  обирається для відповідних  $h$  та марки матеріалу по таблиці додатку 1.

Число витків вимірювальної обмотки можна обчислити скориставшись виразом (15)

$$W_2 = \frac{S_2}{32fS_o\epsilon\mu_T^*\mu_o \frac{H_s}{H_m} \sqrt{1 - \left(\frac{H_s}{H_m}\right)^2}}. \quad (30)$$

Результати розрахунку можна вважати задовільними, якщо  $200 < W_2 < 800$ .

Подальшим кроком у розрахунку вимірювальної котушки є обчислення її індуктивного опору  $X_2$ . Цей параметр набуває особливого значення для наступного узгодження ферозонда з електронним блоком обробки сигналів. Оскільки магнітна проникність осердя є величина змінна в часі (рис.4.в), то для визначення  $X_2$  необхідно використати ефективне значення індуктивності  $L_{2\text{еф}}$  цієї котушки

$$X_2 = 2\omega L_{2\text{еф}} = 4\pi f L_{2\text{еф}}. \quad (31)$$

Коефіцієнт 2 у (31) відбиває той факт, що вимірювання виконується на другій гармоніці відносно частоти струму збудження. Визначимо  $L_{2\text{еф}}$  виходячи з таких міркувань. Припустимо, що у вимірювальній котушці протікає струм  $I$ , який створює магнітний потік  $\Phi = W_2 I / R_m$ , де  $R_m = l_2 / 2\mu_{\text{еф}} S_o$  – магнітний опір магнітного кола вимірювальної котушки (враховано тільки ділянку магнітного кола з осердями),  $\mu_{\text{еф}}$  – ефективна абсолютна диференціальна магнітна проникність осердя. Звідси ефективне значення індуктивності вимірювальної котушки

$$L_{2\text{еф}} = \frac{W_2 \Phi \epsilon_1}{I} = \frac{W_2^2 \epsilon_1}{R_m} = \frac{2W_2^2 \epsilon_1 S_o \mu_{\text{еф}}}{l_2}. \quad (32)$$

В (32) введено коефіцієнт  $\epsilon_1$ , який враховує вплив на індуктивність взаємного розташування осердь та обчислюється за формулою (18).

Загальною формулою для визначення  $\mu_{\text{еф}}$  є вираз

$$\mu_{def} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d^2(\omega t) d(\omega t)}. \quad (33)$$

Підставивши в (33) вираз для  $\mu_d(\omega t)$  у вигляді ряду Тейлора (6) з коефіцієнтами (12) та (13), отримаємо

$$\mu_{def} = \frac{\mu_{max}}{\pi} \sqrt{2\pi\theta}. \quad (34)$$

Повний вивід формули (34) наведено у додатку 3.

З урахуванням того, що  $\mu_T^* = \mu_{max}/\mu_0$ , а ефективне значення відносної диференціальної магнітної проникності  $\mu_{def}^* = \mu_{def}/\mu_0$  маємо

$$\mu_{def}^* = \frac{\mu_T^*}{\pi} \sqrt{2\pi\theta}. \quad (34^*)$$

Взявши до уваги наближення (10) остаточно отримаємо

$$\mu_{def}^* = \frac{\mu_T^*}{\pi} \sqrt{2\pi \arcsin \frac{H_s}{H_m}}. \quad (34^{**})$$

Враховуючи (32) та (34<sup>\*\*</sup>) індуктивна складова опору вимірювальної котушки визначається як

$$X_2 = \frac{8fW_2^2 S_0 \mu_0 \mu_T^* \varepsilon_1}{l_2} \sqrt{2\pi \arcsin \frac{H_s}{H_m}} \quad (31^*)$$

Для розрахунку активної складової опору вимірювальної котушки треба, користуючись таблицями додатку 2, вибрати марку та діаметр мідного дроту. Доцільно обирати  $d_2 \leq 0,1$  мм. Значення активної складової опору котушки  $R_2$  обчислюється за формулою

$$R_2 = \frac{4\rho d_{2cp} W_2}{d_2^2}, \quad (35)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу дроту, яким намотана котушка, для міді  $\rho = 0,0175$  Ом мм<sup>2</sup>/м;  $d_{2cp}$  – середній діаметр вимірювальної котушки.

Нехтуючи ємнісною складовою опору котушки модуль комплексного опору котушки ( по другій гармоніці) визначається як

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}. \quad (36)$$

#### 5.2.4. Розрахунок збуджуючої котушки

Розрахунок збуджуючої котушки доцільно починати з визначення струму збудження. Вихідною величиною є індукція насичення  $B_s$  осердя, яку можна визначити з таблиці додатку 1. Оскільки  $B_s = \mu_0 \mu_T^* H_s$ , то

$$H_m = (3...5) H_s = \frac{(3...5) B_s}{\mu_0 \mu_T^*}. \quad (37)$$

Тоді ефективне значення струму збудження згідно із законом повного струму

$$I_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{H_m l_1}{\sqrt{2} W_1'} = \frac{(3...5) B_s l_1}{\sqrt{2} W_1' \mu_0 \mu_T^*}, \quad (38)$$

де  $W_1'$  – кількість витків обмотки збудження на одному осерді,  $l_1$  – аксіальна довжина збуджуючої котушки, як правило  $l_1 = l$ .

Число витків збуджуючої котушки доцільно вибирати з діапазону  $100 < W_1 < 500$ , а діаметр дроту  $0,1 \text{ мм} < d_1 < 0,25 \text{ мм}$ . Уточнити значення  $d_1$  можна після виконання теплового розрахунку котушки (див. п.2.5). Аналогічно (31\*) можна показати, що індуктивна складова опору збуджуючої котушки на частоті другої гармоніки струму збудження

$$X_1 = \frac{4 f W_1^2 S_o \mu_0 \mu_T^*}{l} \sqrt{2 \pi \arcsin \frac{H_s}{H_m}}. \quad (39)$$

Слід врахувати, що значення  $\mu_{T1}^*$  у (39) відрізняється від  $\mu_T^*$  у (34\*\*) оскільки максимальна довжина  $l_1$  котушок збудження дорівнює, або дещо перевищує довжину  $l$  осердь. У випадку коли  $l_1 = l$  відповідно до (26), (26\*), (28) матимемо:

а) для осердь з поперечним перерізом прямокутної форми

$$\mu_{T1}^* = \frac{\pi l^2 \left(1 - \frac{c}{3}\right)}{4bh \left(\ln \frac{kl}{b+h} - 1\right)}; \quad (40)$$

б) для осердь з поперечним перерізом круглої форми

$$N = \frac{l \left(1 - \frac{c}{3}\right)}{d^2 \left(\ln \frac{kl}{2d} - 1\right)}. \quad (40^*)$$

Активна складова опору збуджуючої котушки дорівнює

$$R_1 = \frac{4\rho d_{1cp} W_1}{d_1^2}, \quad (42)$$

де  $d_{1cp}$  – середній діаметр збуджуючої котушки.

