

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



О.А.Авраменко, Б.М.Горкунов, М.М.Сіренко, С.Г.Львов

**ПЕРМЕАМЕТРИ.  
КОНСТРУЮВАННЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ,  
ЗАСТОСУВАННЯ**

Навчальний посібник

Харків 2012



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

О.А.Авраменко, Б.М.Горкунов, М.М.Сіренко, С.Г.Львов

**ПЕРМЕАМЕТРИ.  
КОНСТРУЮВАННЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ,  
ЗАСТОСУВАННЯ**

Навчальний посібник

Затверджено  
Редакційно-видавничою  
радою університету,  
Протокол № 1 від 20.06.12

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2012

УДК 620.179.14

ББК 31.222

П – 27

Рецензент: *Ю.Ф. Павленко*, д-р техн. наук, проф., ННЦ "Інститут метрології"  
*В.В. Кідалов*, д-р техн. наук, проф., БДПУ

Навчальний посібник містить теоретичні основи роботи пермеаметрів, антологію та сучасні розробки їх конструкцій, рекомендації щодо конструювання пермеаметрів, основи їх метрологічного забезпечення та приклади практичного застосування для магнітного контролю промислових виробів.

Призначено для студентів напряму підготовки «Приладобудування».

Пермеаметри. Конструювання, метрологічне забезпечення, застосування: навч. посіб./ Авраменко О.А., Горкунов Б.М., Сіренко М.М., Львов С.Г. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – 76 с. – На укр. мові.

ISBN 978-617-05-0021-2

Учебное пособие содержит теоретические основы работы пермеаметров, антологию и современные разработки их конструкций, рекомендации по конструированию пермеаметров, основы их метрологического обеспечения и примеры практического применения для магнитного контроля промышленных изделий.

Предназначено для студентов направления подготовки «Приборостроение».

Ил. 28. Табл. 5. Библиогр. 27 назв.

УДК 620.179.14

ББК 31.222

ISBN 978-617-05-0021-2

© О.А. Авраменко, Б.М. Горкунов  
М.М. Сіренко, С.Г. Львов, 2012 р.

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1. Антологія конструкцій пермеаметрів .....	5
2. Теоретичні основи роботи пермеаметрів.....	17
2.1. Аналіз магнітних кіл системи «пермеаметр-виріб» .....	17
2.2. Визначення магнітних характеристик виробів різних форм .....	21
2.3. Диференціальний метод магнітних вимірювань.....	25
3. Конструювання пермеаметрів.....	28
3.1. Вимоги до конструкцій пермеаметрів.....	28
3.2. Конструктивні рішення і області застосування пермеаметрів .....	30
3.3. Розрахунок параметрів пристроїв.....	39
4. Метрологічне забезпечення пермеаметрів .....	41
4.1. Метод вимірювання магнітної індукції в пермеаметрі .....	42
4.2. Вибір засобів вимірювань .....	46
4.3. Стандартні зразки магнітних властивостей.....	47
4.4. Спосіб градування пермеаметрів і оцінки його похибки.....	50
4.5. Методика аналізу методичних похибок контролю.....	53
4.6. Методика аналізу інструментальних похибок контролю .....	58
5. Промислове застосування пермеаметрів .....	61
5.1. Установка для магнітних випробувань виробів.....	61
5.2. Застосування пермеаметрів в системах контролю і управління технологічними процесами виготовлення елементів електродвигунів .....	63
5.3. Промисловий магнітний контроль зразків з електротехнічної сталі .....	65
Список джерел інформації .....	68
Додаток 1. Параметри намотувальних дротів .....	71
Додаток 2. Перелік рекомендованих засобів вимірювань .....	73

## ВСТУП

*Пермеаметрами* називаються спеціалізовані електромагнітні вимірювальні перетворювачі з магнітопроводами, призначені для опосередкованих вимірювань магнітних характеристик феромагнітних виробів без нанесення на них намагнічувальних та вимірювальних обмоток.

Такі пристрої отримали свою назву від латинських слів «*permeo*» (проникаю) та «*metro*» (вимірюю), що буквально можна сформулювати як «вимірюю проникнення». При цьому під проникненням розуміється важлива магнітна характеристика феромагнітних виробів – відносна магнітна проникність  $\mu_r$ . До речі, з англійської слово «*permeability*» перекладається як «магнітна проникність».

Історія створення перших пермеаметрів складає лише 70 років. Бурхливий розвиток вони отримали у зв'язку з підвищенням потреби промисловості у вимірювальних пристроях, які призначені для контролю якості продукції шляхом дослідження та вимірювання їх характеристик і властивостей. При цьому основними вимогами до таких перетворювачів були і залишаються можливість автоматизації, точність і продуктивність контролю.

Пермеаметри міцно зайняли провідне місце в ряду вимірювальних перетворювачів для промислового неруйнівного контролю якості та магнітних вимірювань. Тому актуальними залишаються питання їх теоретичного розвитку, метрологічного забезпечення і практичного застосування.

У зв'язку з цим в даному посібнику наведена антологія конструкцій пермеаметрів, розглянуті теоретичні основи їх роботи, принципи їх конструювання. Детально описаний ряд оригінальних конструкцій пермеаметрів для контролю магнітних характеристик промислових виробів широкого асортименту, які були розроблені авторами. Наведені приклади практичного застосування та детально розглянуті питання їх метрологічного забезпечення.

## 1. АНТОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРМЕАМЕТРІВ

Перші відомі конструкції пермеаметрів призначалися тільки для намагнічування феромагнітних виробів (зразків матеріалів або їх сплавів) розімкненої форми (прутки, полоси, труби) в сильних магнітних полях. Для цього на основних його елементах (магнітопроводах) розміщувалися каркаси з намагнічувальними обмотками, а вимірювальна обмотка наносилася на зразок. Магнітопроводи (вони ще називаються «ярмами») були виконані у вигляді рами з рухливими частками (полюсними наконечниками), які забезпечували щільний контакт магнітопроводу із зразком, тобто мінімальний магнітний опір в системі «магнітопровід – зразок».

Таким чином, магнітопровід із зразком створював замкнене магнітне коло, у якому були мінімальні розсіювання магнітних потоків, що забезпечувало максимальну ефективність намагнічування та створювалися сильні магнітні поля у зразку. Це особливо важливо для промислових магнітних випробувань зразків деталей або матеріалів, які в реальних електротехнічних пристроях, електричних машинах знаходяться саме в зонах дії таких електромагнітних полів. При цьому дослідники отримували максимально достовірну вимірювальну інформацію щодо магнітних властивостей зразків, що випробуються, в реальних умовах їх експлуатації. Це дозволяло конструкторам і технологам при проектуванні електротехнічної продукції обирати феромагнітні матеріали (сплави) з оптимальними магнітними властивостями, що забезпечують задані технічні характеристики майбутніх виробів.

Подібні пристрої також широко застосовуються в заводських лабораторіях для вхідного експрес-контролю магнітних властивостей матеріалів, які використовуються для виробництва електричних машин і апаратів а також інших електротехнічних виробів. Експрес-аналіз проб плавок у металургії дозволяє корегувати їх технологічні процеси.

Головним завданням при розробці пермеаметрів різноманітних систем вважається зменшення похибок вимірювання магнітних характеристик [1]. З цієї точки зору і розглянемо відомі конструкції пермеаметрів.

Прикладом простого конструктивного рішення є *пермеаметр Гонкінсона* [1], який призначений для магнітних вимірювань зразків мартенситних сталей (рис. 1.1).

Основними елементами пермеаметра є два ярма  $Я$ , намагнічувальна котушка  $N_1$  та вимірювальна обмотка  $N_2$ . У місцях контактів полюсів кожного ярма із зразком  $O$  є повітряні зазори  $\delta$ . Магнітний потік, який створюється у зразку, розділяється на два потоки  $\Phi$ , що замикаються у обох ідентичних ярмах.

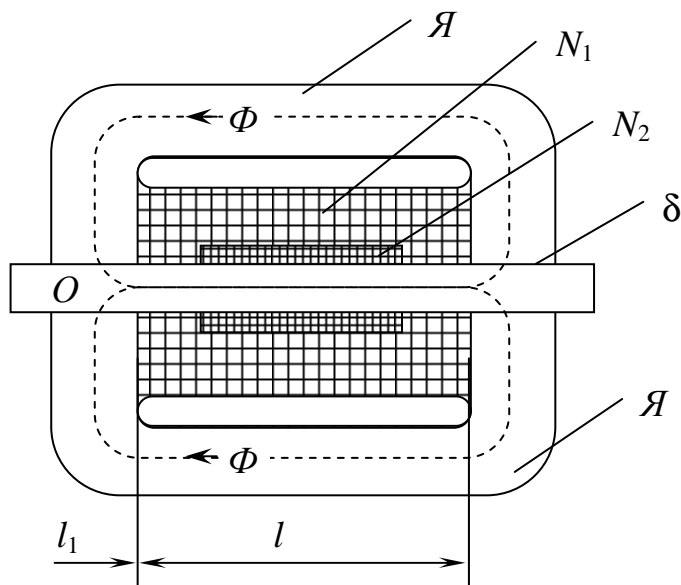


Рисунок 1.1 – Конструкція пермеаметра Гопкинсона

Ярма виготовлені з магнітно-м'якого заліза та мають переріз  $0,005 \text{ м}^2$ . Пермеаметр дозволяє випробовувати тільки зразки з діаметром 6 мм та довжиною 300 мм, що є його недоліком. Максимальна напруженість намагнічувального поля складає 40 кА/м, похибка вимірювання – 10%. Число витків намагнічувальної обмотки та її довжина підібрані таким чином, щоб постійна котушки дорівнювала 100 та напруженість поля у зразку можна було б розрахувати за простою формулою

$$H = 100I \quad (1.1)$$

де  $I$  – сила струму у намагнічувальному колі в амперах.

Аналогічну конструкцію має пермеаметр середніх полів (ПСП-2), який є складовою комплекту балістичної установки БУ-3. У ньому передбачена можливість визначення напруженості поля за допомогою плоскої котушки поля.

У *пермеаметрі Піку* з двома намагнічувальними котушками  $N_1$  (рис. 1.2) зменшений вплив повітряного зазору між зразком  $O$  та ярмами  $Я$ , а також і вплив магнітного опору ярма на результати магнітного контролю [1]. Він призначений для випробувань сталевих зразків з відносно невеликою коерцитивною силою (близько 20 кА/м).

Принцип визначення напруженості поля у зразку полягає у наступному. Визначається залежність магнітної індукції в одному боці ярма, на який нанесена вимірювальна обмотка  $N_2$ , від напруженості поля, що утворюється за допомогою двох ідентичних секцій  $N_1$  намагнічувальної котушки. Ці секції можуть бути з'єднані за схемами узгоджено або зустрічного включення.



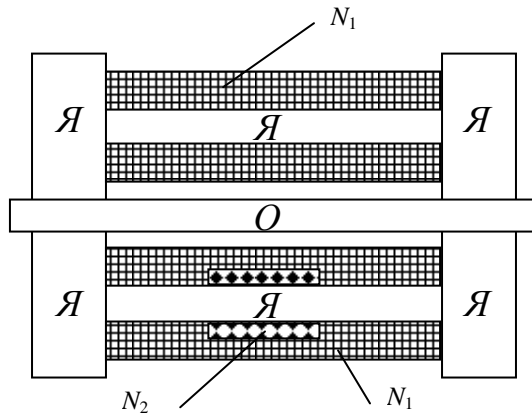


Рисунок 1.2 – Конструкція пермеаметра Піку

При узгодженому з'єднанні ці котушки утворюють магнітний потік в одному напрямі. Потік не проходить по зразку (за виключенням потоку розсіювання, що буде тим менше, чим більше площа поперечного перерізу та магнітна проникність матеріалу ярма у порівнянні з перерізом та магнітною проникністю матеріалу зразка).

У разі зустрічного з'єднання цих котушок утворюються дві паралельні вітки магнітного кола та магнітний потік, що проходить по зразку. При цьому загальний магнітний опір кожної вітки збільшується на подвійну величину магнітного опору зразка, оскільки у кожену гілку магнітного кола входить половина перерізу зразка.

За результатами цих двох вимірювань визначають магнітні характеристики зразка. Похибка вимірювань цим пермеаметром залежить від величини розсіювання магнітного потоку і може бути доведена до 4 %, що також досить багато.

У наступній **конструкції пермеаметра з магнітним мостом** [1] використано метод порівняння, для якого характерною є підвищена точність та оригінальна методика вимірювання. Його схема наведена на рис. 1.3.

Намагнічувальна обмотка  $N_1$  з додатковими витками  $N_1'$  і  $N_1''$  розміщена на зразку. На ярмо  $Я$  нанесена компенсаційна обмотка  $N'$ . Вказані обмотки утворюють магнітні потоки в одному напрямі. Якщо магнітний міст  $MT$ , який виготовлений з магнітно-м'якого заліза або пермалою, прикласти до зразка таким чином, щоб його кінці мали контакт у місцях між основними та додатковими намагнічувальними обмотками, то через мост піде магнітний потік, величина якого буде дорівнювати різниці потоків у ярмі ( $\Phi'$ ) та у зразку ( $\Phi_1$ ):

$$\Phi_{MT} = \Phi' - \Phi_1. \quad (1.2)$$

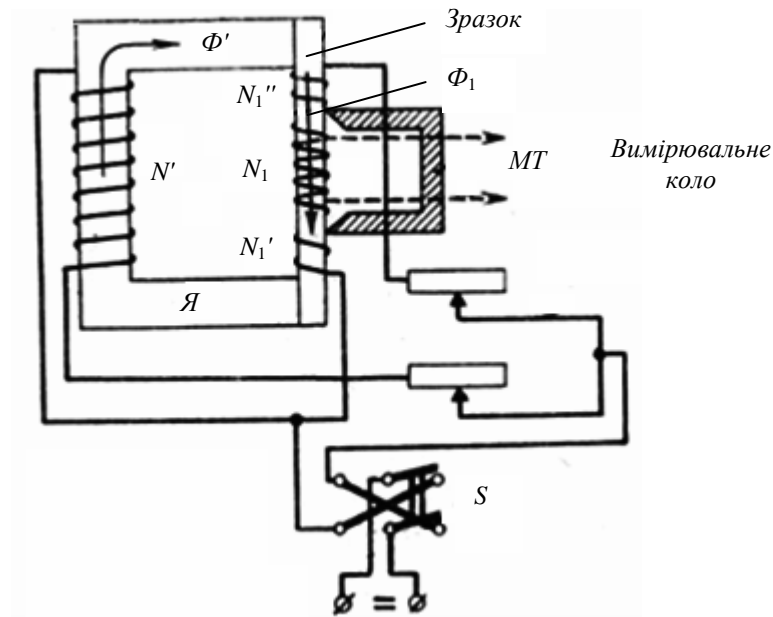


Рисунок 1.3 – Вимірювальна схема пермеаметра з магнітним мостом

При відриві моста  $MT$  від зразка розподіл потоків у останньому зміниться, що в свою чергу викличе відхилення покажчика шкали балістичного гальванометра, оскільки він з'єднаний з вимірювальною котушкою  $N_2$  (її кінці на рис. 1.3 показані пунктиром).

Якщо вибрати силу струму  $I$  у компенсаційній обмотці  $N'$  такою, щоб абсолютне значення магнітного потоку у ярмі дорівнювало значенню потоку у зразку, то магнітні потенціали в точках контакту моста  $MT$  із зразком будуть однакові і магнітний потік у мості буде відсутній. При цьому відрив моста не викликає відхилення покажчика шкали балістичного гальванометра. Компенсаційна обмотка утворює намагнічувальну силу, яка компенсує падіння магнітного потенціалу у ярмі  $Я$  і в місцях його контактів із зразком. Тому, напруженість намагнічувального поля у зразку можна розрахувати також за простою формулою

$$H = \frac{IN_1}{l}, \quad (1.3)$$

де  $l$  – відстань між контактами магнітного моста.

У промислових пермеаметрах число витків  $N_1$  зазвичай підбирають таким чином, щоб виконувалось співвідношення  $H = 10^4 \cdot I$  (А/м). Магнітна індукція зразка вимірюється звичайним балістичним методом. Застосування магнітного моста у цій конструкції спрямоване на підвищення точності визначення напруженості поля, тому похибка її вимірювань не перевищує 1 %.

Конструктивно пермеаметр розміщений у алюмінієвому корпусі, наповненому трансформаторним мастилом (рис. 1.4). Максимальна сила струму у намагнічувальній обмотці досягає 12 А.

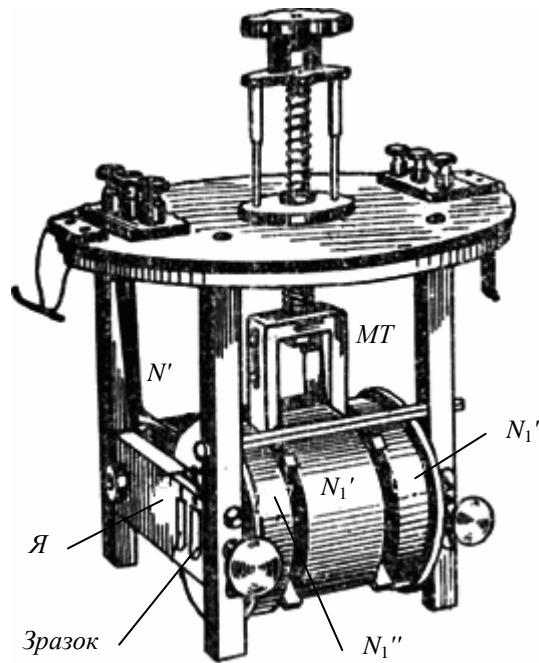


Рисунок 1.4 – Конструкція пермеаметра з магнітним мостом

На цьому рисунку видно масивне ярмо  $Я$ , магнітний міст  $MT$ , котушки з намагнічувальною та додатковими обмотками, місце розташування зразка. Контакт магнітного моста із зразком здійснюється при натисненні верхньої центральної кнопки. При відпуску кнопки магнітний міст піднімається за допомогою спеціальної пружини. Розміри зразків для випробувань є фіксованими: довжина 115 мм та переріз  $(19 \times 19)$  мм<sup>2</sup>. До пермеаметра зазвичай додаються вставки для зразків меншого перерізу.

У такому пермеаметрі замість магнітного моста можна застосувати ферозонди. При цьому у місці розташування ніжок магнітного моста встановлюються половини зонду, з'єднані за градієнтометричною схемою включення. За відсутності різниці магнітних потенціалів між точками розташування половин зонду на зразку покажчик вимірювального приладу буде знаходитися на нульовій відмітці. Оскільки ферозонди мають найбільшу чутливість до магнітних потоків, то вони дозволяють підвищити точність вимірювань у слабких магнітних полях. Крім цього, застосування ферозондів значно спрощує вимірювальний процес, оскільки відсутня необхідність у багаторазовому відриві моста від зразка і проведенні відповідних вимірювань.

Для досліджень магнітних характеристик високо коерцитивних сплавів призначений пермеаметр з двома вимірювальними котушками поля (так званий *пермеаметр Санфорда і Бенетта* [1], рис. 1.5). Його намагнічувальні обмотки розташовані на  $\Pi$  – подібних половинах ярма  $Я$ . Зразок  $O$  розміщується між полюсними наконечниками (вставками  $C$ ), а намагні-

чувальна обмотка має дві секції з витками  $N_1$ . Котушки з числами витків  $N_2'$  і  $N_2''$  призначені для вимірювань напруженості поля.

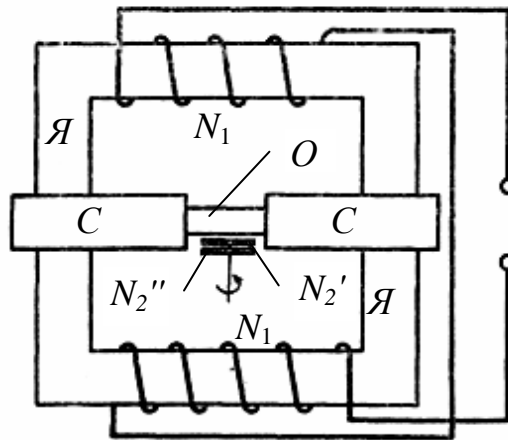


Рисунок 1.5 – Пермеаметр з двома котушками поля

Потрібно відмітити, що цей тип пермеаметра на практиці використовується рідко із-за деяких ряду недоліків, у тому числі великого розсіювання магнітного потоку внаслідок невдалого розташування намагнічувальних котушок, що і вимагає спеціальної форми та обмежених розмірів зразка.

Однак цей пермеаметр цікавий своєю методикою вимірювання напруженості поля, основою якої є той факт, що величина напруженості поля змінюється лінійно при віддаленні від плоскої поверхні зразка. Для вимірювання напруженості поля використовуються дві плоскі котушки, які мають однакові постійні. Вони жорстко скріплені між собою і розташовані в паралельних площинах: перша ( $N_2'$ ) на відстані 2,5 мм від площини зразка, друга ( $N_2''$ ) – на відстані 5 мм.

Напруженість намагнічувального поля в цьому пермеаметрі визначають у два прийоми: спочатку підключають до балістичного гальванометра першу котушку і відраховують показ  $\alpha$  гальванометра при повороті системи котушок на  $180^\circ$ . Потім з'єднують дві котушки назустріч, підключають їх до гальванометра, знов повертають цю систему на  $180^\circ$  і відмічають другий показ  $\beta$  гальванометра. На рис. 1.6 видно, що сума показів ( $\alpha + \beta$ ) гальванометра відповідає «ідеальному» випадку, коли вимірювальна котушка розташовується безпосередньо на поверхні зразка. Тому напруженість намагнічувального поля розраховується за формулою

$$H = \frac{C_\delta}{2N_2'S} (\alpha + \beta), \quad (1.4)$$

де –  $C_8$  постійна балістичного гальванометра;  $N_2'S$  - постійні кожної з двох однакових котушок поля.