Для осердь з прямокутною та круглою формами перерізів можна рекомендувати наступні його визначення

$$d_{1cp} = b + (0,5...1,5) \text{ мм}, \quad (42)$$

$$d_{1cp} = d + (0,5...1,5) \text{ мм}. \quad (42^*)$$

Модуль комплексного опору збуджуючої котушки

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad (43)$$

а ефективне значення робочої напруги на котушці збудження

$$U_{\text{еф}} = Z_1 I_{\text{еф}}. \quad (44)$$

Повна, активна та реактивна потужності, що витрачаються на збудження ферозонду дорівнюють відповідно

$$S = U_{\text{еф}} I_{\text{еф}}, \quad (45)$$

$$P = R_1 I_{\text{еф}}^2, \quad (46)$$

$$Q = X_1 I_{\text{еф}}^2. \quad (47)$$

### 5.2.5 Розрахунок граничного струму збудження (намагнічування)

Основною умовою відсутності перегріву збуджуючої котушки є умова

$$\vartheta \leq [\vartheta]_{\text{д}}, \quad (48)$$

де  $\vartheta$  – температура перегріву, яка визначається як різниця температур котушки  $t_k$  і середовища  $t_c$ , тобто  $\theta = t_k - t_c$ ,

$[\vartheta]_{\text{д}}$  – допустима температура перегріву, зазвичай  $[\theta]_{\text{д}} < 5^\circ\text{C}$ .

Температура  $\vartheta$  визначається як

$$\vartheta = \frac{P}{\lambda S_{\text{ох}}} = \frac{R_1 I_{\text{еф.гр}}^2}{\lambda S_{\text{ох}}}, \quad (49)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопередачі, який залежить від форми і конструкції котушки, її розміщення та вентиляції, зазвичай  $\lambda \in [8...12] \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}}$ ,  $S_{\text{ох}}$  – площа поверхні охолодження збуджуючої котушки.

З (49) можна отримати граничне значення струму збудження  $I_{\text{ef.гр}}$ .  
Значення робочого струму рекомендується обирати дещо нижче,  
 $I_{\text{ef}} = (0,85 \dots 0,95) I_{\text{ef.гр}}$

$$I_{\text{ef}} = (0,85 \dots 0,95) \sqrt{\frac{\lambda[\vartheta]_{\text{д}} S_{\text{ох}} d_1^2}{\rho d_{1\text{cp}} W_1}}. \quad (50)$$

Умову (50) можна використати для уточнення діаметру  $d_1$  дроту, яким намотується котушка збудження, або для обчислення кількості її витків якщо задано  $d_1$ .

Площа поверхні охолодження розраховується з геометричних міркувань. Як приклад розглянемо розрахунок  $S_{\text{ох}}$  для котушки збудження, зображеної на рис 5 б. Ця котушка уявляє собою порожній циліндр довжиною  $l$  з внутрішнім і зовнішнім діаметрами відповідно  $D_{\text{в}}$  і  $D_{\text{з}}$ . Нехтуючи поверхнею торців циліндра, і враховуючи, що ферозонд має два осердя з однаковими збуджуючими котушками, маємо

$$S_{\text{ох}} = 2\pi l (D_{\text{в}} + D_{\text{з}}) = 4\pi l (d + 2s + n d_{1\text{із}} + s(n-1)), \quad (51)$$

де  $S$  – товщина каркасу, на якому намотана котушка,  $d_{1\text{із}}$  – діаметр дроту з урахуванням ізоляційного покриття,  $n$  – число шарів намотки, в одному шарі укладається  $W_{1\text{ш}} = l/t$  витків,  $t$  – крок намотки ( $t \geq d_{1\text{із}}$ ), тому  $n \geq W_1/W_{1\text{ш}}$ ,  $s$  – товщина прокладок між шарами намотки.

### 5.2.6 Порядок розрахунку ферозонду

1. Вибір матеріалу осердя (додаток 1) та його геометричних розмірів  $h$ ,  $l$ ,  $b$ .
2. Розрахунок частоти струму збудження (24\*).
3. Вибір згідно з рекомендацією (25) довжини вимірювальної обмотки  $l_2$ .
4. Розрахунок коефіцієнту розмагнічування за формулами (26) чи (26\*).
5. Перевірка умови (29).
6. Визначення відносного значення магнітної проникності осердь за формулою (28).
7. Вибір співвідношення  $H_m/H_s$  та розрахунок величини  $A$  за формулою (23).
8. Вибір у відповідності до рекомендації  $l/a \geq 20$  відстані  $a$  між середніми площинами осердь та визначення середнього діаметру  $d_{2\text{cp}}$  вимірювальної обмотки (21), (21\*).
9. Розрахунок з (19) чи (19\*) параметра  $V$ ; коефіцієнт  $k$  вибрати з таблиці 1.
10. Розрахунок коефіцієнта  $\varepsilon_1$  (18).
11. Визначення коефіцієнта  $\varepsilon_2$  (20).

12. Обґрунтування коефіцієнту  $\varepsilon_3$ .
13. Розрахунок коефіцієнта  $\varepsilon$  (17).
14. Розрахунок числа витків вимірювальної обмотки  $W_2$  (30).
15. Розрахунок індуктивного опору вимірювальної обмотки  $X_2$  (31\*).
16. Вибір марки дроту вимірювальної обмотки і його діаметра  $d_2$ .
17. Розрахунок активного опору  $R_2$  вимірювальної обмотки (35).
18. Розрахунок модуля  $Z_2$  комплексного опору вимірювальної обмотки (36).
19. Вибір діаметра  $d_1$  марки дроту для обмотки збудження, а також діаметра цього дроту з ізоляцією з таблиці додатку 2.
20. Розрахунок ефективного значення  $I_{\text{еф}}$  струму збудження (38) для обраної заздалегідь кількості  $W_1$  витків збуджуючої котушки.
21. Перевірка виконання умови відсутності перегріву збуджуючої котушки (тепловий розрахунок) згідно з п.2.5. У випадку неузгодженості результатів розрахунків  $I_{\text{еф}}$  та  $I_{\text{еф.гр}}$  скорегувати значення  $d_1$  або  $W_1$  і повернутись до виконання п. 20.
22. Визначення відносної магнітної проникності  $\mu_T^*$  з (40) чи (40\*).
23. Розрахунок індуктивного опору збуджуючих котушок  $X_1$  (39).
24. Вибір середнього діаметра обмотки збудження (42, 42\*).
25. Розрахунок активного опору  $R_1$  обмотки збудження по (41).
26. Визначення модуля  $Z_1$  комплексного опору обмотки збудження.
27. Визначення ефективного значення робочої напруги  $U_{\text{еф}}$  (44).
28. Розрахунок повної  $S$  (45), активної  $P$  (46) та реактивної  $Q$  (47) потужностей, що витрачаються на збудження ферозонду.

### 5.3. Структурний розрахунок ферозондових приладів

Структурний розрахунок полягає у розробці схеми електричної структурної та формулюванні основних вимог до кожного окремого блока, який входить до складу визначеної структури. Вихідним для проектування схеми є рівняння перетворення (15\*), яке пов'язує напруженість  $H_x$  вимірюваного магнітного поля з амплітудою  $E_2$  другої гармоніки вихідної ЕРС. Отже вимірювальна частина схеми повинна забезпечити виділення другої гармоніки з вихідного сигналу ферозонда, її підсилення, детектування та виділення амплітудного (або ефективного, або середньовипрямленого) значення з метою подальшого вимірювання. Таким чином електронна частина приладу практично представляє собою селективний вольтметр з тією особливістю, що він має бути

проградуваний в одиницях вимірювання напруженості магнітного поля, тобто в [А/м]. Зазначені вище перетворення вимірювального сигналу в основному і визначають структуру приладу рис. 7а.

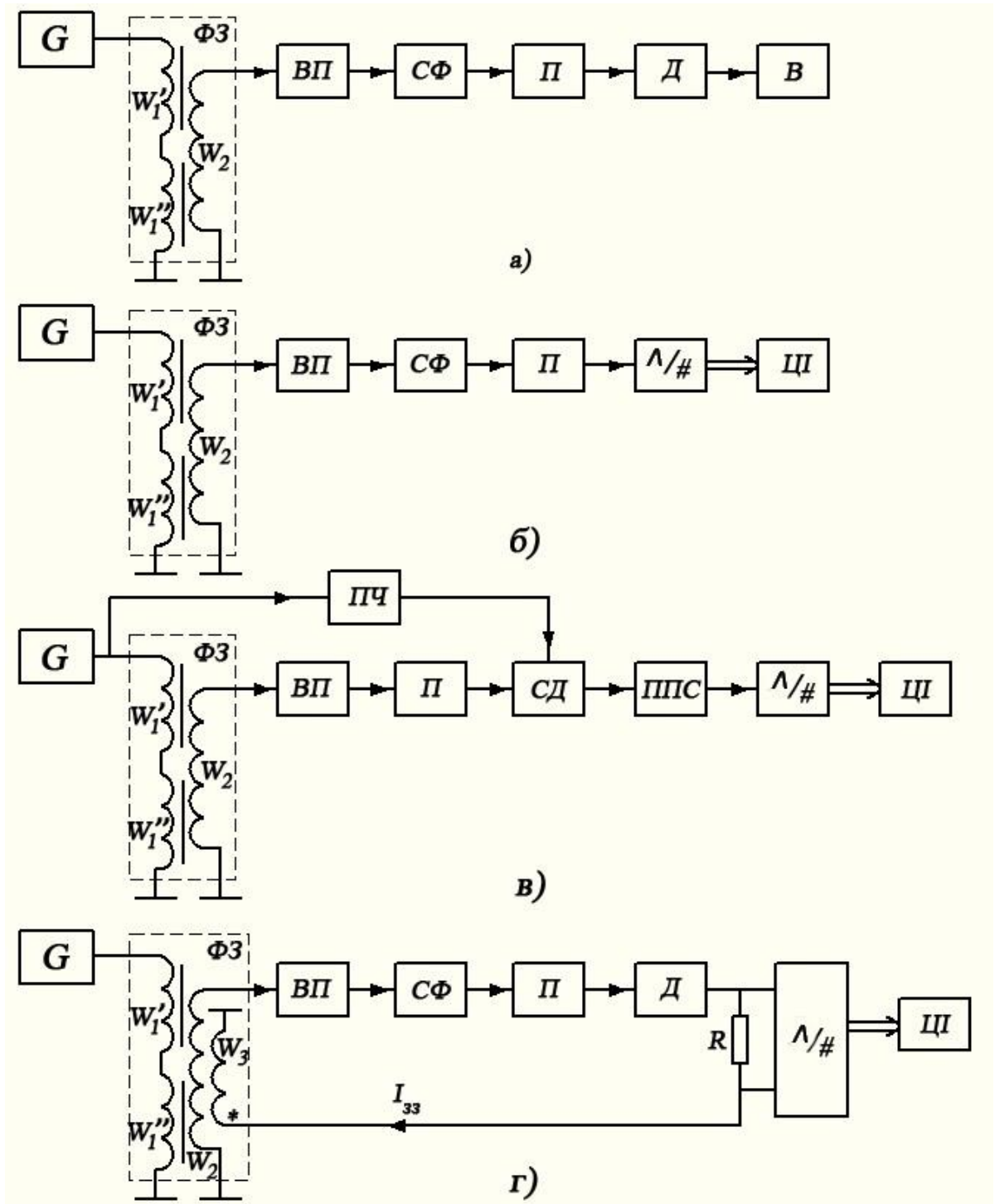


Рис. 7. Варіанти структурних схем ферозондових приладів

Котушки збудження підключені до генератора  $G$ . Згадаємо, що котушки збудження - нелінійні елементи. Це витікає із залежності величини  $H_m$  а отже і  $X_1$ , від струму збудження (39). Тому необхідно узгодити ферозонд з

генератором таким чином, щоби по котушках збудження протікав синусоїдальний струм. Ця вимога виконується у випадку, якщо вихідний опір генератора  $r_2 \gg Z_1$ , де  $Z_1$  визначається з (43). Отже у схемі приладу доцільно застосовувати генератор струму, який забезпечує вихідний струм частотою  $f$  та ефективним значенням  $I_{\text{ef}}$  (38).