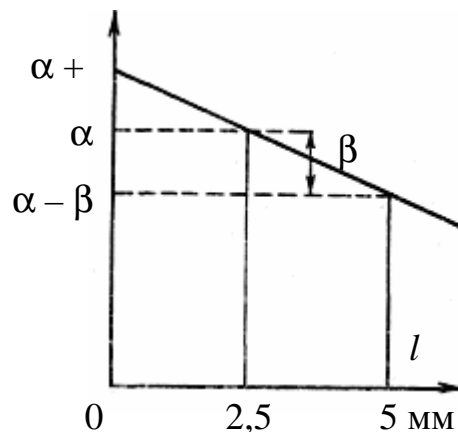


Рисунок 1.6 – До визначення напруженості поля

Недоліком такої конструкції є необхідність встановлення зразка відносно котушок з високою точністю місця розташування. Похибка вимірювання напруженості поля може бути доведена до 2 %. Метод вимірювання індукції - балістичний.

У промисловій практиці магнітних вимірювань розповсюджені модифікації пермеаметра з подвійним ярмом (*пермеаметр Неймана* [1]), будова якого показана на рис. 1.7. Метою його створення було розширення діапазонів розмірів і форм контрольованих зразків.

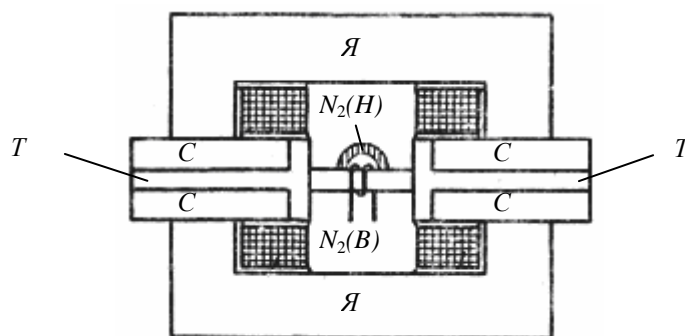


Рисунок 1.7 – Конструкція пермеаметра з подвійним ярмом

Ярмо  $Я$  пермеаметра складається з двох однакових П-подібних частин. Для розміщення зразків різної довжини і форми між половинами ярма є чотири прямокутних вкладиша  $C-C$  і дві Т-подібні вставки ( $T$ ).

Верхня половина ярма може підніматись при вимірюванні довгих зразків з малим перерізом (висотою до 30 мм). У разі контролю протяжних зразків з перерізом до  $(100 \times 100) \text{ мм}^2$  Т-подібні вставки знімаються. Таким чином пермеаметр дозволяє визначати магнітні характеристики зразків із

перерізом до  $(30 \times 400)$  мм<sup>2</sup> довжиною більш ніж 30 мм, а при перерізах зразків від  $(30 \times 100)$  мм<sup>2</sup> до  $(100 \times 100)$  мм<sup>2</sup> – з довжиною від 30 мм до 180 мм.

Дві намагнічувальні котушки  $N_1$  розміщені на вкладишах С-С, що сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії пермеаметра при намагнічуванні деталей. Напруженість поля при цьому досягає 50 кА/м у зазорі шириною 50 мм.

Індукція у зразку вимірюється балістичним методом за допомогою кількох витків обмотки  $N_2(B)$ , яка нанесена безпосередньо на зразок. Напруженість намагнічувального поля визначається за допомогою спеціального потенціалометру  $N_2(H)$ , який від'єднується від зразка пружиною. Потенціалометр з'єднується з балістичним гальванометром.

Пермеаметр Неймана дозволяє вимірювати магнітні характеристики постійних магнітів, такі як основна крива індукції, крива розмагнічування (отже, коерцитивна сила  $H_c$  і залишкова індукція  $B_r$ ). Похибки вимірювань не перевищують 4 %.

Суттєвим недоліком пермеаметрів для випробувань постійних магнітів є їх громіздкість і велика маса. Також для створення сильних полів необхідна значна намагнічувальна сила, яка у деяких пермеаметрах досягає сотень тисяч ампер. Для розміщення обмотки і створення необхідної однорідності поля у робочому зазорі доводиться збільшувати розміри пермеаметра та застосовувати потужні джерела живлення.

Пермеаметри сильних полів київського підприємства «Точелектроприлад» аналогічні наведеному вище типу і разом з балістичним пристроєм входять до комплексу промислової магнітовимірювальної установки БУ-3. Їх відмінність полягає тільки в тому, що вони мають менші розміри та їхні ярма розташовані горизонтально. Для вимірювання напруженості поля в цих пермеаметрах застосовані три котушки з відповідними постійними: 10 см<sup>2</sup>, 20 см<sup>2</sup> і 160 см<sup>2</sup>. Установка БУ-3 призначена для визначення характеристик магнітно-твердих матеріалів з коерцитивною силою до 120 кА/м. Максимальна напруженість поля у пермеаметрі складає 320 кА/м при робочому зазорі 50 мм та 560 кА/м – при відстані між його полюсами у 20 мм. До комплексу також входять пульт управління та регулюючий пристрій, що складається з восьми реостатів, які з'єднані у два блоки. Один блок реостатів підключається до балістичної установки і розрахований на силу струму від 0,02 А до 12 А. Другий блок підключається до електричного кола розмагнічування і розрахований на силу струму від 0,01 А до 6 А.

Більш продуктивним є електродинамічний метод вимірювання магнітних характеристик матеріалів для постійних магнітів, оскільки він дозволяє відразу визначати значення вимірюваних величин без попередніх розрахунків. Тому він є більш зручним у випадках, коли не потрібна дуже висока точність вимірювань.

Найбільш простим *пермеаметром електродинамічного типу* є пермеаметр, що працює за принципом магнітоелектричного вимірювального

приладу, у якому постійний магніт замінений на контрольований зразок з намагнічувальною обмоткою (так званий *прилад Кенселя* [1]). Схематична побудова такого пермеаметра показана на рис. 1.8.

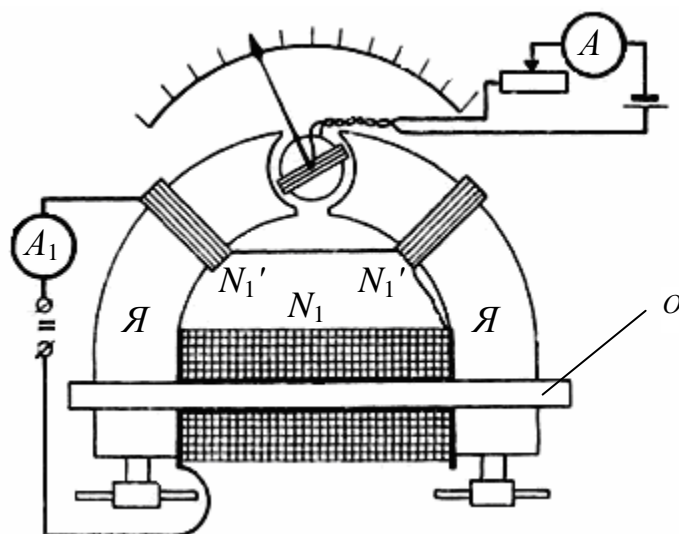


Рисунок 1.8 – Конструкція пермеаметра електродинамічного типу

В пермеаметрі кінці зразка  $O$  замкнені на ярмо  $Я$ , виготовлене з армо-заліза. Намагнічування відбувається за допомогою котушки  $N_1$ . Додаткові котушки  $N_1'$  послідовно з'єднані з основною і розташовані на ярмі. Вони утворюють магнітний потік у зворотному напрямі, який компенсує потік у ярмі, створюваний основною намагнічувальною котушкою  $N_1$ . У повітряному зазорі ярма розташована рухлива рамка з обмоткою, по виткам якої протікає струм постійної величини. Як і для приладу магнітоелектричної системи, обертовий момент рухливої частини пропорційний добутку величини магнітного потоку  $B$  у повітряному зазорі ярма на силу струму у рамці. Момент протидії створюється пружинами, як і у магнітоелектричному приладі. Тому кут відхилення  $\alpha$  покажчика шкали приладу буде пропорційним величині магнітної індукції у робочому зазорі цього вимірювального механізму:

$$\alpha = \frac{cB}{m}, \quad (1.5)$$

де  $c$  – постійна вимірювального механізму;  $m$  – питомий момент сил протидії вимірювального механізму.

Тому шкала приладу градується безпосередньо у одиницях індукції, що зручно для оператора. Цей прилад дозволяє вимірювати криві намагнічування, петлі гістерезису та криві повернення з похибками від 5 % до 8 %, що є достатньо низькою точністю. Максимальна напруженість намагнічувального поля, яка досягається у пермеаметрі, складає близько 36 кА/м.

Такий пермеаметр дозволяє випробувати зразки тільки фіксованих розмірів (діаметром 6 мм та довжиною 280 мм), що звужує його застосування тільки до лабораторних умов. Сьогодні такі пермеаметри вже не застосовуються, але розглянутий принцип вимірювань часто використовують при виготовленні модернізованих та удосконалених пристроїв для масового контролю постійних магнітів.

Аналогічний спосіб магнітних вимірювань використаний у пермеаметрі з симетричним подвійним ярмом (*пермеаметр Штеблейна і Стейниці*) [1]. Побудова та вимірювальна схема пермеаметра наведена на рис. 1.9. Дві половини ярма *Я-Я* мають однакові форми та розміри. Вони виготовлені з листової електротехнічної сталі. На кожній половині ярма розташовані по дві намагнічувальні котушки  $N_1$  з 1000 витками кожна. Всі чотири котушки з'єднані таким чином, що створюють магнітний потік одного напрямку. При величині намагнічувального струму у 6 А вони створюють у робочій зоні пермеаметра довжиною 50 мм напруженість поля у 200 кА/м.

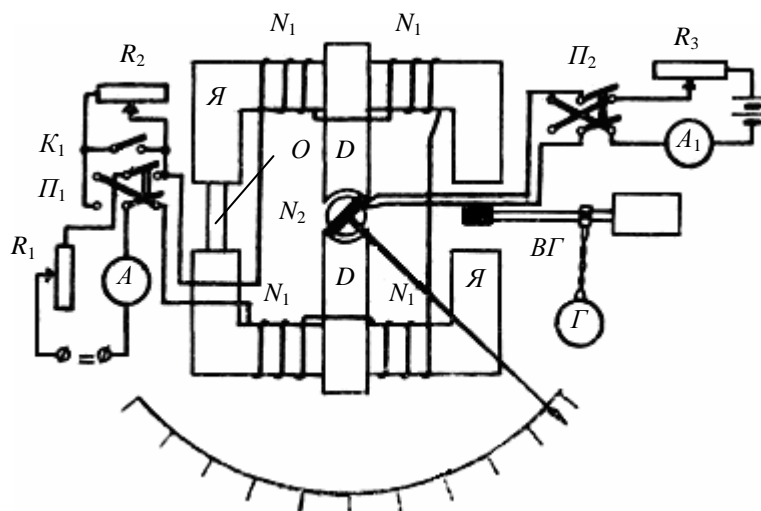


Рисунок 1.9 – Схема пермеаметра з подвійним симетричним ярмом

Середні перемички *D-D* утворюють повітряний зазор, де розташована на розтяжках рамка з вимірювальною котушкою  $N_2$ , яка має можливість повертатися. Напруженість поля визначається за допомогою вимірювального генератора (*ВГ*), котушка якого розташована в одному з двох крайніх зазорів між половинами ярма. У другому зазорі встановлюють зразки *О*. Розміри контрольованих зразків можуть бути змінними: перерізом від  $2 \text{ см}^2$  до  $20 \text{ см}^2$  і довжиною від 3 см до 12 см.

Германська фірма АЕО випустила пермеаметри такого типу, в яких напруженість поля у зразку вимірюється за допомогою вібруючої котушки, що розміщується на поверхні зразка. З цією ж метою можна застосовувати і ферозонди.



Принцип дії пермеаметра з подвійним симетричним ярмом полягає у наступному. Оскільки магнітний опір обох половин ярма однаковий, то при протіканні струму по витках намагнічувальних котушок (за відсутністю зразка) магнітний потік у середині (зоні  $D-D$ ) ярма відсутній, і тому рамка з котушкою  $N_2$  залишається нерухомою. Після розміщення зразка у одному з крайніх зазорів симетрія магнітного поля ярма порушується, і через нього буде проходити магнітний потік, який утворюється у зразку. Цей потік замикається через робочий зазор у середині ярма та пронизує площу рамки з витками  $N_2$ , оскільки цей зазор набагато менший, ніж зазор у другій крайній частині ярма.

Під час вимірювань співвідношення між розмірами крайнього повітряного зазору (де розміщений вимірювальний генератор) і середнього зазору (де розташована рухлива рамка) остається постійним. Отже, кут відхилення рамки з обмоткою  $N_2$  є мірою величини додаткового магнітного потоку, який вносить у магнітне коло зразок. Таким чином, шкалу приладу також можна проградувати у одиницях індукції.

Спосіб магнітних вимірювань за допомогою вібраційної котушки реалізований у *пермеаметрі Феттера*, конструкція якого (у розрізі) наведена на рис. 1.10.

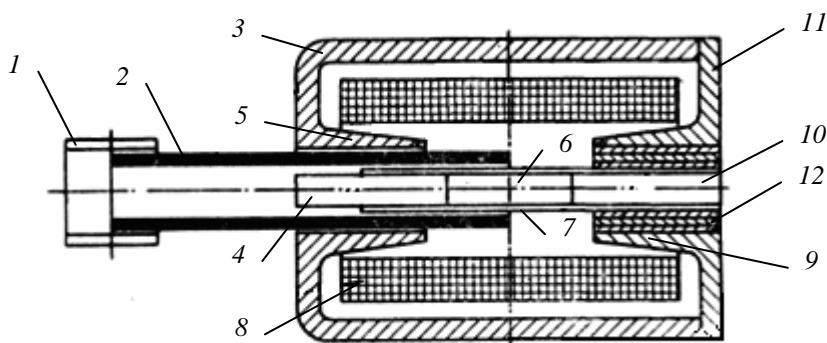


Рисунок 1.10 – Конструкція пермеаметра з вібраційною котушкою

Перед вимірюваннями зразок  $6$  розміщують у трубці  $7$  з немагнітного матеріалу та затискають за допомогою подовжувальних стрижнів  $4$  і  $10$ , які виготовлені з магнітно-м'якого заліза і мають таку ж площу перерізу, як і у зразка. Торці зразка повинні бути ретельно пришліфовані для зменшення повітряного зазору між ним і стрижнями.

Під час випробувань зразок намагнічується полем, яке утворює намагнічувальна котушка  $8$  при протіканні по її виткам струму. Магнітний потік проходить по замкненому колу, до якого входять зразок, стрижні, втулки ( $5$  і  $9$ ) та дві частини ярма ( $3$  і  $11$ ). Між втулкою  $5$  і стрижнем  $4$  є зазор для вібраційної котушки  $2$ . Для забезпечення симетричного магнітного кола такий же зазор утворений між стрижнем  $10$  і втулкою  $9$  та заповнений немагнітною прокладкою  $12$ . З метою підвищення точності вимірювань

другий кінець вібраційної котушки розміщений у трубчастому екрані 1, виготовленому з пермалою.

Напруженість поля у зразку можна визначити за допомогою вібраційної котушки, один кінець якої знаходиться у центрі зразка, а другий – біля кінця котушки індукції. При коливальному русі котушки електрорушійна сила (е.р.с.) на її кінцях буде пропорційною напруженості поля у зразку.

Для цієї ж цілі іноді застосовують котушку поля з двома однаковими обмотками, які зустрічно з'єднуються між собою. В цьому разі е.р.с. в обмотці котушки буде пропорційною напруженості поля у повітряному зазорі між 1 і 2 обмотками. За допомогою таких котушок визначають напруженість поля не на поверхні зразка, а на деякій відстані від нього у просторі між двома обмотками.

Під час вимірювань котушки приводять у коливальний рух за допомогою двигуна з ексцентриком. Частота таких коливань 16 Гц, а амплітуда – 3 мм. Максимальна напруженість поля намагнічувальної котушки при нетривалому намагнічуванні (біля 30 с) може досягати 400 кА/м. Однак наявність повітряних зазорів у магнітному колі приводить до значного зниження напруженості поля у зразку. Тому цей пермеаметр призначений для магнітних випробувань сталей з низькою коерцитивною силою (не вище 20 кА/м). Зразки для випробувань повинні мати такі розміри: довжину від 50 мм до 100 мм, переріз (15x15) мм<sup>2</sup>. Час визначення повної петлі гістезису біля 30 хвилин. Похибки оцінюються у 2 % при вимірюванні індукції та у 4 % при вимірюванні напруженості поля [1].

Проведений аналіз робіт щодо створення пермеаметрів є корисним, насамперед, для вивчення розвитку інженерної думки і конструкторських рішень, які застосовувались і продовжують застосовувати при проектуванні та розрахунку характеристик пермеаметрів. Їх аналіз доводить, що основним недоліком всіх розглянутих типів пермеаметрів є обмеженість форм і розмірів зразків для випробувань, оскільки в основному ці пермеаметри були призначені для лабораторних випробувань зразків матеріалів, а не промислових виробів. Сьогодні лише деякі їх модифікації застосовуються для промислового магнітного контролю.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Проаналізуйте особливості конструкції та роботу кожного типу пермеаметрів.
2. Перелічіть основні технічні переваги та недоліки кожної конструкції.
3. Назвіть сфери застосування кожного з пермеаметрів.
4. Поясніть принцип дії пермеаметра Неймана.
5. У чому полягає особливість принципу магнітних вимірювань пермеаметра електродинамічного типу?

## 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ ПЕРМЕАМЕТРІВ

### 2.1. Аналіз магнітних кіл системи «пермеаметр-виріб»

Принцип дії пермеаметрів полягає у тому, що магнітний потік створюється не усередині зразка, як це традиційно відбувається при випробуванні зразків з нанесеною намагнічувальною обмоткою, а в магнітопроводі самого пермеаметра. Застосування їх для випробувань як замкнутої форми (тороїди, еліпси та інші конфігурації), так і виробів розімкненої форми (полоси, листи, труби) відрізняється тим, що на результати вимірювань не впливає розмагнічувальний фактор, оскільки магнітне коло зразка завжди є замкнутим на полюси магнітопроводу.

Дослідження теорії роботи пермеаметрів пов'язано з розрахунками їх магнітних кіл, які залежать від форм і конструктивних особливостей магнітопроводів, а також від конфігурацій досліджуваних зразків. Тому спочатку розглянемо характерну конструкцію промислового пермеаметра.

Авторами був розроблений універсальний пермеаметр [2. 3], конструкція якого з розташованими на ньому зразками замкнутої (кільцевої) і розімкненої (полоса) форм наведені на рис. 2.1 та рис. 2.2 відповідно.

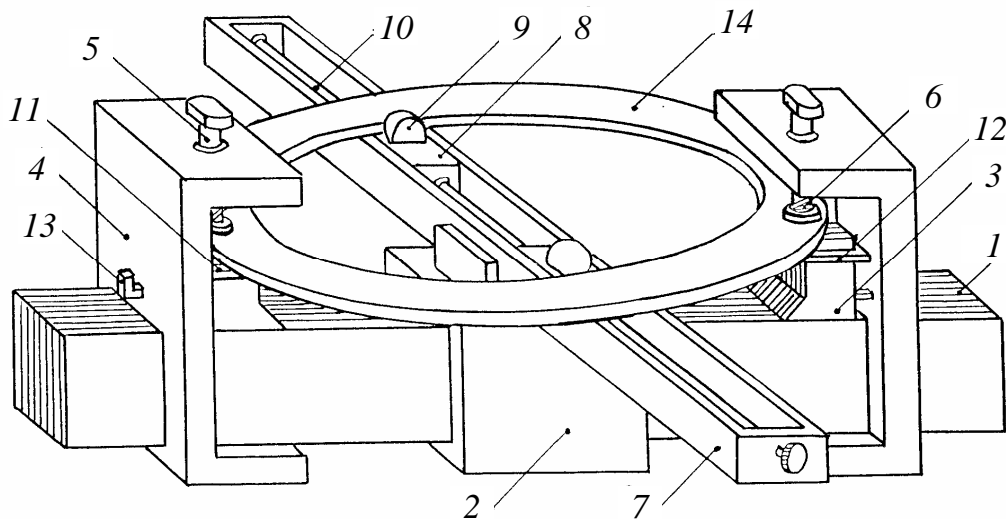


Рисунок 2.1 – Пермеаметр з виробом замкнутої форми

Пермеаметр містить центральний магнітопровід 1, виготовлений у вигляді феромагнітного шихтованого осердя з каркасом 2 намагнічувальної обмотки. На магнітопроводі 1 встановлені шихтовані полюсні наконечники 3 а також рухливі струбцини 4 з упорами 5 і пружинами 6, які є складовими притискного пристрою. Там же розташовані і центрувальні пристрої 7, до складу яких входять напрямна планка 8 та упорні гайки 9, які мають можливість переміщення по гвинту 10. Каркаси 11 і 12 з секціями вимірювальної обмотки розміщені на краях наконечників 3. Струбцини 4 у частинах, які охоплюють магнітопровід 1, виконані з розрізами (тобто

повітряними зазорами), які перешкоджають замкненню вихрових струмів у них. Притискні упори 5 встановлені в струбцинах з можливістю фіксації у віджатому положенні за допомогою пружин 6.

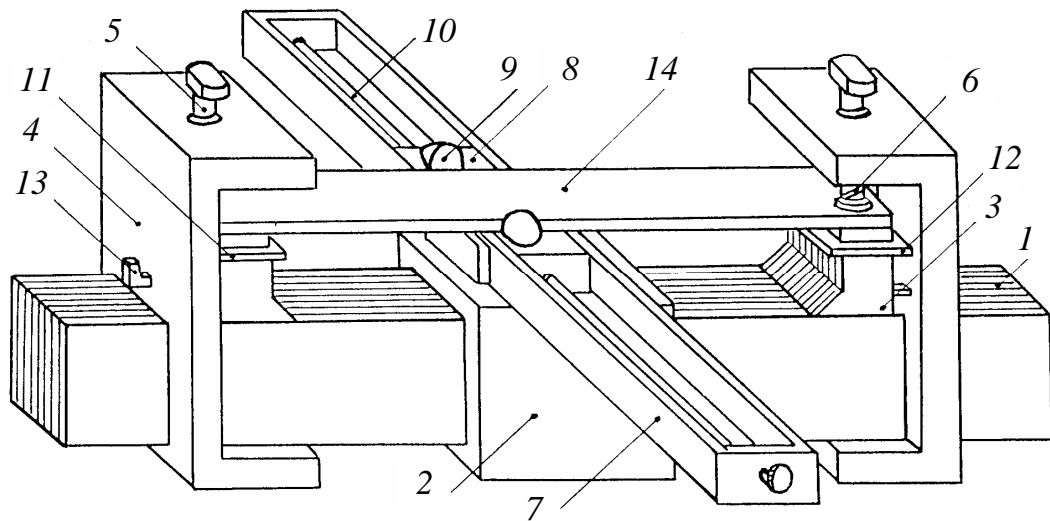


Рисунок 2.2 – Пермеаметр з виробом розімкненої форми

З метою визначення основних співвідношень, які пов'язують параметри сигналу пермеаметра з магнітними характеристиками досліджуваного зразка, розглянемо магнітне коло пермеаметра із зразком кільцевої форми (рис. 2.3).