Безпосередньо вимірювальну частину приладу складають послідовно ввімкнені вхідний пристрій ВП, смуговий фільтр СФ підсилювач, детектор Д та вимірювач В. Рівняння вимірювання такої схеми у загальному вигляді

$$E_2 = S_2 K H_x, \quad (52)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі сигнала у ланцюгу від ферозонда до вимірювача.

Подальша конкретизація схеми полягає у виборі типу вимірювача – аналогового чи цифрового. У випадку проектування переносних портативних приладів перевагу, як більш економічні, мають аналогові вимірювачі. Доцільно застосовувати стрілочні вимірювальні прилади магнітоелектричної системи, які мають високу чутливість, малу похибку та лінійне рівняння вимірювання. У разі розробки стаціонарних приладів та систем безперечну перевагу мають прилади з цифровим відліком, які забезпечують значно більшу швидкодію та менші похибки вимірювання.

На рис.7б наведена схему ферозондового приладу з цифровим відліком, який має у своєму складі додаткові блоки – аналого цифровий перетворювач (АЦП) та цифровий індикатор ЦІ. Структурний розрахунок, як правило починають з останнього блока. Доцільно визначити кількість десяткових розрядів  $N_d$  індикатора з умови забезпечення заданої точності вимірювання [11]. Нехай задана приведена похибка  $\gamma_{\text{п}}$  вимірювання напруги  $E_2$

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{\delta E}{E_{\text{н}}} 100\%, \quad (53)$$

де  $\delta E$  – максимально можливе абсолютне значення похибки вимірювання,  $E_{\text{н}}$  – номінальне значення напруги.

Припустимо, що систематична складова похибки вимірювання відсутня, а випадкова складова розподілена за нормальним законом з середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$ . Тоді можна стверджувати, що з вірогідністю 0,997 значення випадкової похибки будуть набувати значень у межах інтервалу  $(-3\sigma, 3\sigma)$ . На цій основі приймемо:

$$\delta E = \frac{\gamma_{\text{п}} E_{\text{н}}}{100} = 3\sigma, \quad (54)$$

отже

$$\sigma = \frac{\gamma_{\Pi} E_{\text{H}}}{100}. \quad (55)$$

Операція квантування напруги в АЦП супроводжується виникненням додаткової випадкової похибки квантування з середньоквадратичним значенням

$$\sigma_{\text{к}} = \frac{\Delta E_{\text{к}}}{2\sqrt{3}}, \quad (56)$$

де  $\Delta E_{\text{к}} = E_{\text{H}}/N$  – ступінь квантування,  $N$  – число ступенів квантування.

Для цифрового приладу логічно обґрунтованою вимогою є наступна: похибка квантування приладу не повинна суттєво збільшувати сумарну похибку вимірювання. Ця умова виконується у разі  $\sigma_{\text{к}} < \sigma$ , тобто якщо

$$\frac{\Delta E_{\text{к}}}{2\sqrt{3}} < \frac{\gamma_{\Pi} E_{\text{H}}}{100}. \quad (57)$$

З цієї нерівності отримаємо:

$$N > \frac{E_{\text{H}}}{\Delta E_{\text{к}}} = \frac{50\sqrt{3}}{\gamma_{\Pi}}, \quad (58)$$

$$N_{\text{д}} > \lg N = \lg \frac{50\sqrt{3}}{\gamma_{\Pi}}. \quad (59)$$

Розрахувавши  $N$  можна підібрати тип АЦП та визначити за довідниковими даними його основні технічні характеристики, в тому числі і максимальне значення вхідної напруги  $E_{\text{H}}$ . Тоді коефіцієнт підсилення електронного тракту  $K < E_{\text{H}}/E_2$ .

Якщо необхідно забезпечити вимірювання у значному динамічному діапазоні ( $H_{\text{min}}$ ,  $H_{\text{max}}$ ), необхідно з метою зменшення мультиплікативної похибки, весь діапазон розділити на субдіапазони. В цифрових приладах цей розподіл доцільно виконувати так, щоби номінальні значення вимірювальних величин на суміжних субдіапазонах відносились як 1:10, а для аналогових – як 1:3. Отже кількість субдіапазонів у цих випадках визначають відповідно як  $[\lg H_{\text{max}}/H_{\text{min}}]^+ + 1$  або  $[\log_3 H_{\text{max}}/H_{\text{min}}]^+ + 1$ . Апаратурно такий розподіл реалізують шляхом переключення коефіцієнту підсилення  $K_{\Pi}$  підсилювача  $\Pi$ , або введенням у схему приладу додаткового вузла подільника напруги із змінним коефіцієнтом ділення.

До решти вузлів наведеної на рис.7 б структури висуваються загальні вимоги, які витікають з їх функціонального призначення. Зокрема вхідний пристрій ВП повинен забезпечувати роботу ферозонда у режимі близькому до

режиму холостого ходу, отже повинен мати вхідний опір набагато більше за  $Z_2$  (31a), смуговий фільтр СФ повинен виділяти корисну другу гармоніку  $2\omega$  вихідного сигналу ферозонда та пригнічувати всі інші; детектор Д має формувати амплітудне значення вхідного сигналу з частотою  $2\omega$ . У випадку коли СФ та Д виконуються активними з коефіцієнтами перетворення  $K_{сф}$ ,  $K_{д} > 1$ , загальний коефіцієнт підсилення електронного тракту  $K = K_{сф} K_{д} K_{п}$  необхідно розподілити між всіма блоками.

У структурі на рис.7 б амплітудне значення напруги  $E_2$  утворюється за допомогою детектора Д. Однак визначити  $E_2$  можна і в інший спосіб, наприклад, за допомогою синхронного детектора СД (рис.7в). Застосування синхронних детекторів має ще більшу актуальність у випадку вимірювання дуже слабких магнітних полів на фоні відчутних шумів та завад, коли пригнічення останніх стає особливо важливим [3, 12, 13].

На схемі рис.7 в позначено: ППС підсилювач постійного струму, ПЧ помножувач частоти. СД представляє собою послідовно включені помножувач вимірювального і опорного сигналів та інтегруючу ланку. На рис.7 в опорний сигнал частотою  $2\omega$  формується за допомогою ПЧ. Фільтруюча дія СД пояснюється тим, що інтегрування у СД знакозмінної шумової напруги, яка діє на вхід СД одночасно з корисним сигналом, призводить до її зменшення відносно останнього. Це зменшення прийнято оцінювати відношенням  $P_c/P_{ш}$  – потужності корисного сигналу до потужності шуму [12]. Представимо це відношення через квадрат діючих значень напруг.

На вході синхронного детектора маємо

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = \frac{U_c^2}{U_{еф}^2}, \quad (60)$$

де  $U_c = \frac{E_2}{\sqrt{2}}$  – ефективне значення корисної складової сигналу,  $U_{еф}$  – ефективне значення шумової складової.

Зкористаємось поняттям спектральної щільності потужності  $U_f$  шуму і представимо  $U_{еф}$  у вигляді

$$U_{еф}^2 = U_f \Delta f, \quad (61)$$

де  $\Delta f$  – частотна смуга електронного тракту від вимірювальної котушки до синхронного детектора.

Значення  $\Delta f$  обмежується, в основному, смугою пропускання інтегратора яка тим менша, чим більша його постійна часу. Якщо інтегратор СД має постійну часу  $\tau$ , то ефективна смуга пропускання інтегратора становить

$$\Delta f_{\text{еф}} = \frac{1}{4\tau}. \quad (62)$$

Отже квадрат діючого значення напруги шуму на виході інтегратора дорівнює

$$\left( U_{\text{еф}}^2 \right)_{\text{вих}} = U_f \Delta f_{\text{еф}}. \quad (63)$$

З урахуванням (63) відношення сигнал/шум на виході СД становить

$$\left( \frac{U_c^2}{U_{\text{еф}}^2} \right)_{\text{вих}} = \frac{E_2^2}{2U_f \Delta f_{\text{еф}}} = \left( \frac{U_c^2}{U_{\text{еф}}^2} \right)_{\text{вх}} \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{еф}}}. \quad (64)$$

Таким чином, відношення сигнал/шум на виході СД може бути значно збільшене за рахунок зменшення  $\Delta f_{\text{еф}}$  фільтра ФНЧ. В цьому разі звуження смуги  $\Delta f_{\text{еф}}$  зменшує  $U_{\text{еф}}$  і лишає незмінним  $U_c$ . Однак неможливо нескінченно зменшувати  $\Delta f_{\text{еф}}$  – це зменшення обмежено амплітудо-частотною характеристикою корисного сигналу. Якщо амплітуда  $E_2$  може змінюватись з деякою частотою  $F$ , то внаслідок фільтруючої дії інтегратора корисний сигнал на виході синхронного детектора буде послаблюватись

$$\left( U \right)_{\text{вих}} = \frac{\left( U_c \right)_{\text{вх}}}{\sqrt{1 + (2\pi F \tau)^2}}. \quad (65)$$

Щоби це послаблення було не дуже помітне необхідно забезпечити умову

$$2\pi F \tau < 1, \quad (66)$$

або мати фільтр з постійною часу  $\tau < 1/2\pi F \approx 0,16/F$ . У цьому випадку ефективна смуга пропускання становитиме

$$\Delta f_{\text{еф}} = \frac{1}{4\tau} > 1,5F. \quad (67)$$

Слід пам'ятати, що окрім зменшення амплітуди корисного сигналу збільшення  $\tau$  приводить до зростання часу встановлення  $t_b \approx 2,2\tau$ , отже до збільшення часу перетворення вимірюваної напруги.

З метою зменшення похибок вимірювання, підвищення стабільності роботи та розширення робочого діапазону застосовують ферозондові прилади з негативним зворотнім зв'язком (НЗЗ) по магнітному полю рис. 7г [3, 14, 15]. Безпосередньо ферозонд у цьому випадку відрізняється від попередніх

перетворювачів наявністю третьої котушки - котушки зворотнього зв'язку з числом витків  $W_3$ . Остання, як і вимірювальна котушка, нанесена зосереджено та охоплює обидва осердя. Струм  $I_{33}$  який протікає у ланцюгу НЗЗ, живить котушку зворотнього зв'язку і створює в осердях ферозонда додаткове магнітне поле з напруженістю, яке спрямована назустріч вимірювальному полю  $H_x$ . У цьому випадку на вході АЦП маємо напругу

$$E_2' = S_2 K (H_x - H_{33}). \quad (68)$$

Якщо позначити  $H_{33} = \beta E_2'$  де  $\beta$  – коефіцієнт передачі у ланцюгу зворотнього зв'язку, то матимемо таке рівняння вимірювання

$$E_2 = \frac{S_2 K}{1 + K \beta S_2} H_x. \quad (69)$$

Загалом коефіцієнт підсилення приладу  $K_{33}$  зменшився у  $(1 + K \beta S_2)$  разів. Щоб НЗЗ покращувала стабільність приладу необхідно забезпечити умову  $K S_2 \gg 1$  Ом·м, тоді

$$K_{33} = \frac{S_2 K}{1 + K \beta S_2} \approx \frac{1}{\beta}. \quad (70)$$

Таким чином похибки вимірювання визначатимуться, в основному, похибками зворотнього перетворювача.

У розглянутій схемі рис. 7 г вихідною величиною приладу є напруга  $E_2$ , отже

$$\beta = \frac{H_{33}}{E_2} = \frac{H_{33}}{I_{33} R} = \frac{C_{33}}{R}, \quad (71)$$

де  $C_{33} = \frac{H_{33}}{I_{33}}$  – постійна котушки зворотнього зв'язку.

Величина  $C_{33}$  визначаються числом витків  $W_3$  котушки та її геометричними розмірами

$$C_{33} = \frac{W_3}{\sqrt{l_{33}^2 + d_{33}^2}}, \quad (72)$$

де  $l_{33}$ ,  $d_{33}$  – відповідно довжина та середній діаметр котушки НЗЗ. Зазвичай  $l_{33} \gg d_{33}$ , тому стабільність  $C_{33}$ , в основному, визначається відносною зміною довжини котушки за умови зміни температури. Якщо котушка виготовлена з мідного дроту, то можна отримати  $\Delta C_{33}/C_{33} \approx 0.16\%$  на  $10^\circ\text{C}$ .. Підвищені вимоги щодо стабільності висуваються і до резистора  $R$ , оскільки його значення безпосередньо входить до коефіцієнту перетворення.