Магнітний потік  $\Phi_{\Sigma}$  у центральному магнітопроводі розподіляється на два потоки  $\Phi$  (у половині кільця) а також на декілька характерних потоків розсіювання  $\Phi_{p0}$ ,  $\Phi_{p1}$ ,  $\Phi_{p3}$ , які шунтують робочі потоки  $\Phi$ . Потоки розсіювання  $\Phi_{p0}$  і  $\Phi_{p1}$  замикаються довкола намагнічувальної котушки, а потоки  $\Phi_{p3}$  – у повітрі на полюси центрального магнітопроводу. Вони є втратами основного магнітного потоку  $\Phi$ , який зондує виріб. Наявність потоків розсіювання є джерелом похибки визначення магнітних характеристик виробу.

На еквівалентній схемі магнітного кола (рис. 2.4) вони представлені у вигляді відповідних провідностей  $Y$ . Магнітні опори на різних ділянках цього магнітного кола позначені як  $Z$  з цифровими індексами, які позначають номери початкових та кінцевих точок ділянки кола (рис. 2.3, 2.4).

Вважаємо, що магніторушійна сила  $F$  пермеаметра (рис. 2.4) утворюється змінним струмом у намагнічувальній обмотці, оскільки цей випадок є узагальненим. Тоді максимальна величина електрорушійної сили (е.р.с.)  $\underline{E}_m$ , яка наводиться у витках вимірювальної обмотки пермеаметра, має вигляд [1]:

$$\underline{E}_m = -j\omega N_B \underline{\Phi}_{\Sigma}, \quad (2.1)$$

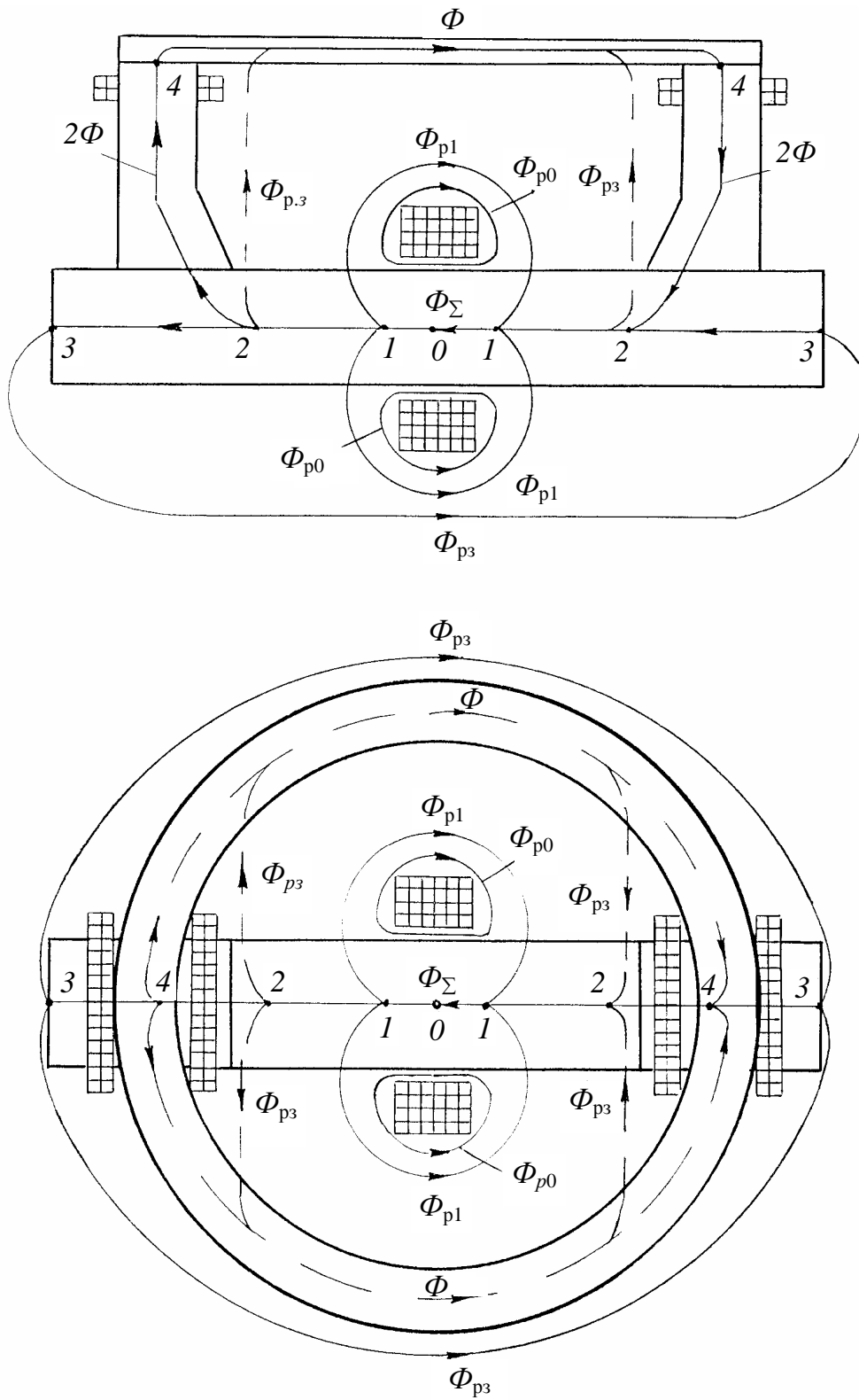


Рисунок 2.3 – Магнітне коло системи «пермеа́метр-зразок»

де  $\omega$  – кругова частота намагнічувального струму;  $N_b$  – число витків вимірювальної обмотки (для аналізованого пермеаметра – це сума чисел витків двох секцій цієї обмотки),  $\Phi_\Sigma$  – основний магнітний потік, який створюється у магнітопроводі.

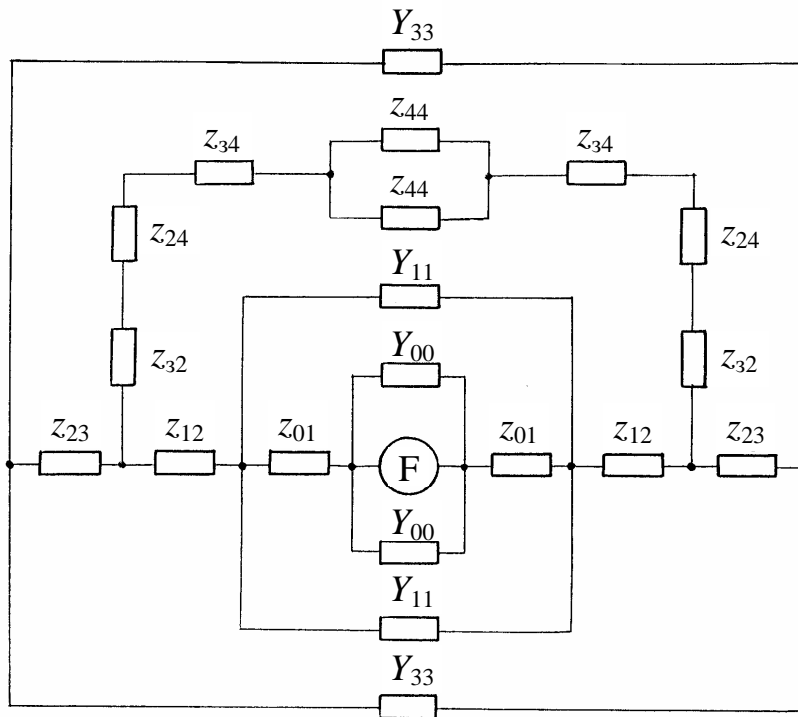


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема магнітного кола

Останній пов'язаний з намагнічувальними ампер-витками  $I_H N_H$  співвідношенням, яке характеризує закон Ома для магнітного кола [4]:

$$\Phi_\Sigma = \frac{I_H N_H}{\underline{Z}_M}, \quad (2.2)$$

де  $I_H$  – сила намагнічувального струму;  $N_H$  – число витків намагнічувальної обмотки пермеаметра;  $\underline{Z}_M$  – повний магнітний опір кола.

Як відомо [1], при роботі магнітопроводу у змінному магнітному полі виникають втрати потужності на гістерезис та вихрові струми. Це приводить до того, що у часі магнітний потік відстає по фазі від змінної магніторушійної сили і тому магнітний опір  $\underline{Z}_M$  потрібно розглядати як комплексну величину

$$\underline{Z}_M = R_M + jX_M, \quad (2.3)$$

де  $R_M$  і  $X_M$  – відповідно активна і реактивна складові магнітного опору.

Розрахунок значень  $R_M$  і  $X_M$  суттєво спрощується при наявності слабо вираженого поверхневого ефекту, який призводить до порівняно однорідного розподілу індукції за перерізом магнітопроводу, що є важливим при випробуванні феромагнітних матеріалів. Магнітопровід і полюсні наконечники з метою забезпечення однорідності основного потоку виконані шихтованими. Тоді

$$R_M = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_0 \mu_{ri} S_i} + \sum_{k=1}^m \frac{\delta_{zk}}{\mu_0 S_{zk}}, \quad (2.4)$$

де  $l_i$  – довжина  $i$ -тої ділянки магнітного кола,  $\mu_{ri}$  – відносна магнітна проникність  $i$ -тої ділянки,  $S_i$  – площа перерізу  $i$ -тої ділянки,  $\delta_{zk}$  – довжина

$k$ -того повітряного зазору,  $S_{zk}$  – площа перерізу  $k$ -того зазору.

Величина опору  $X_M$  розраховується за формулою

$$X_M = \frac{P}{\omega \Phi^2}, \quad (2.5)$$

де  $P$  – втрати потужності у матеріалі зразка.

Значення  $P$  для кожного типу електротехнічної сталі зазвичай відомо для маси 1 кг, індукції 1 Тл та частоти 50 Гц. Перерахунок цієї величини втрат потужності на інші значення маси  $m$ , індукції  $B_m$  і частоти  $f$  здійснюють за формулою [4]:

$$P' = P \left( \frac{f}{50} \right)^\beta \cdot B_m^2 \cdot m, \quad (2.6)$$

де  $\beta$  – показник ступеня (для слабких магнітних полів  $\beta = 1,2$ , а для сильних –  $\beta = 1,6$ ).

## 2.2. Визначення магнітних характеристик виробів різних форм

З урахуванням (2.1) – (2.3) запишемо співвідношення для комплексної амплітуди ЕРС  $\underline{E}_m$  вимірювальної обмотки у вигляді

$$\underline{E}_m = -\omega N_B N_H I_H \left( \frac{X_M}{R_M^2 + X_M^2} + j \frac{R_M}{R_M^2 + X_M^2} \right). \quad (2.7)$$

За рахунок вибору матеріалу для елементів магнітопроводу з малими втратами потужності (вузька петля гістерезису) можна досягти умови  $X_M \ll R_M$ . Така операція приведе до спрощення попередньої формули

$$\underline{E}_m = -j\omega N_B \frac{I_H N_H}{R_M}. \quad (2.8)$$

Якщо виготовити елементи магнітопроводу з перерізом, який значно перевищує максимальний переріз випробовуваних виробів, то це дозволить практично знехтувати величинами магнітних опорів  $R_{Mi}$  ділянок магнітопроводу. З іншого боку, ретельне шліфування і полірування контактних поверхонь магнітопроводу та його полюсних наконечників дозволяє суттєво зменшити опори  $R_{зк}$  повітряних зазорів за умови достатньо сильного та стабільного притиснення зразка до наконечників. В цьому разі (2.8) можна записати, як

$$\underline{E}_m = -j\omega N_B \frac{I_H N_H}{R_{МП}}, \quad (2.9)$$

де  $R_{МП}$  – магнітний опір половини замкнутого зразка (півкільця),

$$R_{МП} = l_c / (2\mu_0 \mu_r S), \quad (2.10)$$

де  $l_c$  – середня лінія кільця,  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу зразка,  $S$  – площа перерізу деталі.

Тоді із (2.9) з урахуванням (2.10) знайдемо амплітуду ЕРС  $\underline{E}_m$

$$\underline{E}_m = 4\omega N_B \Phi. \quad (2.11)$$

Використавши (2.11), можна отримати формулу для визначення величини амплітудної (максимальної) магнітної індукції у замкнутому зразку:

$$B_m = E_m / (4\omega N_B S). \quad (2.12)$$

На практиці при використанні пермеаметрів в режимі вимірювання динамічних магнітних характеристик виробів розрахунок значення  $B_m$  потрібно проводити за формулою

$$B_m = U_{cp} / (k_1 f N_B S), \quad (2.13)$$

де  $U_{cp}$  – середнє значення напруги на кінцях вимірювальної обмотки пермеаметра;  $k_1$  – градууювальний коефіцієнт, що залежить від типу і параметрів пермеаметра, форми випробовуваного виробу (для зразків замкнутої форми  $k_1 \approx 16$ , розімкненої –  $k_1 \approx 4$ );  $f$  – частота намагнічувального струму.



Якщо використати закон повного струму для магнітного кола «пермеаметр-виріб», можна знайти співвідношення для розрахунку амплітуди напруженості  $H_m$  магнітного поля у зразку

$$H_m = \frac{k_2 I_{\text{HM}} N_{\text{H}}}{l_c}, \quad (2.14)$$

де  $k_2$  – градувальний коефіцієнт (для замкнених виробів  $k_2 \approx 2$ , для розімкнених  $k_2 \approx 1$ ),  $I_{\text{HM}}$  – амплітудне значення сили намагнічувального струму,  $l_c$  – середня довжина зразка.

Відзначимо, що при вимірюваннях напруженості  $H_m$  за допомогою пермеаметрів у статичному режимі (в постійних магнітних полях) також необхідно використовувати формулу (2.14). А розрахунок величини індукції  $B$  при комутації постійного струму проводять за формулою

$$B = \Delta\psi / (k_3 N_{\text{B}} S), \quad (2.15)$$

де  $\Delta\psi$  – різниця потокозчеплення з витками  $N_{\text{B}}$  вимірювальної обмотки пермеаметра,  $k_3$  – градувальний коефіцієнт (для замкнутих зразків  $k_3 \approx 8$ , для розімкнених  $k_3 \approx 2$ ).

Іноді на практиці з метою зменшення впливу потоків розсіювання на результати контролю вимірювальну обмотку (з роз'ємними вітковими контактами) розміщують безпосередньо на випробовуваному зразку. Як правило, при випробуванні феромагнітних виробів, число витків  $N_{\text{B}}'$  таких обмоток не перевищує 10–15. При цьому пермеаметр використовується як індуктор (намагнічувальний пристрій). В цьому разі напруженість магнітного поля розраховується за формулою (2.14) а індукція визначається за співвідношеннями:

- у статичному режимі

$$B = \Delta\psi / (2N_{\text{B}}' S), \quad (2.16)$$

- у динамічному режимі

$$B = U_{\text{cp}} / (4N_{\text{B}}' S). \quad (2.17)$$

Підвищити роздільну здатність пермеаметра дозволяє застосування диференціального методу вимірювань, який полягає у вимірюванні не абсолютного значення магнітної індукції, а її приросту (з урахуванням знаку) у порівнянні з відомою величиною. Для цього необхідно використовувати два ідентичних пермеаметри з однотипними контрольованим і стандарт-

ним (з відомими магнітними характеристиками) зразками. Розрахунок приросту індукції  $\Delta B$  при динамічних вимірюваннях проводиться за формулою

$$\Delta B = \Delta E_m / (k_4 \omega N_B S), \quad (2.18)$$

де  $\Delta E_m$  – приріст е.р.с.  $E_m$ , що наводиться у вітках зустрічно з'єднаних вимірювальних обмоток двох пермеаметрів;  $k_4$  – градувальний коефіцієнт (для кільцевих зразків  $k_4 \approx 4$ , для полос –  $k_4 \approx 1$ ).

Приріст індукції  $\Delta B$  при випробуваннях у постійних магнітних полях визначають, використовуючи співвідношення

$$\Delta B = \frac{\delta(\Delta \Psi)}{k_3 N_B S}, \quad (2.19)$$

де  $\delta(\Delta \Psi)$  – приріст різниці поточкозчеплень зустрічно з'єднаних вимірювальних котушок двох пермеаметрів.

Важливою для магнітних випробувань характеристикою є питомі втрати потужності  $P_{\text{пит}}$  у функції індукції. Сьогодні найбільш поширене практичне застосування набув ватметровий метод вимірювання втрат. Цьому методу властиві висока точність, простота вимірювань і можливість автоматизації. Втрати потужності  $P_{\text{пит}}$  при використанні пермеаметрів знаходять за формулою [5]

$$P_{\text{пит}} = \left( \frac{N_B}{N_B} P - P_{\text{пр}} \right) \frac{1}{m} k_5, \quad (2.20)$$

де  $P$  – вимірювана величина втрат у зразку;  $P_{\text{пр}}$  – втрати потужності у приладах, які підключені до вимірювальних котушок пермеаметра;  $m$  – маса випробовуваного зразка;  $k_5$  – градувальний коефіцієнт, який залежить від величини індукції та частоти магнітного поля, характеристик пермеаметра і попередньо визначається для конкретного сорту (типу) матеріалу експериментальним шляхом.

Втрати потужності у приладах визначають за відомою формулою [1]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{еф}}^2}{R_{\Sigma}}, \quad (2.21)$$

де  $U_{\text{еф}}$  – ефективне значення напруги на вимірювальній обмотці;  $R_{\Sigma}$  – сумарний опір вимірювального кола пермеаметра.

Методи визначення вказаних градувальних коефіцієнтів будуть розглянуті нижче.

### 2.3. Диференціальний метод магнітних вимірювань

У попередньому розділі були розглянуті методи магнітного контролю, які дозволяють визначати абсолютні значення магнітних характеристик об'єктів. Ці методи доцільно застосовувати при магнітних випробуваннях виробів, які мають суттєво різні значення магнітних характеристик (наприклад, виготовлених з різних типів сталі). Основним критерієм застосування таких абсолютних методів є те, що відносна різниця цих значень повинна хоча б на порядок перевищувати сумарну відносну похибку вимірювань. Інакше чутливості пермеаметрів не достатньо для вимірювань малих різниць (приросту) вимірюваних магнітних параметрів.

Тому, з метою підвищення чутливості пермеаметрів до вимірюваних величин виробів необхідно переходити до диференціального методу вимірювань.

Він дозволяє здійснювати контроль характеристик не тільки матеріалів і виробів, які близькі між собою за магнітними властивостями, але й зразків, які виготовлені з однотипних матеріалів. Крім цього, включення двох ідентичних пермеаметрів у диференціальні вимірювальні схеми дозволяє зменшити і навіть позбутися впливу ефектів не виключених магнітних потоків розсіяння на результати контролю. Таким чином досягається підвищення чутливості пермеаметрів та точності вимірювань. Застосування диференціальних схем дозволяє достатньо легко автоматизувати контроль магнітних параметрів.

Під час динамічних магнітних вимірювань із сигналів вимірювальних обмоток двох ідентичних пермеаметрів, які з'єднані зустрічно, виділяються тільки основні гармоніки е.р.с. з подальшим випрямленням сигналів. Тому, якщо використати (2.13), то можна визначити різницю амплітуд цих гармонік при розміщенні на одному пермеаметрі стандартного зразка (СЗ) з відомими магнітними характеристиками, а на іншому – випробовуваного зразка (ВЗ). Приріст індукції  $\Delta B$  (з урахуванням знаку) ВЗ у порівнянні з відомою величиною індукції  $B_1$  стандартного виробу (при однакової напруженості змінного магнітного поля у обох зразках) знайдемо за формулою [6]

$$\Delta B = -\frac{\Delta E}{kfN_B S_1} + \frac{B_1 \Delta S}{S_1}, \quad (2.22)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який залежить від форми випробовуваних виробів (для замкнутої форми  $k = 16$ , для розімкненої –  $k = 4$ ;  $S_1$  – площа перерізу СЗ;  $\Delta S = S_1 - S_2$ ,  $S_2$  – площа перерізу ВЗ).

Оскільки знак приросту  $\Delta E$  відомий у процесі вимірювань, то з попереднього співвідношення можна отримати значення індукції  $B_2$  випробовуваного зразка

$$B_2 = B_1 \left( 1 - \frac{\Delta E}{kfN_B B_1 S_1} + \frac{\Delta S}{S_1} \right). \quad (2.23)$$

Напруженість поля у зразках визначають при цьому з (2.14).

Аналогічні співвідношення можна отримати і для випадку диференціальних вимірювань статичних магнітних характеристик. При цьому кінці вимірювальних обмоток обох пермеаметрів, які зустрічно з'єднані між собою, підключають до веберметра. Формули, що описують роботу диференціальних пермеаметрів у режимі диференціальних статичних вимірювань, мають вигляд:

$$\Delta B = - \frac{\delta(\Delta\psi)}{kN_B S_1 B_1} + \frac{\Delta S}{S_1}, \quad (2.24)$$

$$B_2 = B_1 \left( 1 - \frac{\delta(\Delta\psi)}{kN_B S_1 B_1} + \frac{\Delta S}{S_1} \right), \quad (2.25)$$

де  $\delta(\Delta\psi)$  – різниця поточозчеплень з урахуванням знаку, яка обумовлена відмінністю магнітних характеристик ВЗ і СЗ; коефіцієнт  $k$  для замкненої форми зразка дорівнює 8, для розімкненої – 2.