Введення у схему прилада НЗЗ дозволяє підвищити точність вимірювання, але цей вигравш досягається за рахунок зменшення в  $(1+K\beta S_2)$  разів коефіцієнту підсилення та чутливості схеми. Тому у приладах без НЗЗ відносна похибка вимірювання складає 1,5-2%, а поріг чутливості становить приблизно  $10^{-4}$  А/м, а у приладах з НЗЗ – відповідно 0,1-0,5% та  $10^{-2}$  А/м.

Вичерпну інформацію, щодо розрахунку принципіальних схем вузлів, які входять до складу функціональних схем ферозондів, наведено в [16-19].

#### 5.4. Аналіз похибок ферозондових приладів

Вихідним для визначення похибок є коефіцієнт перетворення приладів. Для розімкненої та замкненої структур приладів коефіцієнти перетворення складають

$$K_p = S_2 K, \quad (73)$$

$$K_{33} = \frac{S_2 K}{1 + K\beta S_2}. \quad (74)$$

Розглянемо спочатку похибку вимірювання ферозондів розімкненого типу. Оскільки частина змінних в рівняннях (73) та (73\*) мають розмірність, спочатку перейдемо в цих рівняннях до безрозмірних величин

$$K_p^* = S_2^* K, \quad (73^*)$$

$$K_{33}^* = \frac{S_2^* K}{1 + K\beta S_2^*}. \quad (74^*)$$

де  $K_p^* = \frac{K_p}{\dim[S_2]}$ ,  $K_{33}^* = \frac{K_{33}}{\dim[S_2]}$ ,  $\dim[S_2]$  – розмірність  $S_2$ .

Прологарифмуємо а потім продиференціюємо рівняння вимірювання (73\*), (74\*) [11]

$$\ln K_p^* = \ln S_2^* + \ln K, \quad (75)$$

$$\left( \ln K_p^* \right)' = \frac{dK_p^*}{K_p^*} = \frac{dS_2^*}{S_2^*} + \frac{dK}{K}. \quad (76)$$

Замінімо диференціали кінцевими приростами

$$\frac{\Delta K_p^*}{K_p^*} = \gamma_{K_p} = \frac{\Delta S_2^*}{S_2^*} + \frac{\Delta K}{K} = \gamma_s + \gamma_k. \quad (77)$$

де  $\gamma_s, \gamma_k$  – відносні значення похибок визначення чутливості та коефіцієнту підсилення електронного тракту.

Для замкненої схеми ферозонду відповідно отримаємо:

$$\ln K_{33}^* = \ln S_2^* + \ln K - \ln(1 + K\beta S_2), \quad (75^*)$$

$$\begin{aligned} \left( \ln K_{33}^* \right)' &= \frac{dK_{33}^*}{K_{33}^*} = \frac{dK}{K} + \frac{dS_2^*}{S_2^*} - \frac{S_2^*\beta}{1 + KS_2^*\beta} dK - \frac{K\beta}{1 + KS_2^*\beta} dS_2^* - \frac{KS_2^*}{1 + KS_2^*\beta} d\beta = \\ &= \frac{1}{1 + KS_2^*\beta} \left( \frac{dS_2^*}{S_2^*} + \frac{dK}{K} - KS_2^* \frac{d\beta}{\beta} \right); \end{aligned} \quad (76^*)$$

$$\frac{\Delta K_{33}^*}{K_{33}^*} = \gamma_{k_{33}} = \frac{\gamma_s}{1 + KS_2^*\beta} + \frac{\gamma_k}{1 + KS_2^*\beta} + \gamma_\beta. \quad (77^*)$$

Порівнюючи (77) та (77\*) неважко помітити, що в замкненій схемі з НЗЗ похибка, що викликається нестабільністю чутливості ферозонда  $\gamma_s$  та коефіцієнта передачі прямої гілки  $\gamma_k$  зменшується у  $(1 + K\beta S_2)$  разів. Похибка  $\gamma_\beta$  що викликана нестабільністю параметрів ланцюга НЗЗ входить у вираз загальної похибки практично без зменшення. Але як було відзначено вище, ця похибка може бути зведена до 0,01-0,02%.

У випадку вимірювання слабких магнітних полів суттєвий внесок у загальну похибку вимірювання можуть додавати складові, що обумовлені дрейфом нульового рівня та магнітними шумами ферозонда. Потенційними джерелами дрейфа нуля є всі каскади схеми, що працюють з сигналами постійного струму (детектор, підсилювач постійного струму). Тому при проектуванні приладів цим вузлам слід приділити особливу увагу.

## 6. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ ПРОЕКТУ

Графічна частина роботи виконується на 2-3 аркушах формату А1, у повній відповідності з діючими стандартами ЄСКД. Ця частина курсової роботи повинна в наочній формі характеризувати основні розробки та пропозиції виконавця. Типовими графічними матеріалами є: складальне креслення перетворювача та його деталювання, структурна та функціональні схеми, електрична принципова схема, алгоритм роботи приладу.

## 7. ВКАЗІВКИ ПРО ПОРЯДОК ЗАХИСТУ ПРОЕКТУ

Порядок захисту курсового проекту визначається графіком виконання, як правило через 12 тижнів після отримання завдання, але не пізніше ніж за 2 тижні до початку екзаменаційної сесії. Для захисту курсовий проект має бути підписаний керівником, завідувачем кафедри та затверджений кафедрою.

Попередньо здійснюється:

- нормоконтроль проекту;
- виправлення помилок курсового проекту, що стосуються оформлення і його відповідності нормативно-технічним документам;
- перевірка проекту.

Будь-яке переписування матеріалів літературних джерел або електронних документів (електронних книг, сайтів) неприпустиме.

До захисту допускаються курсові проекти, що виконані в повному обсязі згідно із затвердженим індивідуальним завданням, перевірені керівником і підписані ним на титульному аркуші із зазначенням дати. Рекомендується підписувати проекти таким чином: «До захисту», «Дата», «Підпис керівника».

Захист курсового проекту проводиться публічно за встановленим графіком перед комісією, склад якої затверджується завідувачем кафедрою.

Після захисту проекту і визначення відповідної оцінки на титульному аркуші пояснювальної записки робиться запис: «Оцінка», «Дата», «Підписи членів комісії». Сама робота у складі пояснювальної записки та ілюстративно-графічних матеріалів передається на зберігання матеріально відповідальному кафедрі.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Афанасьев Ю.В. Феррозонды / Ю. Афанасьев. – Л.: Энергия, 1969. – 168с.
2. Афанасьев Ю.В. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки / Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Щелкин А.А. – Л.: Энергия, 1971. – 269с.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы / Ю. Афанасьев. – Л.: Энергия, 1986. – 215с.
4. Бронштейн Н.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / Н.Н. Бронштейн, К.А. Семендеев. – М.: Наука, 1986. – 544с.
5. Неразрушающий контроль: в 5 т. / [сост. Герасимов В.Г., Покровский А.Д.; ред. Сухоруков В.В.]. – М.: Высшая школа, 1992 – Электромагнитный контроль. Т.3. – 1992. – 321с.
6. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи / Е. Полищук. – К.: Вища школа, 1981. – 296с.
7. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / [сост. Мужичкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е.; ред. Клюев В.В.]. – М.: Машиностроение, 2006. – (Магнитные методы контроля). Т.6: кн. 1 – 2006. – 832 с.: ил.
8. Цифровые феррозондовые приборы / Н.М. Смеляков, Н.И. Смеляков. – Л.: Энергия, 1978. – 168 с.
9. Таранов С.Г. Магнитные измерения: учебное пособие / С. Г. Таранов, Н. Е. Февралева. – Киев: УМК ВО, 1992 – 128с.
10. Усашенко С.Н. Графическое изображение радиосхем: справочник / Усашенко С.Т., Коченюк Т.К., Терехова М.В. – К.: Техника, 1986.- 120 с.: ил.
11. Сидоров И.Н. Индуктивные элементы радиоэлектронной аппаратуры: справочное издание / Сидоров И.Н., Биинатов М.Ф., Шведова Л.Г. – Москва: Радио и связь, 1992. – 288 с.
12. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е.А.Коломбет. – М.: Радио и связь, 1991. – 376 с.
13. Щербаков В.И. Электронные схемы на операционных усилителях: справочник / В.И. Щербаков, Г.И. Грездов. – К.: Техніка, 1983 – 213 с.
14. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. 12е изд.: Т. 1 / У. Титце, К. Шенк. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.: ил.
15. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П.Орнатский. – К.:Вища школа, 1983. – 544 с.
16. Фукс-Рабинович Л.И. Оптико-электронные приборы / Л.И. Фукс-Рабинович, М.Б. Епифанов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 362 с.

17. Магнітний неруйнівний контроль: навчальний посібник / Куц Ю.В., Протасов А.Г., Цапенко В.К. та інш. – К: НТУУ ”КПІ”, 2012. – 139 с.

18. Бондаренко В.И. Аналоговые измерительные приборы: магнитные измерения: учебное пособие / Бондаренко В.И., Дякин В.И., Пискаряров В.И. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007 – 131 с.

19. Гордиенко В.Е. Пассивный феррозондовый контроль структуры металла и внутренних напряжений в элементах сварных МК / В.Е.Гордиенко. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 83 с.

Магнітні властивості холоднокатаної стрічки з найвищою магнітною проникністю у слабких магнітних полях

Марка матеріалу	Товщина, мм	$\mu_n^*$	$\mu_{max}^*$	$\mu_{dmax}^*$	$H_c$ , А/м	$B_s$ , Тл
1	2	3	4	5	6	7
79НМ	0,005	7000	30000	190000	8,0	0,75
	0,01	14000	60000		5,6	
	0,02	16000	70000		4,0	
	0,05	16000	90000	45000	3,2	
	0,08	16000	90000		3,2	
	0,10	20000	120000		2,4	
	0,15	20000	120000		2,4	
79НМУ	0,005	10000	35000	310000	6,4	0,073
	0,01	16000	90000		3,2	
	0,02	20000	100000		2,4	
	0,05	20000	120000	525000	1,6	
	0,08	20000	120000		1,6	
	0,10	22000	150000		1,2	
	0,15	22000	150000		1,2	
	0,20	25000	180000		1,2	
	0,25	25000	180000		1,2	
	0,35	30000	220000		1,0	
	0,5	30000	220000		1,0	
	0,8	30000	220000	1,0		
	1,0	30000	220000	1,0		
	1,5	25000	180000	1,2		
2,0	25000	180000	1,2			
80НХС	0,005	8000	30000	110000	8,0	0,63
	0,01	14000	50000		5,6	
	0,02	18000	70000		4,0	
	0,05	20000	90000	240000	3,2	
	0,08	20000	90000		3,2	
	0,10	22000	120000		2,4	
	0,15	22000	120000		2,4	
	0,20	28000	130000		1,6	
	0,25	28000	130000		1,6	
	0,35	35000	150000		1,2	
	0,50	35000	150000		1,2	
	0,80	30000	170000	1,0		
	1,0	30000	170000	1,0		
	1,5	25000	150000	1,2		
	2,0	25000	150000	1,2		
2,5	25000	150000	1,2			

79НМ 0,79% - С, 1% -Ni, 1% - Мо

80НХС 0,8% - С, 1% - Ni, 1% - Cr, 1% - Si.

## Мідний дріт для намотування котушок

Номинальний діаметр мідної жили, мм	Переріз мідної жили, мм <sup>2</sup>	ПЕЛ Діаметр d <sub>із</sub> не більше мм	ПЕВ 1 Діаметр d <sub>із</sub> не більше мм	ПЕВ 2 Діаметр d <sub>із</sub> не більше мм
1	2	3	4	5
0.02	0.0003	0.035	0.027	
0.025	0.0005	0.04	0.034	
0.03	0.0007	0.045	0.041	
0.032	0.0008	0.046	0.043	
0.04	0.0013	0.055	0.055	
0.05	0.0020	0.07	0.062	0.08
0.06	0.0028'	0.085	0.075	0.09
0.063	0.0031	0.085	0.078	0.09
0.071	0.004	0.095	0.088	0.095
0.08	0.005	0.105	0.095	0.105
0.09	0.0064	0.115	0.105	0.12
0.1	0.0079	0.125	0.122	0.13
0.112	0.0099	0.125	0.134	0.14
0.12	0.113	0.145	0.144	0.15
0.125	0.0122	0.15	0.149	0.155
0.13	0.0133	0.155	0.155	0.16
0.14	0.0154	0.165	0.165	0.17
0.15	0.0177	0.18	0.176	0.19
0.16	0.0201	0.19	0.187	0.2
0.17	0.0227	0.2	0.197	0.21
0.18	0.0255	0.21	0.210	0.22
0.19	0.0284	0.21	0.220	0.23
0.19	0.0284	0.21	0.220	0.23
0.2	0.0314	0.23	0.23	0.24
0.21	0.0346	0.24	0.24	0.25
0.224	0.0394	0.26	0.256	0.27
0.236	0.0437	0.27	0.260	0.285
0.25	0.0491	0.275	0.284	0.3
0.265	0.0552	0.305	0.305	0.315
0.28	0.0615	0.315	0.315	0.33
0.3	0.0708	0.34	0.34	0.35
0.315	0.078	0.352	0.35	0.365
0.335	0.0885	0.375	0.375	0.385
0.355	0.099	0.395	0395	0.414