Напруженість постійного магнітного поля також визначають з (2.14).

Підвищити точність диференціальних вимірювань динамічних магнітних характеристик в зонах лінійності кривої намагнічування (ділянки початкова та насичення) дозволяє спосіб, який полягає у зрівнюванні середніх значень е.р.с. вимірювальних обмоток двох пермеаметрів, на яких розміщені відповідно СЗ і ВЗ.

Для цього один з пермеаметрів виконують з регульованим числом витків вимірювальної обмотки. Змінюючи напруженість поля у зразках, визначають область лінійної зміни вказаних е.р.с. від напруженості поля (намагнічувального струму) і зрівнюють середні значення е.р.с. цих пермеаметрів шляхом зміни (регулювання) числа витків вимірювальної обмотки пермеаметра з випробуванням зразком. Момент повної рівноваги (тобто компенсації) цих е.р.с. реєструють нуль-індикатором. Значення індукції  $B_2$  випробуваного зразка визначають із співвідношення

$$B_2 = B_1 \frac{N_{B1} S_1}{N_{B2} S_2}, \quad (2.26)$$

де  $N_{B1}$  і  $N_{B2}$  – числа витків вимірювальних обмоток пермеаметрів із стандартним та з випробуванням зразками в момент компенсації е.р.с.

Якщо намагнічувальні обмотки двох ідентичних пермеаметрів підключити до незалежних регульованих джерел живлення, то вказану компенсацію е.р.с. можна виконати шляхом зміни амплітуди  $I_2$  намагнічувального струму пермеаметра з ВЗ. Тоді в момент рівності двох е.р.с. можна визначити магнітну проникність  $\mu_{r2}$  випробовуваної деталі, використовуючи формулу

$$\mu_{r2} = \mu_{r1} \frac{I_1 S_1 l_2}{I_2 S_2 l_1}, \quad (2.27)$$

де  $\mu_{r1}$  – магнітна проникність стандартного зразку;  $l_1$  і  $l_2$  – довжини стандартного і випробуваного зразків відповідно;  $I_1$  та  $I_2$  – амплітуди намагнічувального струму пермеаметрів з СЗ і ВЗ відповідно у момент компенсації е.р.с.

Експериментальні дані контролю магнітних параметрів феромагнітних зразків, отримані на конкретних пермеаметрах у режимі як абсолютних, так і диференціальних вимірювань, а також аналіз інструментальних похибок вимірювань наведені нижче.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. З якою метою до конструкції пермеаметра введені пристрої для центрування та притиску зразків?
2. Для чого потрібні полюсні наконечники?
3. Чому вимірювальні котушки розміщені на полюсних наконечниках?
4. Надайте характеристики магнітним потокам на рис. 2.3.
5. Наведіть формули за якими знаходять величини індукції та напруженості магнітного поля у зразку при використанні пермеаметра.
6. У чому полягає суть диференціального методу магнітних вимірювань?
7. Від яких величин залежить вимірюваний приріст індукції  $\Delta B$ ?

### 3. КОНСТРУЮВАННЯ ПЕРМЕАМЕТРІВ

#### 3.1. Вимоги до конструкцій пермеаметрів

Під час розробки сучасних пермеаметрів потрібно враховувати ряд вимог, стосовно їх елементів, блоків та матеріалів. В першу чергу такими вимогами є [7]:

- ✓ можливість контролю магнітних характеристик феромагнітних виробів замкненої і розімкненої форм широкого сортаменту, тобто *універсальність застосування*;
- ✓ мінімальний *магнітний опір* у системі «пермеаметр-зразок»;
- ✓ мінімальні *розсіювання* основного магнітного потоку;
- ✓ *однорідність намагнічування* у перерізі та впродовж довжини виробу;
- ✓ підвищена *точність* контролю у порівнянні з аналогами;
- ✓ висока *чутливість* при визначенні магнітних характеристик;
- ✓ *придатність до автоматизації* магнітного контролю промислових виробів серійного виробництва;
- ✓ *надійність* конструкції з метою тривалої експлуатації;
- ✓ *зручність і простота* застосування.

Розглянемо у якості прикладу, як ці вимоги були враховані під час конструювання типового промислового пермеаметра (рис. 2.1).

Можливість магнітних випробувань виробів різноманітних розмірів і форм забезпечена рядом наступних конструктивних заходів. По-перше, довжини магнітопроводу 1 пристрою 7 для центрування зразків розраховуються з урахуванням можливості випробувань виробів, які мають максимальні типорозміри і різноманітні форми (замкнені, розімкнені). По-друге, струбцини 4, що пов'язані з полюсними наконечниками 3, рухливі впродовж магнітопроводу 1. Крім цього, довжина центрального пристрою 7 також вибрана з урахуванням можливості випробувань виробів різноманітних розмірів і форм. З цією метою упорні гайки 9 виконані рухливими та мають можливість регулювання положення при переміщенні їх з допомогою гвинта (елементи 8 і 10 на рис. 2.1). Таким чином забезпечується *універсальність застосування* пермеаметра по відношенню до розмірів і форм випробовуваних виробів.

Наступною вимогою є те, що сума *магнітних опорів* всіх елементів магнітопроводу і повітряних зазорів у місцях контакту полюсних наконечників і виробу повинна бути суттєво меншого магнітного опору випробовуваного зразка. Щоб виконати цю умову, необхідно було звести до мінімуму повітряні зазори у магнітному колі системи «пермеаметр-зразок». Для цього були розроблені притисні пристрої у вигляді струбцин 4 з упорами 5 і пружинами 6. Вони надійно фіксують статичне положення системи «пермеаметр-зразок» і забезпечують у ній мінімальні повітряні зазори. Додатковим заходом є ретельне шліфування контактних поверхонь наконечників і магнітопроводу.

Також потрібно виготовляти елементи магнітопроводу з площею перерізу, яка значно (у 100 і більше разів) перевищує площу перерізу випробовуваних виробів. Отже, залежно від маси випробовуваного виробу різко підвищується маса пермеаметра, що є одним з основних його недоліків. Тому в таких випадках їх виконують стаціонарними (нерухомими) або у разі необхідності – на візках.

Мінімальні *розсіювання* основного магнітного потоку забезпечуються такими заходами. Застосовуються полюсні наконечники 3 з метою підвищення відстані (повітряного зазору) між магнітопроводом 1 і зразком 14. Тим самим практично усувається потік розсіювання  $\Phi_{p3}$  (рис. 2.3). Додатковим заходом є розміщення каркасів 11, 12 з секціями вимірювальної обмотки на краях наконечників 3 (рис. 2.1). Це дозволяє вимірювати тільки робочі магнітні потоки  $\Phi$ . Потоки розсіювання  $\Phi_{p1}$ ,  $\Phi_{p1}$  і  $\Phi_{p3}$  не враховуються, оскільки вони не пересікають площини вимірювальних котушок 11 і 12 (рис. 2.3).

Крім цього, наявність двох секцій вимірювальної обмотки дозволяє значно підвищити *чутливість* пермеаметра до вимірюваних величин.

Вплив провідностей шляхів витоків потоку в повітрі (рис. 2.4), які шунтують магнітні опори виробу, можна значно зменшити за допомогою попереднього градування пермеаметра з використанням атестованих стандартних зразків серійної продукції.

При роботі пермеаметра в режимі вимірювань динамічних магнітних характеристик для виконання вимоги *однорідного намагнічування* у його перерізі необхідно виконання ще двох умов:

1) глибина  $\delta_1$  проникнення змінного магнітного поля повинна бути більше половини товщини контрольованого зразка;

2) глибина  $\delta_2$  проникнення змінного магнітного поля повинна бути більше половини товщини пластини шихтованого магнітопроводу.

Ці вимоги можна представити у вигляді двох відповідних нерівностей:

$$\delta_1 = \sqrt{2/(\mu_0 \mu_{r0} \sigma_0 \omega)} > \frac{\Delta_0}{2}, \quad (3.1)$$

$$\delta_2 = \sqrt{2/(\mu_0 \mu_{rM} \sigma_M \omega)} > \frac{\Delta_M}{2}, \quad (3.2)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна;  $\mu_{r0}$  і  $\mu_{rM}$  – магнітні проникності матеріалу зразка і пластини шихтованого магнітопроводу відповідно;  $\sigma_0$  і  $\sigma_M$  – питомі електричні провідності матеріалу зразка і пластини шихтованого магнітопроводу відповідно;  $\omega$  – циклічна частота зміни магнітного поля;  $\Delta_0$  і  $\Delta_M$  – товщини зразка і пластини магнітопроводу відповідно.

Ці вимоги виконуються шляхом попередніх розрахунків величин вказаних глибин  $\delta$  та наступного вибору пластин для шихтованого магні-

топроводу пермеаметра з товщиною не більшою, аніж  $\Delta_m$ . Також враховується використання його для випробувань зразків із товщиною, що не перевищує величини  $\Delta_0$ .

Застосування пристрою 7 необхідно для точного центрування зразків різних типорозмірів і форм відносно осей симетрії пермеаметра, що особливо важливо при випробуваннях замкнених зразків, і є заходом для підвищення *точності вимірювань*.

Усі перелічені технічні рішення у сукупності дозволяють реалізувати в конструкції пермеаметра відстроювання від впливу ряду потоків розсіяння на результати контролю і підвищити точність магнітних вимірювань.

*Автоматизація* процесу підготовки пермеаметра до вимірювань (установки та фіксації випробовуваного зразка на полюсних наконечниках) достатньо легко здійснюється за рахунок механічного сполучення упорів 5 з простим двохпозиційним маніпулятором.

*Зручність* застосування забезпечується практично всіма вузлами конструкції, зокрема елементами притискного та центрувального пристроїв.

В цілому конструкція пермеаметра не переобтяжена не функціональними деталями, тому є *простою* і достатньо *надійною*.

Слід звернути увагу на те, що елементи конструкції, які сполучені з магнітопроводом та його полюсними наконечниками, повинні виготовлятися із немагнітних та непровідних матеріалів.

### **3.2. Конструктивні рішення і області застосування пермеаметрів**

Усі сформульовані вимоги були також враховані під час створення серії універсальних пермеаметрів, які призначені для визначення магнітних характеристик виробів різних конфігурацій.

Проведені дослідження розглянутого вище пристрою [8] виявили помітне погіршення його характеристик точності під час випробувань виробів, які мають лише одну вісь симетрії. Цей факт викликаний появою додаткових магнітних потоків розсіювання, які важко врахувати шляхом розрахунків.

Усунути вплив цих факторів на результати контролю характеристик вказаних деталей дозволяє інша модифікація пристрою [9], конструкція якого проілюстрована на рис. 3.1.

В цьому пермеаметрі вимірювальна обмотка розміщена у складі чотирьох секцій 3 – 6 на магнітопроводі 1 по обидві сторони від контактних зон останнього з виробом 16. Обмотки у кожній парі секцій (3, 4 та 5, 6) з'єднані між собою послідовно-зустрічно, а самі пари котушок – послідовно-узгоджено. Необхідність такого рішення пояснює схема магнітного кола (рис. 3.2), де вказані траєкторії силових ліній додаткових потоків розсіяння  $\Phi_{p1}$  і  $\Phi_{p2}$ .



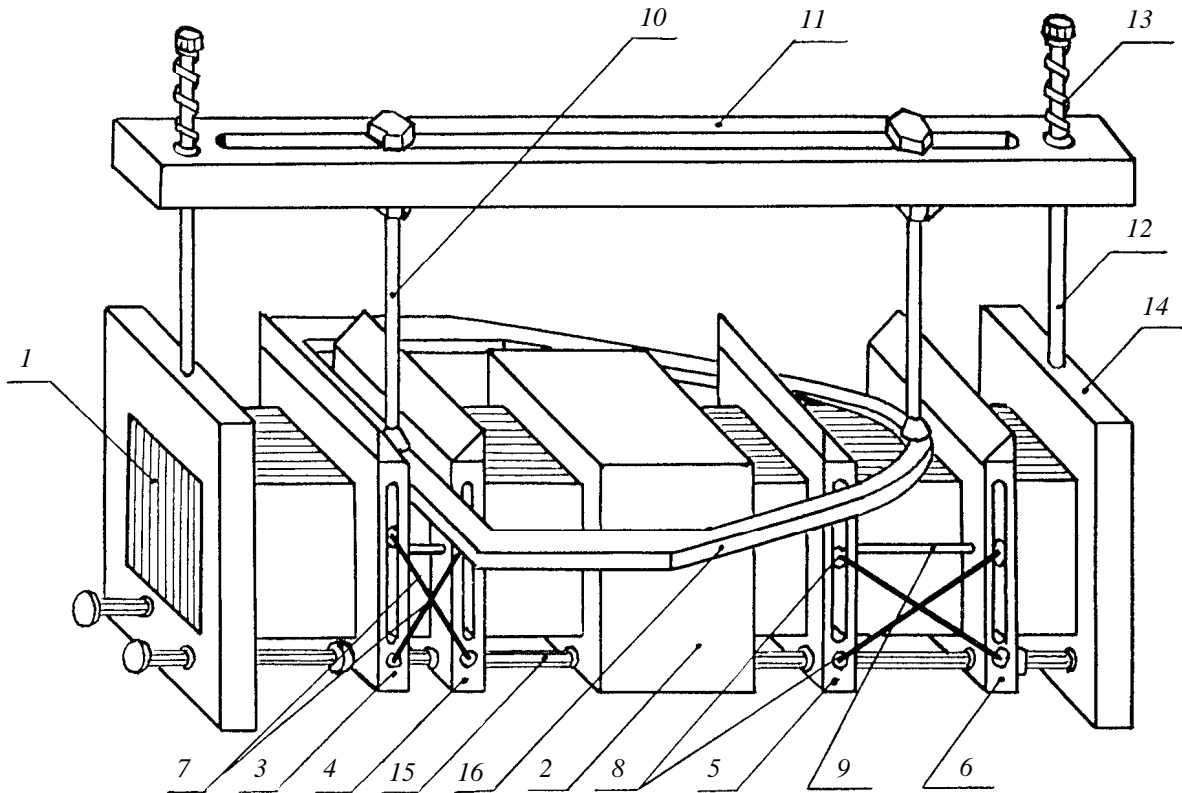


Рисунок 3.1 – Конструкція модифікованого пермеаметра

Експериментально встановлено, що ці потоки неоднакові за величиною із-за асиметрії виробу відносно осі, яка є поперечною до магнітопроводу. Тому, як видно на рис. 3.2, обмотки першої пари секцій 3 і 4 пронизує сумарний потік  $\Phi_{\Sigma 1}$ , який визначається із формули

$$\Phi_{\Sigma 1} = 2\Phi + 2\Phi_{p1} + 2\Phi_{p3}, \quad (3.3)$$

а обмотки другої пари пронизує інший сумарний потік  $\Phi_{\Sigma 2}$ :

$$\Phi_{\Sigma 2} = 2\Phi + 2\Phi_{p2} + 2\Phi_{p3}, \quad (3.4)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік у половині замкнутого зразка;  $\Phi_{p3}$  – потік розсіювання, який замикається на полюсах магнітопроводу.

При зустрічному з'єднанні обмоток в кожній парі секцій із сумарних потоків  $\Phi_{\Sigma 1}$  і  $\Phi_{\Sigma 2}$  віднімаються відповідні потоки розсіювання:

$$\Phi = \frac{1}{2} \Phi_{\Sigma 1} - \Phi_{p1} - \Phi_{p3}, \quad (3.5)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \Phi_{\Sigma 2} - \Phi_{p2} - \Phi_{p3}. \quad (3.6)$$

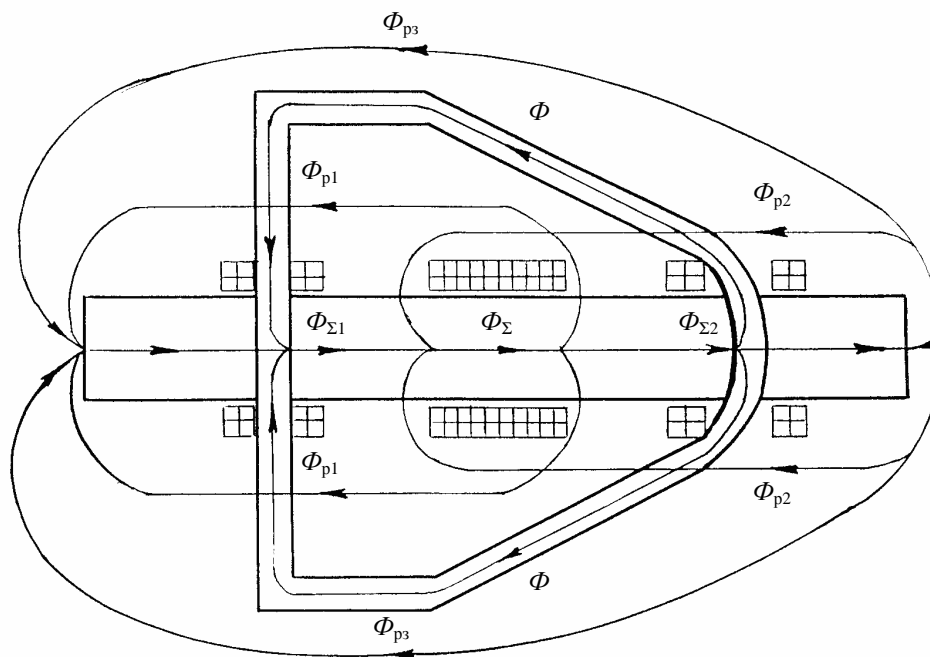


Рисунок 3.2 – Схема магнітного кола модифікованого пермеаметра

Оскільки пари котушок з'єднані між собою послідовно-узгоджено, то, якщо скласти суму (3.5) і (3.6), можна отримати формулу для робочого потоку  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{1}{4}(\Phi_{\Sigma 1} + \Phi_{\Sigma 2}) - \frac{1}{2}(\Phi_{p1} + \Phi_{p2}) - \Phi_{p3}. \quad (3.7)$$

Отже, видно, що е.р.с., яка наводиться у вимірювальній обмотці пермеаметра, буде залежати тільки від цього робочого потоку  $\Phi$ .

Цей пермеаметр дозволяє автоматизувати розміщення, фіксацію і заміну випробуваного виробу. Для цього секції вимірювальної обмотки виконані розсувними. При цьому каркаси цих обмоток з'єднані важелями 7 з шарнірами 8 та пружними елементами 9, які дозволяють автоматично центрувати виріб 16 відносно магнітопровода 1 (рис. 3.1). Стабільність притискання зразка до робочої поверхні магнітопровода забезпечується за допомогою рухливих упорів 10, планки 11, штанг 12 з пружинами 13 і обоймами 14. При встановленні зразка на пермеаметр верхні грані каркасів 3–6 направляють рух зразка. В цій та подальших конструкціях пермеаметрів всі елементи (крім магнітопроводів) виготовляються з діелектричних матеріалів. Зміщення пар секцій 3, 4 і 5, 6 при контролі виробів інших розмірів здійснюється за допомогою гвинтів 15.

Розглянуті вище пермеаметри призначені для магнітних випробувань окремих пластин або наборів з 2–10 пластин із тонколистової електротехнічної сталі. Однак, під час виготовлення різноманітних електричних машин,

пристроїв та їх елементів необхідно проводити контроль магнітних параметрів шихтованих або суцільних деталей (наприклад, магнітопроводів). Застосування у цих випадках раніш розглянутих пермеаметрів недоцільно зважаючи на зменшення точності вимірювань, яке обумовлене нерівномірним намагнічуванням у перерізі виробу за його висотою (товщиною).

Цей недолік був подоланий у пермеаметрі [10], конструкція якого наведена на рис. 3.3 (позначення елементів на цьому рисунку (позиції 5–11) аналогічні позначенням на рис. 2.1).

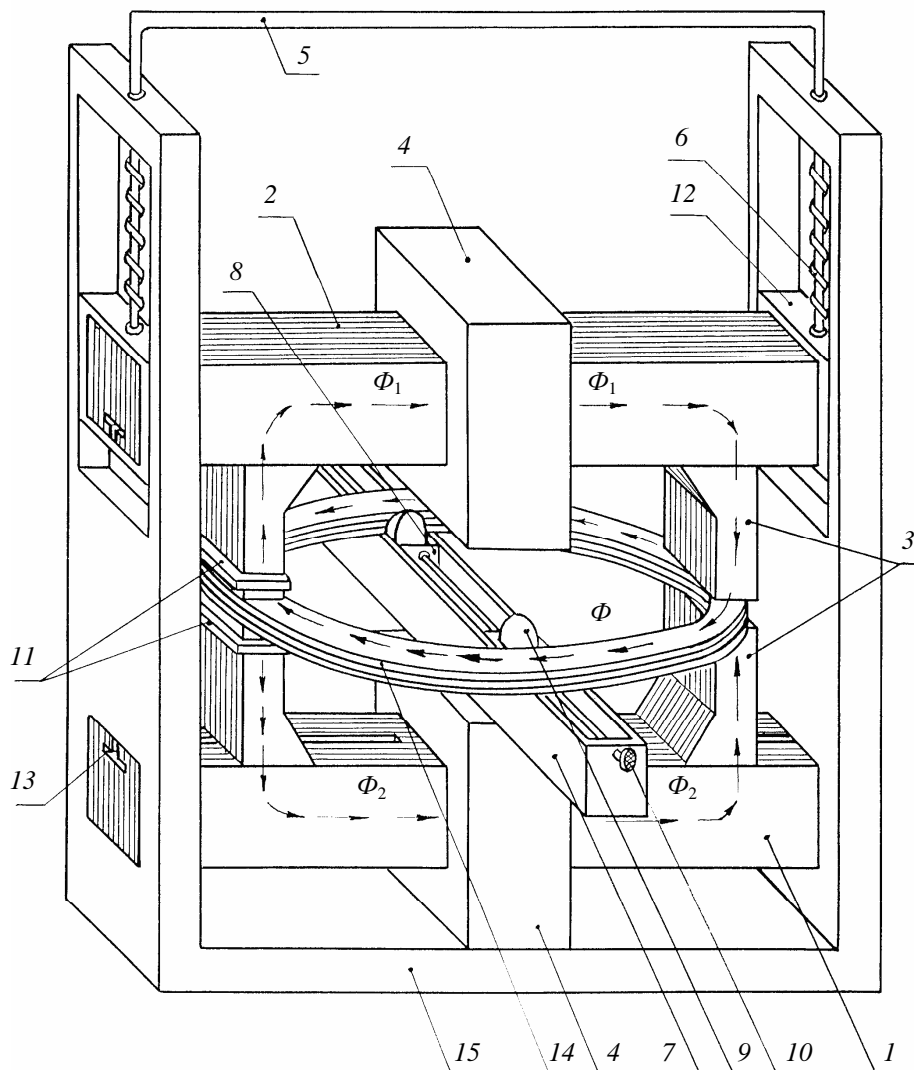


Рисунок 3.3 – Пермеаметр з двома магнітопроводами

Він додатково забезпечений другим магнітопроводом 2 з ідентичною намагнічувальною обмоткою 4 і полюсними наконечниками 3. Намагнічувальні обмотки 4 обох магнітопроводів (1, 2) з'єднані послідовно-зустрічно з метою створення магнітних потоків  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , які разом утворюють сумарний потік  $\Phi$  у виробі. Таким чином відбувається рівномірне намагнічування виробу за його перерізом. Вимірювальні котушки 11 з'єднані

послідовно-узгоджено та розміщені на кінцях суміжних наконечників 3, що дозволяє вимірювати лише робочий потік  $\Phi$ . Пристрій 7 забезпечує центрування деталі 14. Наконечники 3 виконані з Т-подібними виступами, які входять у пази 13 магнітопроводів та мають можливість руху для випробувань виробів різноманітних типорозмірів. Перший магнітопровід закріплений у вікнах П-подібного каркасу 15, а другий – у рухливих обоймах 12. Фіксація виробу на магнітопроводах пермеаметра здійснюється за допомогою упору 5 і пружин 6.

Якщо товщина (висота) виробу замкненої форми значно перевищує його радіальну ширину, то доцільно застосовувати автоматизований пермеаметр [11], який виконаний також з двома рухливими шихтованими магнітопроводами, що адаптовані до складної внутрішньої поверхні виробу (рис. 3.4).

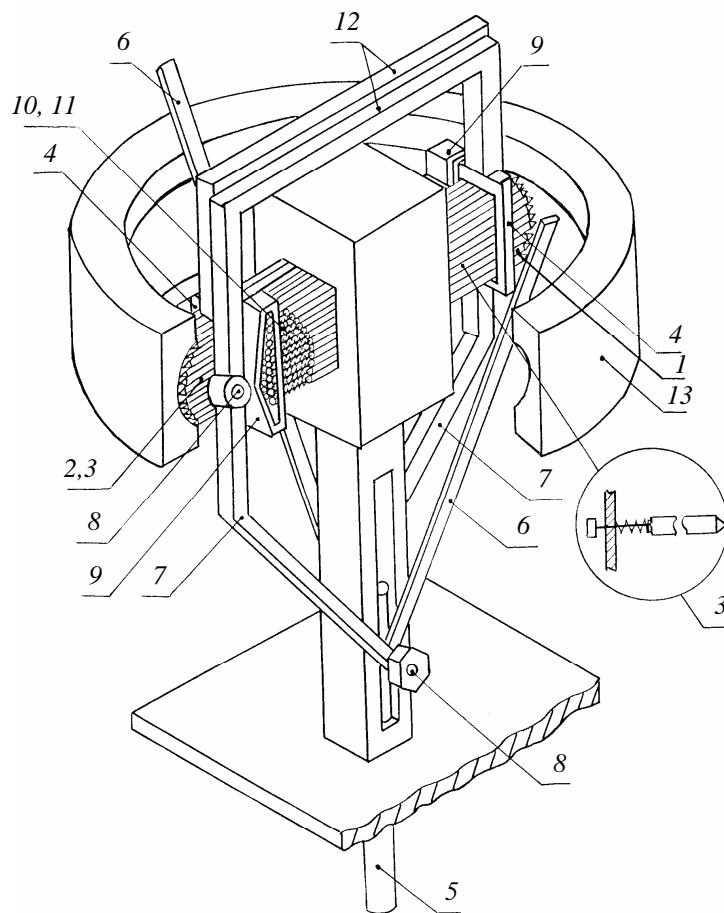


Рисунок 3.4 – Автоматизований пермеаметр із змінною геометрією полюсів

Відмінною особливістю цього пермеаметра є те, що його магнітопровід виконаний у вигляді двох пакетів 1, 2 стрижнів 3. При цьому і стрижні в пакетах, і самі пакети встановлені з можливістю вільного взаємного переміщення. Така змінна геометрія полюсів дозволяє здійснювати

надійний контакт конусних кінцівок стрижнів із внутрішньою поверхнею виробів замкненої форми будь якого профілю.

Слід відзначити, що всі підготовчі операції виконуються одночасно і автоматично при зворотно-поступальному русі штока 5. Центрування деталі виконують пружні штанги 6. Під час руху штока 5 у вертикальному напрямі вниз поворотні важелі 7, що обертаються на вісі 8, за допомогою обойм 9 приводять до переміщення пакетів 1, 2 у горизонтальній площині (тобто подовжують магнітопровід) і притискають стрижні 3 до внутрішньої поверхні виробу 13. Остання операція здійснюється пружинами 10 фіксаторів 11, які відтискають стрижні 3 від стінок обойм 9. При цьому пакети 1, 2 розсуваються у протилежні боки разом з каркасами обмоток 4, які з'єднані з обоймами 9 за допомогою П – подібних пластин 12. Одночасно з рухом штоку 5 переміщуються і пружні штанги 6. Вони центрують виріб відносно магнітопроводу. Для зміщення випробовуваної деталі виконують зворотний рух штока 5.

Такий конструктивний підхід дозволяє разом з автоматизацією підготовчих операцій підвищити точність контролю за рахунок надійного контакту системи «пермеаметр – виріб» та подальших вимірювань робочого магнітного потоку, який зондує тільки деталь.

Аналогічний принцип застосування рухливих магнітопроводів із змінною геометрією полюсів був використаний при розробці пермеаметра для контролю масивних конструкцій (наприклад, сердечників статорів електродвигунів) [12], доступ до складного профілю внутрішніх поверхонь яких є обмеженим (рис. 3.5).

Його конструкція базується на двох розсувних Г-подібних пакетах 1, 2 пластин 3. В зоні перекриття пакетів на каркасі розміщені намагнічувальна 4 та вимірювальна 5 обмотки. Фіксація пластин при контакті з поверхнею деталі 9 здійснюється за допомогою розсувної струбцини 6 і обойм 7 з пружними (гумовими) прокладками 8. Вільні кінці полюсів виконані із зрізами, завдяки яким під час розміщення пермеаметра на виріб пакети пластин і самі пластини розходяться таким чином, що останні приймають конфігурацію зовнішньої поверхні виробу. Крім цього, зрізи дозволяють зменшити потоки розсіювання, які замикаються на полюса магнітопровода. При цьому сумарний потік  $\Phi_{\Sigma}$  замикається через виріб і при цьому розгалужується на декілька робочих потоків, які порівняно однаково намагнічують виріб уздовж його висоти.

Такий пермеаметр призначений для магнітного контролю сердечників статорів, патрубків із заглушками та інших деталей складного профілю як замкненої, так і розімкненої форм.

Підвищити точність магнітних вимірювань подібних виробів дозволяє автоматизований пермеаметр [13], конструкцію якого ілюструє рис. 3.6 (тут позначення елементів позицій 1–9 аналогічні позначенням на рис. 3.5).

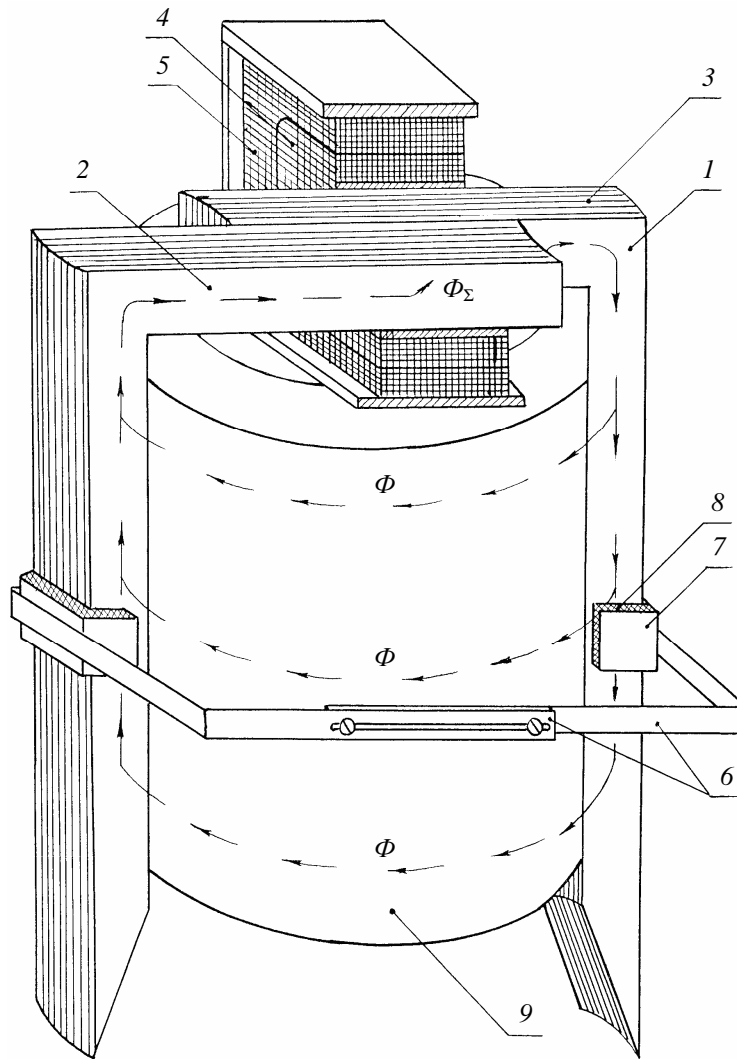


Рисунок 3.5 – Пермеаметр для контролю сердечників статорів

Конструкція цього пермеаметра досить складна, оскільки він розроблений для стаціонарного контролю статорів і подібних масивних конструкцій в умовах конвеєрної зборки.

Дослідження попередньої конструкції (рис. 3.5) привели до висновку про нерівномірне намагнічування виробу. Крім цього, частина потоку  $\Phi_{\Sigma}$  розсіюється між кінцями полюсів. Тому у цьому пристрої магнітопровід виготовлений з двох П-подібних пакетів 1, 2 пластин 3 і має замкнену конструкцію.

Принцип утворення магнітного потоку у виробі 9 такий же, як і у попередньому пермеаметрі (рис. 3.5). При цьому досягається рівномірне намагнічування виробу вздовж його висоти магнітним потоком, який отримують при суперпозиції двох потоків, що мають зустрічний напрям руху, та виключення практично усіх потоків розсіювання, які були притаманні відомим пристроям.

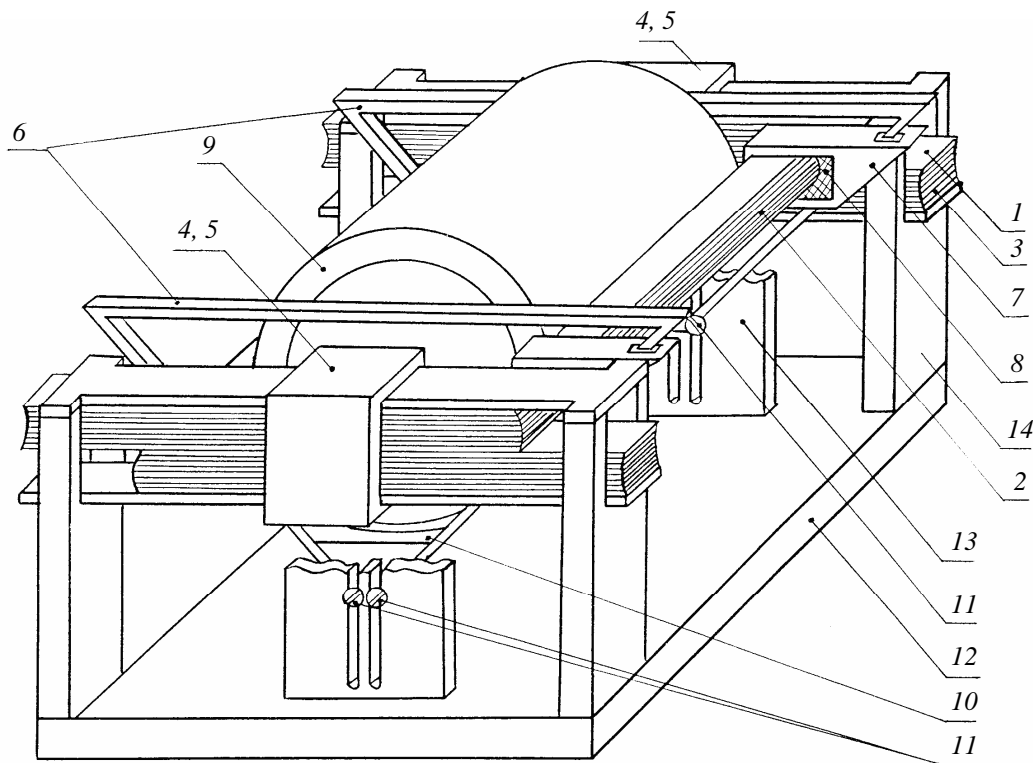


Рисунок 3.6 – Стационарний пермеаметр для магнітного контролю осердь статорів електродвигунів

Після розміщення виробу 9 на увігнуту поверхню полки 10 він центрується самостійно. Далі відбувається переміщення чотирьох дротів 11 спільно із закріпленими на них трикутними струбцинами 6, які з'єднані полкою 10. Суміжні сторони струбцин 6, що з'єднані з дротами 11, утворюють прямий кут і мають можливість ковзати в отворах обойм 7. Гумові прокладки 8 віджимають пластини 3 у бік виробу. Відстань між полкою 10 і площиною зіткнення граней пакетів встановлено рівним половині відстані між внутрішніми гранями подовжніх частин пакетів 1 і 2. Такі конструктивні особливості при вертикальному русі (опусканні) дротів 11 (і полки 10 з виробом) дозволяють автоматично виконувати адекватне горизонтальне зустрічне зміщення пакетів 1, 2 та пластин 3 у них за рахунок передачі зусилля, яке прикладається до дротів, за допомогою струбцин 6, обойм 7 і прокладок 8. У момент контакту пластин 3 обох пакетів з виробом, останній центрується відносно магнітопроводу. Зміна деталей здійснюється після поворотного руху осей 11. Основні елементи пермеаметра розташовані на стаціонарній платформі 12 з направляючими пластинами 13 і стійками 14.

Наступна модифікація пермеаметрів (рис. 3.7) пропонується для локального контролю і визначення середніх значень магнітних характеристик у перетині деталі протяжних конструкцій, доступу до торців яких немає [14].

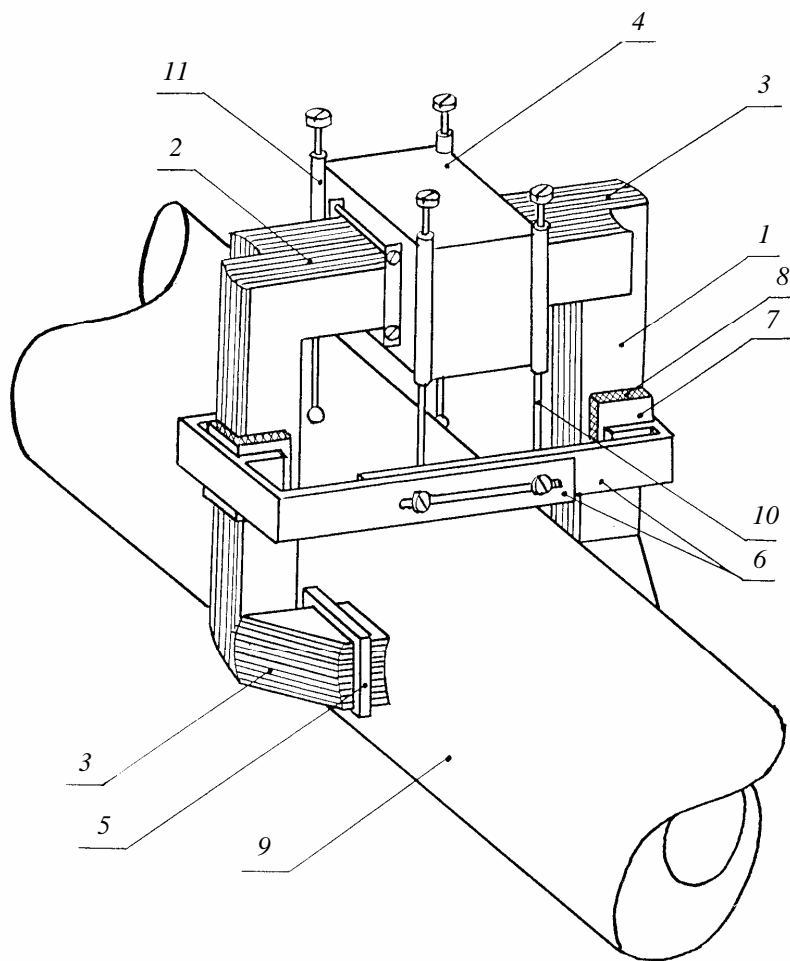


Рисунок 3.7 – Пересувний пермеаметр для локального контролю

Особливістю такого пермеаметра є виконання Г-подібних пластин 3 у вигляді об'ємних фігур, полюсні наконечники яких повернуті під прямим кутом до площини пластин. Таке фігурне виконання пластин дозволяє їм вишиковуватися уздовж осі виробу. На цьому рисунку позначення елементів (позиції 1–9) аналогічні рисунку 3.5.

Центрування пермеаметра відносно об'єкту 9 відбувається за допомогою регульованих упорів 11, які розміщені в обоймах 11. Для зручності переміщення пермеаметра уздовж об'єкту контролю упори встановлені на колесах.

Під час проведення локального контролю зменшують проміжок між полюсами і обертають пермеаметр відносно осі виробу. У випадку визначення середніх значень магнітних характеристик відстань між полюсами встановлюють такою, щоб вона дорівнювала поперечному розміру (наприклад, діаметру) деталі. Такий пермеаметр призначений для контролю якості зварних швів трубопроводів, дефектоскопії бурових колон та інших подовжених конструкцій.



Необхідно відмітити, що з'єднання рухливих частин у розглянутих пермеаметрах з приводними механізмами зворотно-поступального руху дозволяє повністю автоматизувати підготовчі операції. Це дозволяє застосовувати ці пермеаметри у системах контролю і управління технологічними процесами.

Магнітні характеристики виробів, які визначаються за допомогою розглянутих пермеметрів, можна розрахувати за формулами (2.13)–(2.21). Розрахунок параметрів цих пристроїв виконують за алгоритмом, що наведений нижче.

### 3.3 Розрахунок параметрів пристроїв

Під час проектування конструкцій пермеметрів необхідно враховувати вимоги до їх магнітопроводів, які наведені у розділі 3.1. Розрахунок електричних параметрів пермеметрів здійснюється наступним шляхом.

Спочатку складається схема магнітного кола пермеметра з виробом та її еквівалентна схема (дивись наприклад, рис. 2.3 і рис. 2.4). Із виразу (2.2) можна отримати співвідношення для розрахунку числа витків  $N_H$  намагнічувальної котушки пермеметра:

$$N_H = \Phi \cdot Z_M / I_H. \quad (3.8)$$

Повний магнітний опір  $Z_M$  магнітного кола розрахуємо за допомогою формул (2.3)–(2.6). Величину робочого магнітного потоку  $\Phi$ , який зондує випробовуваний виріб, визначаємо як

$$\Phi = B_{\max} \cdot S, \quad (3.9)$$

де  $B_{\max}$  – магнітна індукція насичення матеріалу виробу;  $S$  – площа перерізу деталі.

Значення  $B_{\max}$  для конкретного матеріалу випробовуваного виробу вибирають експериментально або з довідників (наприклад, [15]). Також вибирають і максимально допустимі значення намагнічувального струму  $I_H$ . Тоді діаметр дроту намагнічувальної обмотки розраховують за формулою, мм:

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4 \cdot I_H}{\pi \cdot j_{\text{доп}}}}, \quad (3.10)$$

де  $j_{\text{доп}}$  – допустиме значення густини струму у дроті обмотки (як правило, воно складає (3–5) А/мм<sup>2</sup>).

Розраховане значення діаметру дроту округлюють у більший бік до стандартної величини. При цьому використовують довідкові дані, які приведені, наприклад, у Додатку А.

Далі розраховують площу вікна, щоб розмістити намагнічувальну обмотку на магнітопроводі:

$$S_{01} = \frac{\pi \cdot d_{\text{п}}^2 \cdot N_{\text{н}}}{4 \cdot k_3}, \quad (3.11)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт заповнення обмоткою вікна, значення якого обирається у залежності від способу намотки дроту (у випадку рядової укладки значення  $k_3$  приймається рівним 0,85).

Потім визначають число витків  $N_{\text{в}}$  вимірювальної обмотки із використанням співвідношення

$$N_{\text{в}} = \frac{U_{\text{ср.мін}}}{k_1 \cdot f \cdot S \cdot B_{\text{мін}}}, \quad (3.12)$$

де  $U_{\text{ср.мін}}$  – мінімальне значення напруги  $U_{\text{ср}}$ , яке залежить від чутливості вимірювального приладу, який застосовують;  $B_{\text{мін}}$  – найменша величина магнітної індукції, яка підлягає вимірюванню;  $k_1$  – градууювальний коефіцієнт (дивись (2.13)).