1	2	3	4	5
0.38	0.1134	0.42	0.42	0.44
0.4	0.126	0.442	0.44	0.46
0.425	0.142	0.442	0.44	0.46
0.45	0.160	0.47	0.465	0.485
0.475	0.177	0.495	0.49	0.51
0.5	0.196	0.495	0.525	0.545
0.53	0.2206	0.55	0.55	0.57
0.56	0.247	0.578	0.58	0.6
0.6	0.283	0.61	0.61	0.63
0.63	0.313	0.65	0.65	0.67
0.67	0.398	0.68	0.68	0.7
0.7	0.441	0.72	0.72	0.75
0.75	0.503	0.77	0.76	0.79

ПЕЛ - дріт лаковий на масляній основі,  
ПЕВ-1 - один шар високоміцної емалі,  
ПЕВ-2 - два шари високоміцної емалі.

Вивід формули для визначення ефективного значення абсолютної диферентної магнітної проникності  $\mu_{def}$  осердя ферозонда

У відповідності з (33) ефективне значення відносної диференційної магнітної проникності дорівнює

$$\mu_{def}^* = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \mu_d^{*2}(\omega t) d(\omega t)}$$

Представимо значення  $\mu_d^*(\omega t)$  в цій формулі рядом Тейлора аналогічно (6)

$$\mu_d^*(\omega t) = \frac{2\mu_T^*}{\pi} \left( \theta + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2n\theta}{n} \cos 2n\omega t \right) \quad (Д.1)$$

Підставимо цей вираз у попередню формулу

$$\begin{aligned} \mu_{def}^*(\omega t) &= \frac{2\mu_T^*}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left( \theta + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2n\theta}{n} \cos 2n\omega t \right)^2 d\omega t} = \\ &= \frac{2\mu_T^*}{\pi} \sqrt{\frac{\theta^2}{\pi} \int_0^{\pi} d\omega t + \frac{2\theta}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2n\theta}{n} \int_0^{\pi} \cos 2n\omega t d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2n\theta}{n} \cos 2n\omega t \right)^2 d\omega t} \quad (Д.2) \end{aligned}$$

Розглянемо кожний з інтегралів, які входять до складу (Д.2):

Д.2.1:

$$\int_0^{\pi} d(\omega t) = \pi;$$

Д.2.2:

$$\int_0^{\pi} \cos 2n\omega t d(\omega t) = 0;$$

Д.2.3:

$$\begin{aligned} &\int_0^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2n\theta}{n} \cos 2n\omega t \right)^2 d\omega t = \\ &= \int_0^{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 2n\theta}{n^2} \cos^2 2n\omega t d\omega t + \int_0^{\pi} \sum_{p \neq q} \frac{2}{pq} \sin 2p\theta \sin 2q\theta \cos 2p\omega t \cos 2q\omega t d\omega t =; (Д.3) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 2n\theta}{n^2} \int_0^{\pi} \cos^2 2n\omega t d\omega t + \sum_{p \neq q} \frac{2}{pq} \sin 2p\theta \sin 2q\theta \int_0^{\pi} \cos 2p\omega t \cos 2q\omega t d\omega t \end{aligned}$$

Розглянемо інтеграли, що входять до складу (Д.3):

Д.3.1:

$$\int_0^{\pi} \cos^2 2n\omega t d\omega t = \int_0^{\pi} \frac{1 + \cos 4n\omega t}{2} d\omega t = \frac{\pi}{2};$$

Д.3.2:

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} \cos 2p\omega t \cos 2q\omega t d\omega t &= \frac{1}{2} \int_0^{\pi} [\cos 2(p+q)\omega t + \cos 2(p-q)\omega t] d\omega t = \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2(p+q)} \sin 2x \Big|_0^{\pi} + \frac{1}{2(p-q)} \sin 2y \Big|_0^{\pi} \right] = 0 \end{aligned}$$

З урахуванням останніх рівнянь вираз (Д.2.3) спрощується:

$$\int_0^{\pi} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin 2n\theta}{n} \cos 2n\theta\omega t \right)^2 d\omega t = \frac{\pi}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 2n\theta}{n^2} \quad (\text{Д.4})$$

а вираз (Д.2) набуває такого вигляду

$$\mu_{def}^*(\omega t) = \frac{2\mu_T^*}{\pi} \sqrt{\theta^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 2n\theta}{n^2}} \quad (\text{Д.5})$$

Суму яка входить до складу (Д.5) представимо у такому вигляді:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 2n\theta}{n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos 4n\theta}{2n^2} = \frac{1}{2} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 4n\theta}{n^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi^2}{6} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 4n\theta}{n^2} \right) \quad (\text{Д.6})$$

Тепер розглянемо функцію  $f(\alpha) = \alpha(\pi - \alpha)$ . Ця функція, як відомо з курсу математичного аналізу, у межах  $0 \leq \alpha \leq \pi$  може бути представлена рядом Фур'є:

$$f(\alpha) = \alpha(\pi - \alpha) = \frac{\pi^2}{6} - \left( \frac{\cos 2\alpha}{1^2} + \frac{\cos 4\alpha}{2^2} + \frac{\cos 6\alpha}{3^2} + \dots \right) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n\alpha}{n^2} \quad (\text{Д.7})$$

Порівнюючи (Д.6) і (Д.7) неважко помітити, що (Д.7) можна звести до (Д.6) якщо покласти  $\alpha = 2\theta$ . Отже:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 2n\theta}{n^2} = \frac{1}{2} [2\theta(\pi - 2\theta)] = \theta(\pi - 2\theta) \quad (\text{Д.8})$$

Підставивши суму (Д.8) у вираз (Д.5) остаточно отримаємо:

$$\mu_{def}^*(\omega t) = \frac{2\mu_T^*}{\pi} \sqrt{\theta^2 + \frac{1}{2} [\theta(\pi - 2\theta)]} = \frac{\mu_T^*}{\pi} \sqrt{2\pi\theta}. \quad (\text{Д.9})$$