Формула (3.12) застосовується під час динамічних вимірювань, а для статичного режиму роботи пермеаметра необхідно використовувати співвідношення, отримане із формули (2.15)

$$N_{\text{в}} = \frac{\Delta \Psi_{\text{мін}}}{k_3 \cdot B_{\text{мін}} \cdot S}. \quad (3.13)$$

При цьому необхідно перевірити виконання умови

$$R = \rho \frac{l_{\text{д}}}{S_{\text{д}}} \leq R_{\text{доп}}, \quad (3.14)$$

де  $R$  – опір дроту вимірювальної обмотки;  $\rho$  – питомий опір матеріалу цього дроту;  $l_{\text{д}}$  та  $S_{\text{д}}$  – довжина та площа перерізу дроту відповідно;  $R_{\text{доп}}$  – допустиме значення опору дроту, яке обмежує застосування магнітовимірювальної апаратури (наприклад, веберметра) і яке відоме з технічної документації на прилад.

Після розрахунку числа витків  $N_{\text{в}}$  і вибору площі перерізу  $S_{\text{д}}$  дроту вимірювальної обмотки розраховують площу вікна  $S_{02}$ , яке потрібне для намотки вимірювальної обмотки, за формулою, аналогічною формулі (3.11). Потім знаходять площу вікна для обох обмоток, як

$$S = S_{01} + S_{02}. \quad (3.15)$$

## КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть основні вимоги до конструкцій пермеаметрів.
2. Як забезпечується мінімальний магнітний опір у системі "пермеаметр-виріб"?
3. Назвіть заходи щодо забезпечення мінімальних розсіювань основного магнітного потоку у пермеаметрі.
4. Які умови необхідно виконати для повного намагнічування виробу у його перерізі?
5. Визначте області застосування для кожної конструкції пермеаметрів.
6. Наведіть порядок розрахунку технічних параметрів пристроїв.

## 4. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЕРМЕАМЕТРІВ

Метрологічне забезпечення – це встановлення та застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності і потрібної точності вимірювань [17]. Метрологічне забезпечення складається із наукової, законодавчої, нормативної, технічної та організаційної основ [18].

Його науковою основою є наука про вимірювання – метрологія, організаційною основою – метрологічна служба України, нормативною основою – державні стандарти та інші документи державної системи забезпечення єдності вимірювань, законодавчою основою – закони України та постанови Кабінету Міністрів України, що спрямовані на забезпечення єдності вимірювань. Технічну основу метрологічного забезпечення складають 4 системи: державних еталонів одиниць фізичних величин; робочих еталонів та зразкових засобів вимірювань; стандартних зразків складу і властивостей речовин і матеріалів; робочих засобів вимірювальної техніки (до складу яких входять і пермеаметри як вимірювальні перетворювачі).

Метрологічне забезпечення пермеаметрів має за мету розробку і застосування нових типів пермеаметрів; відповідних методів магнітних вимірювань і контролю; переліку засобів магнітних вимірювань; способів градування перетворювачів; оцінки і зменшення похибок вимірювань; бази стандартних зразків магнітних властивостей феромагнітних матеріалів і їх сплавів; стандартної нормативно-технічної документації.

В Україні діє серія міждержавних стандартів ГОСТ 12119.0-98 - ГОСТ 12119.8-98 під загальною назвою «Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств». Зокрема, в них встановлені стандартні методи вимірювання:

- ✓ магнітної індукції в пермеаметрі [18];
- ✓ питомих магнітних втрат і діючого значення напруженості магнітного поля [19];

- ✓ амплітуд магнітної індукції і напруженості магнітного поля [20];
- ✓ відносної магнітної проникності та питомих магнітних втрат мостом змінного струму [21].
- ✓ як приклад розглянемо порядок проведення магнітного контролю в пермеаметрі зразків з електротехнічної сталі.

#### 4.1. Метод вимірювання магнітної індукції в пермеаметрі

Метод вимірювання магнітної індукції при напруженості постійного магнітного поля у діапазоні (1000–30000) А/м в пермеаметрі встановлений стандартом ГОСТ 12119.2-98 [18]. У ньому розглянутий порядок проведення підготовки зразків для випробувань, наведена схема вимірювальної установки і апаратура, описаний порядок підготовки до вимірювань і проведення їх, а також визначені правила обробки результатів вимірювань.

*Підготовка зразків для випробувань* полягає у тому, що зразки виготовляють з полос довжиною від 400 до 600 мм та шириною  $(30 \pm 0,2)$  мм. Полоси зразка не повинні відрізнятись один від одного за довжиною більше ніж на  $\pm 0,2$  %. Площа перерізу зразків повинна бути від  $0,5 \text{ см}^2$  до  $3,0 \text{ см}^2$ .

Стандартна *схема вимірювальної установки* наведена на рис. 4.1.

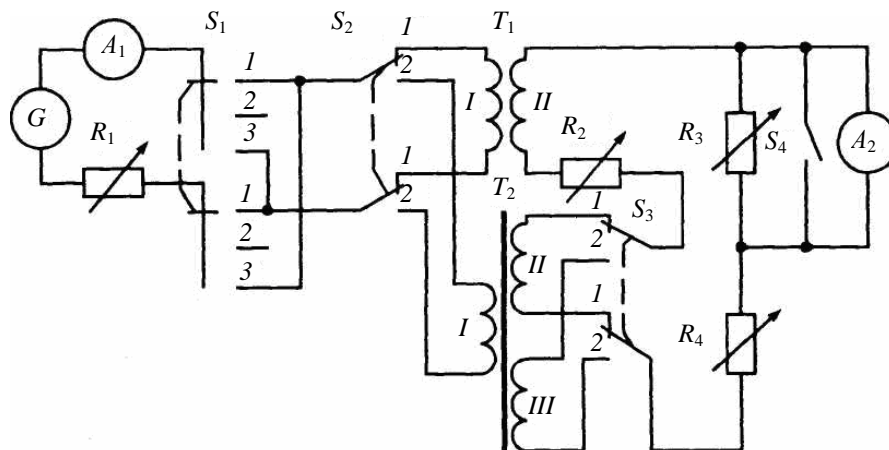


Рисунок 4.1 – Схема вимірювальної установки з пермеаметром

Визначені наступні *вимоги до апаратури*, що застосовується.

Амперметр  $A_1$  (рис. 4.1) для вимірювання постійного струму і подальшого визначення напруженості магнітного поля повинен мати межі вимірювань від 15 мА до 15 А, а клас точності – не нижче 0,2. Допускається використовувати вольтметр постійного струму з резистором.

Балістичний гальванометр  $A_2$  для вимірювань магнітного потоку повинен мати період власних коливань не менше 15 с; режим періодичний, близький до критичного; чутливість – не менше 500 поділ/мВб; розряд за постійністю нульового положення – не більше 1. Допускається використовувати балістичний гальванометр із шунтом, магнітоелектричний або елек-

тронний інтегруючий веберметр для вимірювання магнітного потоку від 0,1 мВб до 10,0 мВб з похибкою у межах  $\pm 1\%$ ; веберметри з дільником напруги для розширення меж вимірювання та (або) отримання показів, які чисельно дорівнюють амплітудам магнітної індукції у зразку.

Трансформатор  $T_1$  для градування балістичного гальванометра повин мати коефіцієнт взаємної індуктивності від 1 мГн до 10 мГн, а клас точності – не нижче 0,2.

Резистор  $R_1$  вибирається з можливістю плавного регулювання струму в інтервалі від 2 мА до 15 А з дискретністю 0,1 %. Магазини опорів  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  для регулювання чутливості і режиму роботи гальванометра повинні мати межі від 0,1 Ом до 10 кОм з класом точності не нижче 0,2.

Пермеаметр  $T_2$  для намагнічування повинен мати котушку  $I$ , усередині якої розміщують випробовуваний зразок, та ярма, які мають замикати зразок з обох боків. Котушка  $II$  пермеаметра  $T_2$  для вимірювання напруженості магнітного поля повинна бути прикладена до поверхні зразка і мати товщину не більше 5 мм, ширину –  $(26 \pm 1)$  мм, постійну котушки  $k_H$  не менше  $0,1 \text{ м}^2$ , що визначена з похибкою у межах  $\pm 1\%$ . Опір обмотки котушки повинен бути менше ніж зовнішній критичний опір гальванометра або максимальний зовнішній опір електричного кола веберметра. Котушка  $III$  пермеаметра  $T_2$  для вимірювань магнітної індукції повинна бути рівномірно намотана на ізольовану центральну частину зразка. Котушки  $II$  і  $III$  повинні розміщуватися поряд. Їх числа витків обирають таким чином, щоб показ гальванометра або веберметра складав не менше 40 % верхньої межі вимірювань.

Джерело живлення  $G$  для намагнічування зразків повинен забезпечувати постійну вихідну напругу не менше 20 В, зміну намагнічувального струму – не більше 0,2 % за хвилину, відношення амплітуди змінної складової вихідної напруги до постійної складової – не більше 0,05 %. За умови, що напруженість магнітного поля складає більше 5 А/м, допускається підвищення цього співвідношення до 0,1 %. Також допускається застосовувати стабілізатор постійної напруги.

Перемикачі  $S_1$  і  $S_2$  повинні бути розраховані на максимальний струм 5 А, а перемикачі  $S_3$  і  $S_4$  - мати опір не більше 0,02 Ом в замкненому положенні і термоелектрорушійну силу не більше 1 мкВ.

Під час підготовки до проведення вимірювань виконують наступні операції.

Площа перерізу  $S$  розраховується за формулою

$$S = \frac{m}{\gamma l_{\text{п}}}, \quad (4.1)$$

де  $m$  – маса зразку, кг;  $l_{\text{п}}$  – довжина полоси зразка, м;  $\gamma$  – питома маса матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ .

Останню розраховують, як

$$\gamma = 7865 - 65(K_{Si} + 1,7K_{Al}), \quad (4.2)$$

де  $K_{Si}$  и  $K_{Al}$  – масові частки кремнію та алюмінію у %.

Похибка вимірювання маси зразка не повинна виходити за межі  $\pm 0,2$  %, а похибка вимірювання довжини полос – за межі  $\pm 0,2$  %.

Перед початком вимірювань необхідно провести градування балістичного гальванометра з метою визначення його постійних  $C_H$  і  $C_B$ . Градування проводять на установці (рис. 4.1) за відсутності випробуваного зразка.

Опір у електричному колі гальванометра під час градування повинен бути постійним. Струм в обмотці  $I$  котушки  $T_1$  повинен бути таким, щоб показ гальванометра складав від 20 до 50 % довжини шкали з нульовою позначкою посередині. Відхилення покажчика гальванометра повинно бути у той же бік, що і при визначенні магнітних величин.

Під час визначення величини постійної  $C_H$  гальванометр з'єднують з котушкою  $II$  пермеаметра. Перемикачі  $S_1$ ,  $S_2$  і  $S_3$  переводять у положення  $I$ , а ключ  $S_4$  – замикають. В обмотці  $I$  котушки  $T_1$  встановлюють задане значення струму  $I$ . Під час розімкнення електричних кіл перемикачами  $S_3$  і  $S_4$  визначають показання гальванометра  $\alpha$ . Операцію повторюють не менше трьох разів.

При визначенні постійної  $C_B$  гальванометр з'єднують з котушкою  $III$  пермеаметра. Перемикачі  $S_1$  и  $S_2$  переводять у положення  $I$ , перемикач  $S_3$  – у положення  $2$ , ключ  $S_4$  замикають і виконують операції згідно з порядком визначення  $C_H$ .

Постійні балістичного гальванометра  $C_H$  і  $C_B$  розраховують як середнє арифметичне постійних гальванометра  $C$ , які були отримані при не менше ніж трьох значеннях струму для кожної котушки пермеаметра.

Постійні  $C$  для заданого значення струму розраховують за формулою

$$C = \frac{M I}{\alpha_{cp}}, \quad (4.3)$$

де  $M$  – коефіцієнт взаємної індуктивності котушки  $T_1$ , Гн;  $\alpha_{cp}$  – середнє арифметичне значення показань гальванометра  $\alpha$ ;  $I$  – задане значення струму, А.

При застосуванні гальванометра з шунтом постійні слід визначати для кожного значення коефіцієнту шунтування.

При використанні веберметра з установки виключають: перемикач  $S_2$ , котушку  $T_1$  і резистори  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  (рис. 4.1).

Значення намагнічувального струму  $I_H$ , яке відповідає заданому значенню напруженості магнітного поля  $H$ , обчислюють за формулою

$$I_H = \frac{H l_0}{N_1}, \quad (4.4)$$

де  $l_0$  – довжина ділянки зразка усередині пермеаметра, м;  $N_1$  – число витків обмотки  $I$  котушки пермеаметра.

Показ гальванометра  $\alpha_H$ , який відповідає заданому значенню напруженості магнітного поля  $H$ , розраховують за формулою

$$\alpha_H = \frac{2\mu_0 K_H H}{C_H}, \quad (4.5)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнітна постійна, Гн/м;  $K_H$  – постійна котушки  $II$  пермеаметра, м<sup>2</sup>;  $C_H$  – постійна гальванометра, Вб/поділ.

При використанні прямолінійної шкали вводять поправку  $\Delta\alpha$ , яку розраховують, як

$$\Delta\alpha = -\frac{\alpha^3}{3L}, \quad (4.6)$$

де  $L$  – відстань між дзеркалом гальванометра і шкалою у поділках шкали.

У формулі (4.5) замінюють величину  $\alpha_H$  на величину  $\alpha'_H$ , яку обчислюють за формулою

$$\alpha'_H = \alpha_H - \Delta\alpha. \quad (4.7)$$

Показання веберметра  $\Phi_H$ , який відповідає заданому значенню напруженості магнітного поля  $H$ , розраховують за формулою

$$\Phi_H = 2\mu_0 K_H H. \quad (4.8)$$

*Порядок проведення вимірювань наступний.*

Вимірювання магнітної індукції у зразку засновано на імпульсно-індукційному методі. На установці (рис. 4.1) перемикач  $S_2$  переводять у позицію 2, перемикач  $S_3$  – у положення 1. Крім цього встановлюють намагнічувальний струм  $I_H$ , який відповідає заданому найменшому значенню напруженості магнітного поля. Далі проводять комутацію перемикачем  $S_1$ , розмикають ключ  $S_4$ , змінюють напрям струму перемикачем  $S_1$  і визначають показ гальванометра  $\alpha_H$ .

Якщо вимірний показ  $\alpha_H$  і розрахований за формулою (4.5) значенням  $\alpha_H$  розняться, то замикають ключ  $S_1$ , підвищують струм  $I_H$  і повторюють операції з визначення показу гальванометра до отримання потрібного значення  $\alpha_H$ .

У разі вимірювань магнітної індукції перемикач  $S_3$  переводять у положення 2 і визначають показ гальванометра  $\alpha_B$ . Далі встановлюють намагнічувальний струм, що відповідає найбільшому заданому значенню напруженості магнітного поля і повторюють попередні операції.

Якщо вимірюють магнітну індукцію за допомогою веберметра, то проводять аналогічні операції, які були описані вище.

*Обробку результатів вимірювань* проводять за наступними правилами.

Магнітну індукцію  $B_{и}$ , яка була виміряна за допомогою гальванометра, розраховують за формулою

$$B_{и} = \frac{C_B \alpha_B}{2 S N_3}, \quad (4.9)$$

де  $C_B$  – постійна гальванометра, Вб/поділ.;  $\alpha_B$  – показ гальванометра, поділ.;  $N_3$  – число витків у обмотці III пермеаметра;  $S$  – площа перерізу зразка, м<sup>2</sup>.

У разі використання прямолінійної шкали гальванометра вводять поправку  $\Delta\alpha$ , яку розраховують за формулою (4.6).

У формулі (4.9) величину  $\alpha_B$  замінюють на величину  $\alpha_B'$ , яку обчислюють за формулою

$$\alpha_B' = \alpha_B + \Delta\alpha. \quad (4.10)$$

Магнітну індукцію  $B$ , яка була виміряна веберметром, розраховують за формулою

$$B = \frac{\Phi_B}{2 S N_3}, \quad (4.11)$$

де  $\Phi_B$  – показання веберметра, Вб.

Похибка вимірювання магнітної індукції не повинна перевищувати межі  $\pm 1,5$  %.

## **4.2. Вибір засобів вимірювань**

Перелік засобів для магнітних вимірювань з пермеаметрами, що рекомендований ГОСТ 12119.0-98 [22], наведений у Додатку Б.

Однак на практиці часто бувають ситуації, коли немає у наявності рекомендованих засобів вимірювань. Чинними стандартами [18–21] передбачається можливість заміни рекомендованих засобів на інші аналоги. Але при цьому необхідно виконувати вимоги щодо метрологічних і технічних характеристик засобів вимірювальної техніки, які вибирають для заміни. Основними рекомендаціями щодо вибору засобів вимірювань є наступні правила.



По-перше, засоби, які обирають, повинні мати діапазони (границі) вимірювань, які вимагають стандарти. Оптимальним є вибір багатограничних приладів і пристроїв, оскільки їх застосування ліквідує апаратурну надмірність, спрощує роботу оператора, підвищує продуктивність контролю та зменшує витрати на його проведення.

По-друге, при виборі засобів вимірювань необхідно враховувати вимоги щодо точності вимірювальних приладів і пристроїв. Для цього вибирають прилади з класами точності, які є не нижчими ніж задані. Слід пам'ятати, що вибір приладів з необгрунтовано завищеними класами точності приведе до різкого підвищення вартості контролю.

Під час вибору гальванометрів слід пам'ятати про те, що їх чутливість є досить високою, тому їх градувальна характеристика не є стабільною і залежить від факторів зовнішнього впливу. У зв'язку з цим гальванометри не градуують у одиницях вимірюваної величини та їм не надають класів точності. Їх метрологічними характеристиками є чутливість до струму (або до напруги) та електричний опір рамки вимірювального механізму.

При виборі веберметрів необхідно узгоджувати діапазон їх вхідного опору з величинами опору джерела сигналу.

Для проведення динамічних магнітних вимірювань потрібно вибирати вимірювальні прилади з урахуванням їх частотного діапазону. Вибираючи частотний діапазон засобів вимірювань необхідно забезпечити неспотворене проходження сигналів вимірювальної інформації. Для цього частотний діапазон повинен бути ширше частотного спектру вхідних сигналів. З іншого боку, поява похибок вимірювань викликають завади, вплив яких зростає з розширенням частотного діапазону. Тому не слід прагнути до використання засобів вимірювань з необгрунтовано широким частотним діапазоном. Оптимальними будуть засоби вимірювань, які при мінімальному спотворенні сигналів максимально відфільтровують заваду.

### **4.3. Стандартні зразки магнітних властивостей**

Стандартний зразок складу і властивостей речовин і матеріалів (СЗ) є мірою у вигляді речовини або матеріалу із встановленими за результатами метрологічної атестації значеннями однієї або декількох величин, які характеризують властивості або склад цієї речовини або матеріалу.

Стандартні зразки знайшли досить широке застосування для магнітних вимірювань, метрологічної атестації, калібрування та перевірки засобів неруйнівного контролю, наукових приладів. Вони відтворюють значення величин, які характеризують фізичні, хімічні, технічні та інші властивості речовини або матеріалу, за винятком величин, які характеризують склад.

СЗ магнітних властивостей феромагнітних матеріалів призначені для забезпечення єдності і потрібної точності вимірювань за допомогою:

- градування, метрологічної атестації, калібрування і повірки пермеаметрів і магнітовиміральної техніки;
- метрологічної атестації методик виконання магнітних вимірювань;
- контролю показників точності вимірювань;
- вимірювання магнітних величин, що характеризують склад або властивості речовин та матеріалів, за допомогою методів порівняння.

За метрологічним призначенням вони можуть застосовуватись як робочі еталони або зразкові (еталонні) засоби виміральної техніки.

Залежно від сфери дії та області застосування визначається рівень затвердження СЗ. За цією ознакою вони поділяються на *державні* стандартні зразки (ДСЗ), *галузеві* стандартні зразки (ГСЗ) і стандартні зразки *підприємств* (СЗП). Тим СЗ, які входять до повірочних схем, присвоюються метрологічні розряди.

Стандартні зразки об'єднуються у типи, якими є класифікаційні групи зразків. Визначальними ознаками груп є одна і та ж речовина, з якої виготовлені СЗ, та єдина технічна документація, за якою відбувалося їх виготовлення. Типи СЗ допускаються до застосування за умови їх затвердження і реєстрації у відповідному реєстрі.

Для кожного типу СЗ під час їх атестації встановлюється строк дії (не більше 10 років) і визначаються метрологічні характеристики, які нормуються у документації на їх розробку і випуск. До таких відносяться:

- ✓ *атестоване значення* (значення атестованої характеристики зразка, що ним відтворюється, яке встановлюється під час атестації і зазначається у свідоцтві про атестацію);
- ✓ *похибка атестованого значення* (різниця між атестованим і дійсним значеннями величини, яка відтворюється тією частиною зразка, що використовується під час вимірювань);
- ✓ *характеристика однорідності* (характеристика властивості зразка, що виражається у незмінності значення величини, яка відтворюється різними частинами зразка, що використовуються під час вимірювань);
- ✓ *характеристика стабільності* (характеристика властивості зразка зберігати значення метрологічних характеристик у встановлених межах протягом вказаного у свідоцтві строку придатності при дотриманні умов зберігання і застосування);
- ✓ *функції впливу* (залежності метрологічних характеристик зразка від зміни зовнішніх впливових величин у заданих умовах застосування).

Особливістю магнітних матеріалів є те, що їх властивості описуються головним чином функціональними залежностями однієї величини від другої. Наприклад, петля гістерезису – це залежність миттєвих значень магнітної індукції від миттєвих значень напруженості магнітного поля. За допомогою СЗ відтворюють і окремі робочі точки функціональних залежностей, і самі залежності в цілому.

Як приклад розглянемо стандартний зразок статичних властивостей магнітно-м'яких матеріалів 3-го розряду марки МС-5. Він складається із трьох сердечників кільцевої форми із зовнішнім діаметром 50 мм, внутрішнім діаметром 40 мм і висотою 7 мм. Сердечники укладені в спеціальний футляр. Вони виготовлені із прецизійних магнітно-м'яких матеріалів – пермалою марок 79НМ і 50Н (згідно ГОСТ 10160-75) та електротехнічної сталі марки 20895 (згідно ГОСТ 11036-75). Магнітні властивості цих матеріалів відрізняються високою стабільністю. Цей СЗ відтворює значення відносної максимальної магнітної проникності у діапазоні від 47000 до 190000 з відносною похибкою не більше 3 %, та значення коерцитивної сили у діапазоні від 1,2 А/м до 88 А/м з відносною похибкою, що не перевищує 1 %.

Ці СЗ виконують функції робочих еталонів (зразкових мір) 2-го розряду згідно з Державною повірочною схемою для засобів вимірювань магнітної індукції постійного поля, постійного магнітного потоку, магнітної індукції та магнітного моменту (ГОСТ 8.030-91). Міжповірочний інтервал для них складає 1 рік.

Властивості таких СЗ підтверджуються свідоцтвом про повірку, яке видається органами державної метрологічної служби. У ньому вказуються:

- найменування стандартного зразка (наприклад, СЗ електротехнічної сталі) та його номер;
- строк дії свідоцтва;
- тип первинного перетворювача магнітних властивостей, для якого призначений стандартний зразок (наприклад, пермеаметр для випробувань зразків масою не більше 1 кг);
- організація-власник стандартного зразка;
- клас або розряд, який встановлюється у залежності від похибки наведених у свідоцтві результатів вимірювання магнітних величин;
- залежності магнітних величин, які відтворює зразок (наприклад, амплітуди магнітної індукції від амплітуди напруженості магнітного поля);
- допоміжні параметри СЗ, що необхідні для його використання (наприклад, маса, питома маса, довжина силової магнітної лінії та інші).

В Україні у системі Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики діє Державна служба стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів, яка здійснює міжрегіональну та міжгалузеву координацію і забезпечує створення, атестацію та застосування стандартних зразків.

Зазвичай процедура створення і атестації стандартних зразків полягає у створенні однорідного за складом матеріалу зразка, визначенні його складу (за необхідності) та дослідженні його властивостей, умов зберігання і застосування. У якості прикладу розглянемо процедуру створення стандартного зразка електротехнічної сталі. В першу чергу виготовляється

зразок з листової сталі однорідного складу. Далі зразок послідовно передається до декількох авторитетних метрологічних центрів для визначення його магнітних властивостей. Результати вимірювань порівнюються та за відсутності розходжень заносяться до паспорту стандартного зразка. До паспорту додається короткий опис особливостей зберігання і застосування зразка. Якщо у результатах вимірювань, що надають метрологічні центри, спостерігаються розходження, то призначається погоджувальна комісія, яка приймає рішення щодо надійності вимірювань і можливості затвердження стандартного зразка як засобу вимірювання.

Підприємства електротехнічної промисловості розробляють власні стандартні зразки, які застосовують для контролю якості як матеріалів, так і зразків напівфабрикатів або готової продукції. Після метрологічної атестації вони набувають статусу стандартного зразка підприємства (СЗП). Такі зразки можуть бути виготовлені у вигляді поодиноких пластин або їх пакетів різних форм (кільця, полоси), що відтворюють магнітні властивості матеріалу (електротехнічної сталі визначеної марки). Стандартні зразки у вигляді статорних платин або їх наборів необхідні для поопераційного контролю якості виготовлення цих елементів, а у вигляді осередя статорів – для магнітного контролю готової продукції, призначеної для подальшої зборки електродвигуна.

#### **4.4. Спосіб градуювання пермеаметрів і оцінки його похибки**

Для підвищення точності магнітного контролю застосовується спосіб градуювання пермеаметрів за так званими «ефективними площами  $S_{\text{еф}}$  [5, 8], суть якого полягає у наступному. На середніх частинах стандартного зразка замкнутої форми з відомими кривими індукції розміщують дві вимірювальні обмотки з однаковими числами витків. Кількість цих витків визначається чутливістю застосованого вольтметра, який підключається до обмоток. Для кожного значення намагнічувального струму (отже і для напруженості  $H$ ) визначають середнє значення показів вольтметра, за якими потім знаходять середнє значення індукції  $B_{\text{ср}}$  у двох половинах зразка. Одночасно визначають значення  $U$  показів вольтметра, який з'єднаний з вимірювальними обмотками пермеаметра. Враховуючі отримані значення  $B_{\text{ср}}$  і покази  $U$  вольтметра визначають значення «ефективних площ»  $S_{\text{еф}}$  зразка, як

$$S_{\text{еф}} = U / (4 f N_{\text{в}} B_{\text{ср}}), \quad (4.12)$$

де  $f$  – частота намагнічувального струму;  $N_{\text{в}}$  – загальне число витків вимірювальних обмоток.

Якщо знати динамічну криву індукції стандартного зразка і значення  $B_{\text{ср}}$ , можна отримати градуювальну характеристики

$$S_{\text{эф}} = f(H). \quad (4.13)$$

Під час визначення значень магнітної індукції у випробовуваному зразку необхідно при фіксованих величинах  $H$  знайти по градувальній характеристиці значення  $S_{\text{эф}}$ , виміряти напругу  $U$  та розрахувати індукцію зразка за формулою

$$B = U / (4 f N_{\text{е}} S_{\text{эф}}), \quad (4.14)$$

а напруженість поля – за формулою (2.14).

Подібне градування проводять і при визначенні статичних магнітних характеристик зразків. При цьому застосовують веберметр, а дійсну криву індукції визначають за допомогою імпульсного методу.

На рис. 4.2, а представлений графік кривої індукції випробовуваного зразка із сталі 2012, отриманий на пермеаметрі після його градування. Як видно, градування дозволило суттєво зменшити похибку вимірювань (до 2,0 %). Наявність похибок можна пояснити впливом незначних зазорів у контактних зонах магнітопроводу із зразком, а також зміщенням його осей симетрії відносно осі магнітопроводу при centruванні зразка. Слід відмітити, що при магнітному контролі однотипних виробів серійного виробництва коефіцієнти  $k_1$  і  $k_3$  у формулах (2.13) і (2.15) для фіксованих значень  $H$  заздалегідь визначають способом «ефективних площ» для кожного типу пермеаметра.

Для оцінки похибки градування доцільно застосовувати методику, що заснована на введенні спеціальної оцінки різниці між дійсною (що визначається при нанесенні обмоток на зразок) і експериментальної (що визначається на пермеаметрі після градування) кривих індукції випробовуваного зразка. У якості такої оцінки можна прийняти нормовану відстань  $\delta_{\text{КГ}}$  від деякої точки  $K(B_{\text{К}}; H_{\text{К}})$  на експериментальній кривій індукції, дотичної до дійсної кривої, яка проведена поблизу цієї точки (рис. 4.2, б). Якщо вважати, що функція  $B = f(H)$  є лінійною поблизу точки  $K$ , то відстань  $\delta_{\text{КГ}}$  розрахуємо за формулою

$$\delta_{\text{КГ}} = \frac{(\Delta B / B_{\text{К}})(\Delta H_{\text{К}} / H_{\text{К}})}{\sqrt{(\Delta H_{\text{К}} / H_{\text{К}})^2 + (\Delta B_{\text{К}} / B_{\text{К}})^2}}. \quad (4.15)$$

При цьому величина  $H_{\text{К}}$  задається, а значення  $B_{\text{К}}$ ,  $\Delta B_{\text{К}}$  і  $\Delta H_{\text{К}}$  визначають із графіка (рис. 4.2, б).

Наприклад, для випадку динамічних випробувань зразка із сталі 2012 величина похибки градування  $\delta_{\text{КГ}}$  при  $H_{\text{К}} = 2500$  А/м дорівнює 1,46 %.

У разі використання стандартних вимірювальних приладів апаратурну похибку магнітних вимірювань можна розрахувати як

$$\delta_{KA} = \frac{\delta_B \cdot \delta_H}{\sqrt{\delta_B^2 + \delta_H^2}}, \quad (4.16)$$

де  $\delta_B$  і  $\delta_H$  – відносні похибки вимірювань індукції і напруженості магнітного поля відповідно, методика визначення яких наведена нижче у розділі 4.6.

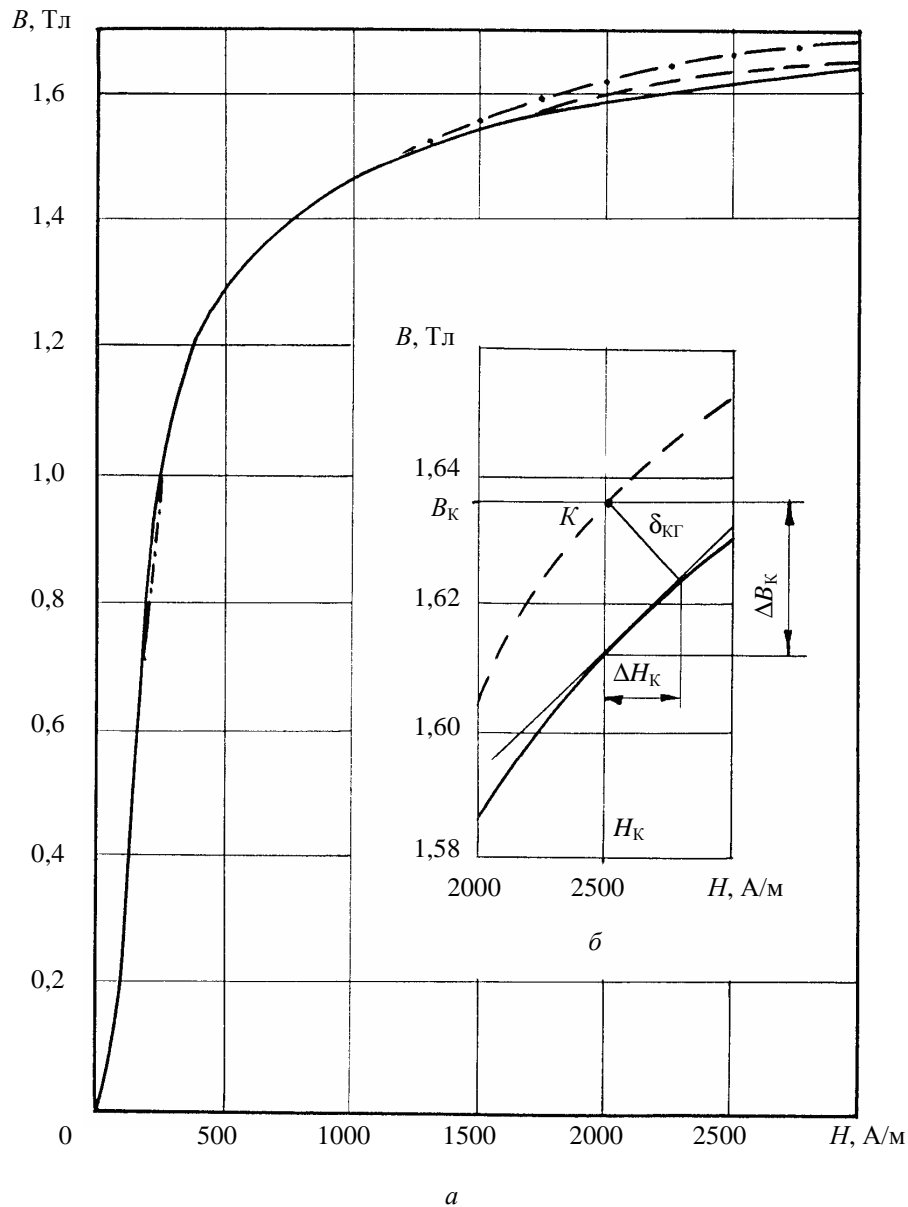


Рисунок 4.2 – Результати градуювання і оцінювання його похибок:

$a$  – динамічні криві індукції зразка із сталі 2012, які визначені

- нанесенням обмоток на зразок;
- · - на пермеаметрі без градуювання;
- - на пермеаметрі після градуювання

$b$  – до визначення похибки градуювання

І, нарешті, сумарну похибку вимірювань магнітних характеристик виробів за допомогою пермеаметрів визначимо за формулою

$$\delta_{\text{рез}} = \sqrt{\delta_{\text{КТ}}^2 + \delta_{\text{КА}}^2}. \quad (4.17)$$

#### 4.5. Методика аналізу методичних похибок контролю

Актуальною задачею метрологічного забезпечення пермеаметрів є визначення і зменшення методичних похибок вимірювань основних кривих намагнічування (або індукції) феромагнітних зразків замкнутої форми. Ці похибки обумовлені двома основними факторами: наявністю відмінності форми кільцевого зразка від ідеальної тороїдної форми (тобто різною радіальною шириною) та зміщенням такого контрольованого зразка відносно осі магнітопроводу, яке пов'язане з установкою зразка на магнітопровід та його центруванням.

При застосуванні розроблених пермеаметрів (див. 3.2) для контролю кривої індукції виникає додаткова методична похибка вимірювань від неточного центрування виробу тороїдної форми при його установці на магнітопровід або на його полюси. Тому виникає практичний інтерес проаналізувати спільний вплив на результати контролю неоднорідності розподілу напруженості магнітного поля такого зразка вздовж його радіальної ширини  $2b$  і зміщення  $\Delta l$  осі зразка відносно осі магнітопроводу пермеаметра. Цей аналіз тим більше важливий, тому що обидва ці фактори при трансформації через результати контролю основної кривої індукції можуть приводити до суттєвих методичних похибок, які можуть за величинами дорівнювати сумарній апаратній похибці вимірювання магнітних характеристик.

На рис. 4.3 схематично відображені дві проекції пермеаметра із зразком тороїдної (кільцевої) форми. Всі позначення розмірів зразків і зміщення  $\Delta l$  його відносно осі магнітопроводу наведені там же ( $\Delta l/2$  – додатки до середньої довжини зразка при невеликих зміщеннях  $\Delta l$ ).

Відомо, що напруженість  $H$  магнітного поля уздовж радіальної ширини замкнутого зразка має характеристику, яка спадає від внутрішнього радіусу до зовнішнього радіусу [23]. Якщо врахувати, що відношення радіальної ширини  $2b$  до середнього радіусу  $\rho_0$  зразка мале, то можна представити функцію  $H = f(x)$  у вигляді ступеневого ряду напруженості, наприклад у точці, яка має відстань  $x$  від  $\rho_0$ , та отримати формулу для визначення  $H$ :

$$H = \frac{I_{Hm} N_n}{\pi \rho_0} \left( 1 - \frac{x + \Delta l}{\pi \rho_0} + \frac{(x + \Delta l)^2}{\pi^2 \rho_0^2} - \frac{(x + \Delta l)^3}{\pi^3 \rho_0^3} + \dots \right), \quad (4.18)$$

де  $I_{Hm}$  – амплітудне значення намагнічувального струму;  $N_n$  – число витків намагнічувальної обмотки.

При цьому передбачається, що величина  $\pi\rho_0$  складає половину середньої довжини замкнутого зразка.

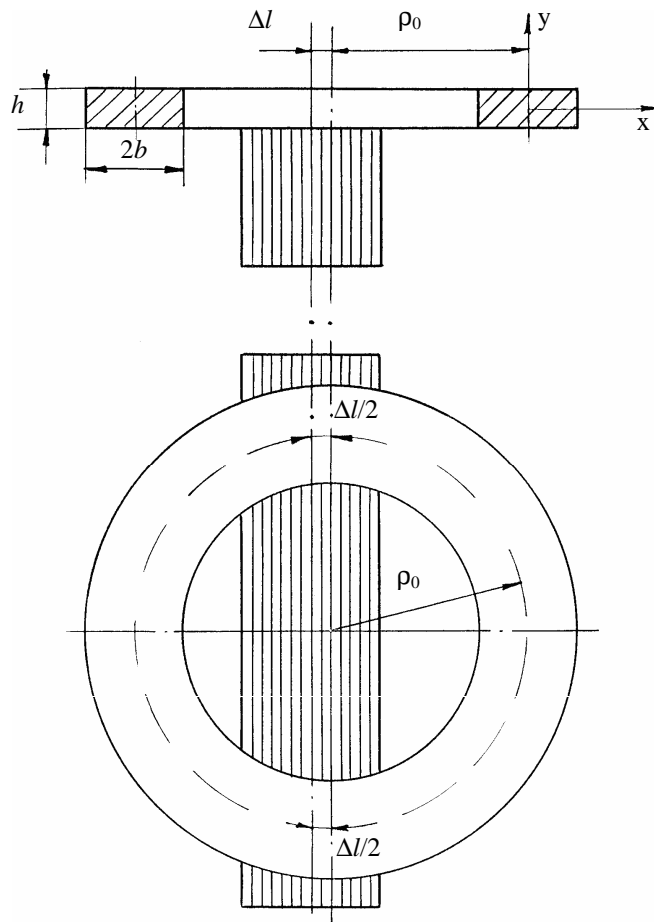


Рисунок 4.3 – Розміщення тороїдного зразка зі зміщенням на магнітопроводі пермеаметра

Спочатку потрібно визначити методичну похибку при вимірюванні магнітних параметрів замкнутого виробу на початковій ділянці кривої індукції, на якій магнітна проникність  $\mu$  є постійною (де  $\mu = \mu_0\mu_r$ ). Нехай індукція  $B$  змінного поля визначається по вимірюваним значенням магнітних потоків  $\Phi$ , а індукція постійного у часі поля – по вимірюваним значенням різниць потокозчеплень  $\Delta\psi$  при комутації струму. Тоді формулу для визначення величини індукції (як статичної, так і динамічної) у правій (рис. 4.3) половині зміщеного відносно осі магнітопроводу зразка можна записати, як

$$B = \frac{\mu I_{Hm} N_H}{\pi\rho_0} \left( 1 - \frac{x + \Delta l}{\pi\rho_0} + \frac{(x + \Delta l)^2}{\pi^2\rho_0^2} - \frac{(x + \Delta l)^3}{\pi^3\rho_0^3} + \dots \right), \quad (4.19)$$



Під час випробувань деталей у постійних полях потік індукції, який зчіплюється з витками обмоток, можна визначити з урахуванням (2.15) шляхом інтегрування індукції  $B$  по ширині  $2b$ . В цьому випадку різницю потокозчеплень  $\Delta\psi$  можна розрахувати за формулою

$$\Delta\psi = 8N_{\text{в}}SB_{\text{д}}\left(1 + \frac{b^2}{3\rho_0^2} + \frac{\Delta lb}{\pi\rho_0^2} + \dots\right), \quad (4.20)$$

де  $N_{\text{в}}$  – число витків вимірювальної обмотки;  $S$  – площа перерізу зразка,  $S = 2bh$ ;  $h$  – його висота (товщина),  $B_{\text{д}}$  – дійсна (умовно істинна) величина індукції матеріалу зразка.

З отриманої формули видно, що у разі, коли індукція визначається за експериментально знайденим значенням різниці потокозчеплень  $\Delta\psi$ , відомих величин площі  $S$  і напруженості  $H$  на середньому радіусі  $\rho_0$  зразка, то результати вимірювань дають завищені значення на величину  $\left(\frac{b^2}{3\rho_0^2} + \frac{\Delta lb}{\pi\rho_0^2}\right)$  значення індукції. Для того, щоб знайти дійсне значення  $B_{\text{д}}$ , необхідно (з урахуванням (2.15)) використати наступне співвідношення

$$B_{\text{д}} = B\left(1 - \frac{b^2}{3\rho_0^2} - \frac{\Delta lb}{\pi\rho_0^2}\right), \quad (4.21)$$

де  $B$  – вимірюване значення індукції.

При цьому напруженість  $H$  слід обчислювати за середнім радіусом зразка, використовуючи вираз (2.14).

Формула для розрахунку дійсного значення індукції  $B_{\text{д}}$  (випадок початкової ділянки кривої індукції) при динамічних магнітних випробуваннях має аналогічний формулі (4.21) вигляд. При цьому значення індукції  $B$  обчислюють за формулою (2.13).

У загальному випадку вимірювання параметрів всієї кривої намагнічування, коли магнітна проникність  $\mu$  залежить від напруженості  $H$ , розрахункове співвідношення для величини  $\Delta\psi$  знаходять шляхом представлення у вигляді ряду залежності  $\mu = B/H$  по приростам  $\Delta H = H - H_0$  ( $H_0$  – напруженість поля на середньому радіусі  $\rho_0$  зразка). При цьому з урахуванням (4.18) та (4.19) після інтегрування по площі перерізу зразка для випадку статичних магнітних вимірювань знайдемо формулу для розрахунків різниці потокозчеплень:

$$\Delta\psi = 8N_{\text{в}}SB_{\text{д}}\left[1 + \frac{b^2}{3\rho_0^2} \cdot \left(2 \frac{\mu_{\text{д}}}{\mu(H_0)} - 1\right) + \frac{b\Delta l}{\pi\rho_0^2} \left(2 \cdot \frac{\mu_{\text{д}}}{\mu(H_0)} - 1\right) + \dots\right], \quad (4.22)$$

де  $\mu_d$  – абсолютне значення диференціальної магнітної проникності,  $\mu_d = \mu_0 \mu_{rd}$ ,

$$\mu_{rd} = \frac{dB}{\mu_0 dH} \approx \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}, \quad (4.23)$$

де  $\Delta B$  и  $\Delta H$  – прирости індукції и напруженості поля поблизу робочих точок на кривій індукції.

Отже, дійсне значення індукції  $B_d$  магнітного поля у зразку можна визначити по експериментально визначеній величині індукції  $B$  за формулою

$$B_d = B \left[ 1 - \left( \frac{b^2}{3\rho_0^2} - \frac{b\Delta l}{\pi\rho_0^2} \right) \left( 2 \frac{\mu_d}{\mu(H_0)} - 1 \right) \right]. \quad (4.24)$$

Отримана формула є універсальною для розрахунків дійсних значень як статичної, так і динамічної індукції зразків замкненої форми, яка вимірюється за допомогою пермеаметра. У першому випадку (статичні вимірювання) індукцію  $B$  визначають по формулі (2.15), у другому (динамічні вимірювання) – з використанням (2.13).

Аналіз співвідношення (4.24) показує, що воно переходить у раніше отриману формулу (4.21) у разі визначення дійсного значення  $B_d$  на початковій ділянці кривої намагнічування, оскільки на ній  $\mu_d = \mu(H_0)$ . У разі виконання точного центрування зразка відносно осей симетрії магнітопроводу пермеаметра (коли  $\Delta l = 0$ ) формула (4.24) спрощується і переходить у співвідношення для визначення індукції з урахуванням тільки тороїдності замкнутого зразка.

Універсальна формула (4.24) дозволяє побудувати за результатами вимірювань основну криву індукції. При цьому є можливість і корекції її з використанням значень  $b/\rho_0$  та  $b\Delta l/(\rho_0^2)$  для конкретного зразка, величин диференціальної  $\mu_d$  і статичної  $\mu(H_0)$  магнітних проникностей матеріалу, які розраховуються для кожної робочої точки експериментально визначеної кривої  $B = f(H)$ . Заміна у поправочних членах формули (4.24) величин  $\mu(H_0)$  і  $\mu_d$  допустима, оскільки вказані члени є досить малими величинами і можуть бути обчислені з похибками, які на порядок менші, ніж похибки визначення основних величин у цій формулі.

Крім цього, формула (4.24) дозволяє обґрунтувати вибір значень  $b/\rho_0$  і  $b\Delta l/(\rho_0^2)$  для кожного конкретного випробовуваного зразка. Якщо позначити поправочний коефіцієнт  $\left( 2 \frac{\mu_d}{\mu(H_0)} - 1 \right) = A$  та врахувати, що величина  $A$  при деяких значеннях напруженості  $H$  поля може приймати своє

максимальне значення  $A_{\max}$ , то отримаємо математичну умову, яка показує, якою повинна бути величина  $A_{\max}$ , щоб вона не перевищила допустимого відносного значення (межі)  $\delta_{\text{М.ДОП}}$  методичної похибки вимірювань:

$$A_{\max} = \left( \frac{b^2}{3\rho_0^2} + \frac{b\Delta l}{\pi\rho_0^2} \right) \cdot 100\% < \delta_{\text{М.ДОП}} \cdot \quad (4.25)$$

Остання нерівність дозволяє задавати допуски на розміри радіальної ширини в на величину зміщення осей зразка і магнітопроводу пермеаметра.

Наприклад, проведемо розрахунок максимальних значень  $\delta_{\text{М.ДОП}}$  у випадку вимірювань магнітних параметрів кільцевого зразка із сталі 2012 з радіальною шириною  $2b = 11$  (мм) і середнім радіусом  $\rho_0 = 60$  (мм). Вимірювання здійснювались у типовому пермеаметрі (рис. 2.1) при різних величинах зміщення  $\Delta l$  між осями зразка та пермеаметра.

Для визначення максимального значення критерію  $A_{\max}$  побудовані графічні залежності статичної  $\mu(H_0) = f(H_0)$  і диференціальної  $\mu_{\text{Д}} = f(H_0)$  магнітних проникностей від напруженості поля (рис. 4.4, а), які отримані за результатами експериментального (за допомогою пермеаметра) визначення динамічної кривої індукції (рис. 4.2, а), а також залежність  $A = f(H_0)$  (рис. 4.4, б). Як видно із останнього графіку,  $A_{\max} = 4,258$ .

Результати визначення граничних значень  $\delta_{\text{М.ДОП}}$  залежно від різних величин зміщень  $\Delta l$  зведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення методичної похибки  $\delta_{\text{М.ДОП}}$  при різних величинах  $\Delta l$

$\Delta l$ , мм	0	0,5	1,0	1,5	2,0
$\delta_{\text{М.ДОП}}$ , %	1,19	1,3	1,4	1,5	1,61

Таким чином, отримані співвідношення дозволяють здійснити корекцію основної кривої індукції, отриманої експериментально, з урахуванням поправочних членів формули (4.24) не тільки за величинами параметрів тороїдальності замкненого зразка, але і зміщень зразка відносно осі магнітопроводу пермеаметра. Останні при отриманому критерію (4.25) дозволяють встановити допуски при виготовленні пермеаметрів і зразків не тільки у разі відсутності пристрою центрування у пермеаметрі, але і при наявності його.

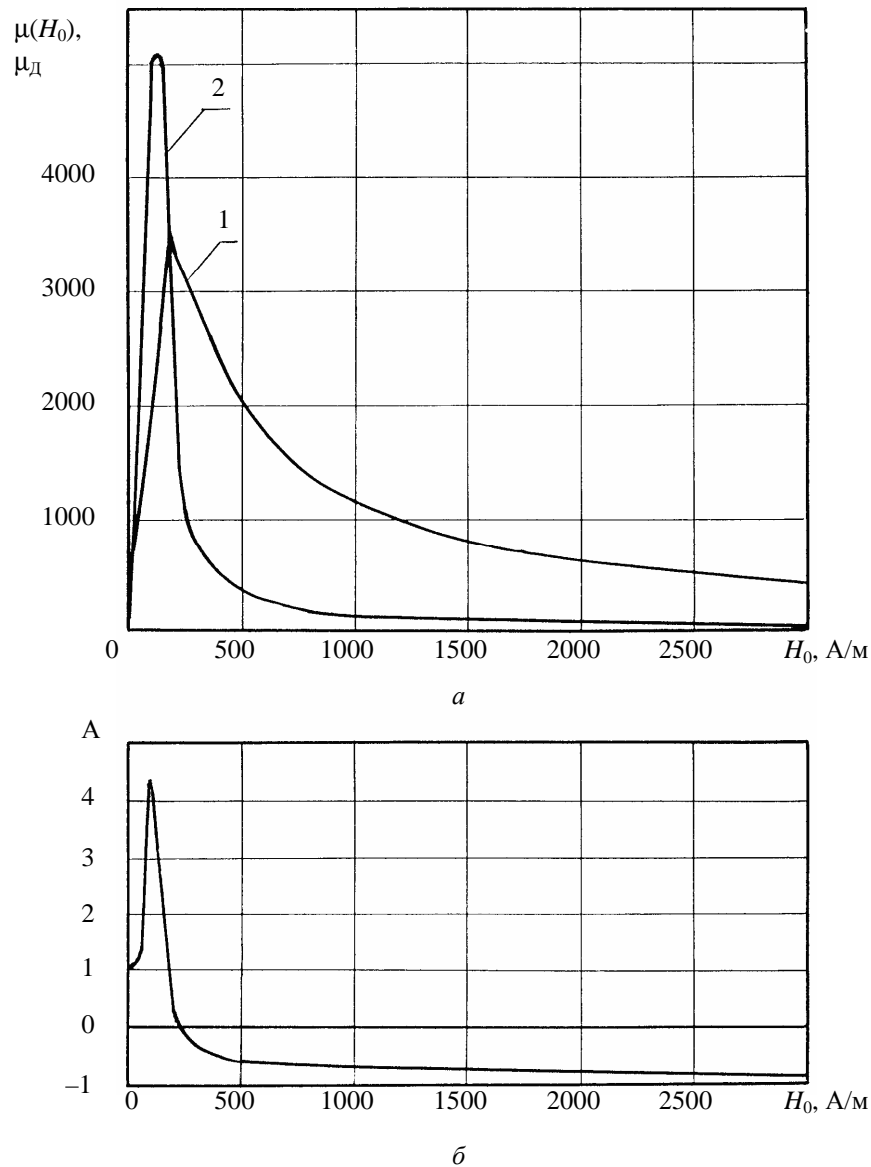


Рисунок 4.4 – Графічні залежності для визначення методичної похибки:  
*a* – залежності  $\mu = f(H_0)$  (1) і  $\mu_d = f(H_0)$  для зразків із сталі 2012;  
*б* – залежність  $A = f(H_0)$ .

#### 4.6. Методика аналізу інструментальних похибок контролю

Визначення інструментальних (апаратурних) похибок при статичних і динамічних випробуваннях за допомогою пермеаметрів проводиться з урахуванням наступних допущень: вплив характерних магнітних потоків розсіяння на результати вимірювань практично виключений за рахунок конструктивних особливостей пермеаметрів, а повітряні зазори у магнітному колі пермеаметра з виробом дуже малі завдяки високому класу чистоти обробки робочих поверхонь магнітопроводів.

Похибки вимірювань напруженості магнітного поля (як статичної, так і динамічної) з урахуванням (2.14) визначаються відносними похибками вимірювань сили намагнічувального струму  $\delta_{I_H}$ , середньої довжини

зразка  $\delta_l$ , числа витків намагнічувальної обмотки  $\delta_{N_H}$  і градууювального коефіцієнту  $k_2$  пермеаметра. Ці складові не залежать один від одного і мають випадковий характер, тому формулу для розрахунку відносної похибки визначення напруженості поля у зразку при надійній імовірності 0,95 згідно ГОСТ 8.207-76 [24] запишемо у вигляді

$$\delta_H = 1,1\sqrt{\delta_{I_H}^2 + \delta_{N_H}^2 + \delta_l^2 + \delta_k^2}. \quad (4.26)$$

Якщо врахувати характерні числові значення вказаних складових  $\delta_{I_H} = 0,5\%$ ,  $\delta_l = \delta_{N_H} = 0,2\%$ ,  $\delta_k = 1,5\%$ , то величина сумарної похибки  $\delta_H$  не перевищує 1,77 %.

Оцінювання відносної похибки  $\delta_B$  визначення динамічної індукції виконаємо, використовуючи наступне співвідношення, отримане з урахуванням (2.13):

$$\delta_B = 1,1\sqrt{\delta_k^2 + \delta_{U_{cp}}^2 + \delta_{N_B}^2 + \delta_f^2 + \delta_S^2}, \quad (4.27)$$

де  $\delta_k$ ,  $\delta_{U_{cp}}$ ,  $\delta_f$ ,  $\delta_{N_B}$  і  $\delta_S$  – відносні похибки визначення величин, які позначені відповідними індексами.

Якщо врахувати максимальні числові значення цих складових  $\delta_{U_{cp}} = 0,5\%$ ;  $\delta_f = 0,1\%$ ;  $\delta_{N_B} = 0,2\%$ ;  $\delta_S = 0,2\%$ ;  $\delta_k = 1,5\%$ , то отримаємо максимальне значення похибки  $\delta_B$ , яке також буде дорівнювати 1,77 %.

Формулу для розрахунку відносної похибки вимірювання статичної магнітної індукції (з урахуванням (2.15)) можна представити у вигляді

$$\delta_B = 1,1\sqrt{\delta_{\Delta\Psi}^2 + \delta_{N_B}^2 + \delta_S^2 + \delta_k^2}, \quad (4.28)$$

де  $\delta_{\Delta\Psi}$  – відносна похибка визначення різниці потокозчеплень  $\Delta\Psi$ .

У цьому разі результуюча похибка  $\delta_B$  при характерному значенні  $\delta_{\Delta\Psi} = 0,1\%$  не перевищує 1,69 %.

Аналогічним чином при використанні формул (2.20) і (2.21) можна отримати співвідношення для розрахунку відносної похибки вимірювань питомих втрат потужності:

$$\delta_{P_{\text{ПИТ}}} = 1,1\sqrt{(m\delta_{N_H})^2 + (n\delta_{N_B})^2 + (2c\delta_{U_{E\Phi}})^2 + (c\delta_{R_{\Sigma}})^2 + \delta_m^2 + \delta_k^2}, \quad (4.29)$$

де  $m$ ,  $n$  і  $c$  – коефіцієнти впливу,

$$m = P / \left( P - \frac{N_B}{N_H} P_{\text{пр}} \right) \quad (4.30)$$

$$n = -P / \left( P - \frac{N_B}{N_H} P_{\text{пр}} \right) \quad (4.31)$$

$$c = -P_{\text{пр}} / \left( P \frac{N_B}{N_H} - P_{\text{пр}} \right) \quad (4.32)$$

де  $P_{\text{пр}}$  – втрати потужності у приладах, які підключені до вимірювальної схеми.

Проведемо оцінку результуючої похибки  $\delta_{P_{\text{ПИТ}}}$  у випадку, коли  $W_H = W_B$ . Враховуючи характерне для практики співвідношення  $P_{\text{пр}} = 0,02P$ , а також максимальні значення складових сумарної похибки  $\delta_{N_H} = \delta_{N_B} = 0,2\%$ ;  $\delta_{U_{\text{ЕФ}}} = 0,5\%$ ;  $\delta_{R_{\Sigma}} = 0,2\%$ ;  $\delta_G = 1,0\%$ ;  $\delta_k = 1,5\%$ , отримаємо, що  $\delta_{P_{\text{ПИТ}}} \approx 2,0\%$ .

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому полягає метрологічне забезпечення пермеаметрів?
2. Поясніть стандартну методику вимірювання магнітної індукції в пермеаметрі відповідно до вимірювальної схеми (рис. 4.1).
3. Які вимоги пред'являються до засобів вимірювальної техніки при магнітних випробуваннях?
4. Які метрологічні характеристики стандартних зразків визначаються під час їх метрологічної атестації?
5. Які особливості метрологічної атестації стандартних зразків?
6. Поясніть методику градуювання пермеаметрів.
7. Як проводиться аналіз методичних похибок, які виникають під час проведення магнітного контролю за допомогою пермеаметрів?
8. Наведіть формули для розрахунків інструментальних похибок вимірювання напруженості та індукції магнітного поля у статичному та динамічному режимах, а також втрат потужності у сталі.

## 5. ПРОМИСЛОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРМЕАМЕТРІВ

Створення автоматизованих пристроїв з пермеаметрами передбачає попередню теоретичну та експериментальну проробку ряду питань. По-перше, це встановлення кола широких та вузьких спеціальних завдань, які ставляться перед такими пристроями. По-друге, це розробка та оптимізація алгоритмів їх роботи в залежності від поставлених завдань. Важливим завданням є створення функціональних схем автоматизованих пристроїв (в тому числі з використанням обчислювальних пристроїв для обробки вимірювальної інформації), вибір або розробка апаратних та програмних засобів.

Істотно, що ступінь складності завдань визначає і рівень вимог, які ставляться до основних технічних параметрів цих пристроїв, таких як чутливість, продуктивність контролю, надійність. Важливу роль при цьому відіграють і потужність споживання, ремонтпридатність, габаритні характеристики, технологічність виготовлення.

### 5.1. Установа для магнітних випробувань виробів

Основними факторами, що стримують автоматизацію контролю якості елементів електроенергетичного обладнання, є трудомістка операція нанесення обмоток на зразки і виконання обчислювальних процедур по обробці сигналів вимірювальної інформації. Обидві ці задачі вирішені при створенні установок для комплексних динамічних магнітних випробувань на промисловій частоті феромагнітних виробів різних форм із застосуванням пермеаметрів [6, 25-26]. Останні з метою підвищення точності і чутливості з'єднані за диференціальною схемою.

Функціональна схема такої установки (рис. 5.1) містить автотрансформатор *1*, вимірювач напруженості поля *2*, два ідентичних пермеаметри *3* і *4*, фільтри (*5* і *6*) перших гармонік сигналів вторинних обмоток пермеаметрів *3* і *4*, випрямлячі *7* та *8* цих сигналів, двоканальний підсилювач постійного струму *9*. Вихідна напруга  $\Delta U$  останнього пропорційна різниці  $\Delta B$  між індукцією випробовуваного (ВЗ) і стандартного (СЗ) зразків. Вона подається у блок *10* обробки сигналу і далі на пристрій відліку показань *11*.

До складу схеми також входять блок введення констант (параметрів пермеаметрів, значень довжин та площ перерізів зразків) *12* а також блок живлення *13*.

Конструктивно установка виконана у вигляді трьох основних компонент. Першою є пара ідентичних пермеаметрів *3* і *4*, на яких розміщені СЗ та ВЗ. Друга компонента – це прилад контролю напруженості і індукції магнітного поля у випробовуваному виробі. У якості третьої складової застосовується стандартний ватметр *14*, який за необхідності підключається до вихідних клем установки.

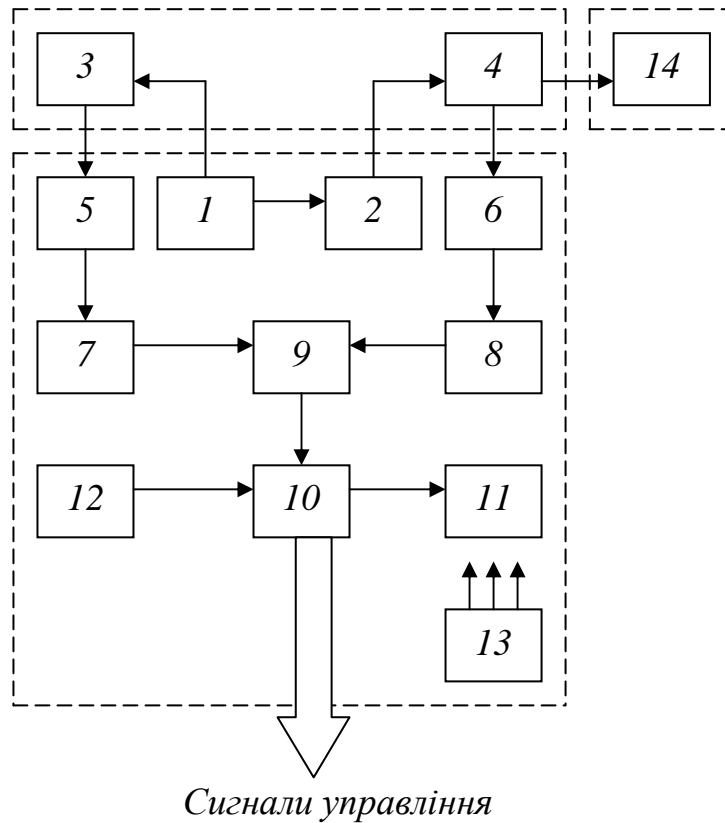


Рисунок 5.1 – Функціональна схема установки

Збалансований двоканальний підсилювач 9 зібраний на операційних підсилювачах за схемою вимірювача малих приростів з регульованим коефіцієнтом підсилення. Він дозволяє формувати напругу, яка пропорційна різниці вхідних сигналів з урахуванням знаку. Таким чином можна відслідковувати відносне зменшення або збільшення магнітних параметрів ВЗ у порівнянні з СЗ. У блоці 10 здійснюється обчислення значення  $B_2$  індукції ВЗ за формулою (2.26) та формується сигнал управління роботою маніпуляторів, які здійснюють розбракування випробовуваних виробів за величиною приросту  $\Delta B$ , а також сигнали світової та звукової сигналізації про брак. Отже, установка дозволяє визначати не тільки абсолютні величини індукції при заданій напруженості поля, а також її прирости  $\Delta B$  з індикацією знаку та з великою роздільною здатністю.

Зовнішній вигляд установки наведений на рис. 5.2.

Основні технічні характеристики установки:

- діапазон вимірювання напруженості поля – (500 – 7000) А/м;
- діапазон вимірювання приростів індукції – (0,01 – 0,5) Тл;
- похибка вимірювання магнітних характеристик - 1,2 %;
- вживана потужність, не більше – 50 ВА;
- маса установки, не більше – 25 кг.



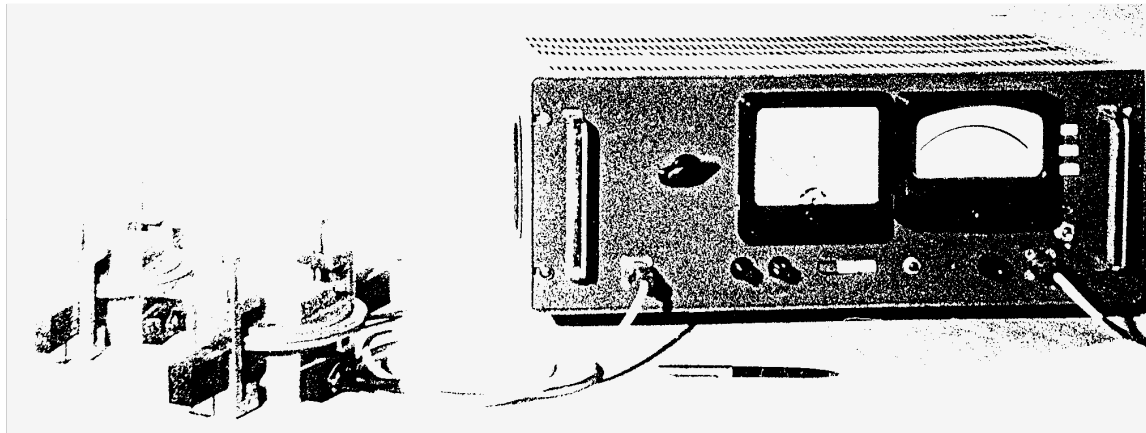


Рисунок 5.2 – Магнітовимірювальна установка з пермеаметрами

## **5.2. Застосування пермеаметрів в системах контролю і управління технологічними процесами виготовлення елементів електродвигунів**

Виробництво статорів і роторів електродвигунів пов'язане з виконанням ряду технологічних операцій: штамповкою статорних пластин з тонколистової електротехнічної сталі, відпалом їх при температурах (600–700) °С протягом 40–50 хвилин з метою зменшення внутрішніх механічних напруг і стабілізації магнітних властивостей матеріалу, зборкою та зварюванням осердя, чистовою обробкою.

Істотно, кожна операція змінює магнітні характеристики електротехнічної сталі, оскільки при цьому деформується її внутрішня кристалічна структура. Наприклад, дослідження показали, що штамповка пластин приводить до зміни значень магнітних характеристик на (20–40)% [27]. Якщо не здійснювати поопераційний контроль магнітних характеристик пластин (їх пакетів), то кінцева продукція (електродвигуни) буде мати вихідні параметри (к.к.д., пускові та обертові моменти) нижче встановлених номінальних значень.

Крім цього, результати досліджень свідчать про те, що відпал протягом 40 хвилин при температурі 650 °С не призводить до повного знищення анізотропних властивостей, які обумовлені початковими властивостями матеріалу заготовки та штамповкою. Різниця магнітних характеристик уздовж та поперек прокату сталюї стрічки при цьому зберігається на рівні (30–40) %. Особлива увага при виготовленні статорних пластин звертається на технологію виготовлення елементів пластини (зубців, спинок). Тому з метою контролю якості виготовлення електродвигунів і управління технологічним процесом застосовують систему управління і поопераційного контролю різних технологічних операцій. У якості вимірювальних перетворювачів цієї системи використовуються різні види пермеаметрів.

На рис. 5.3 у загальному вигляді відображена схема технологічного циклу виготовлення осердь статорів з елементами системи управління і контролю цього циклу.

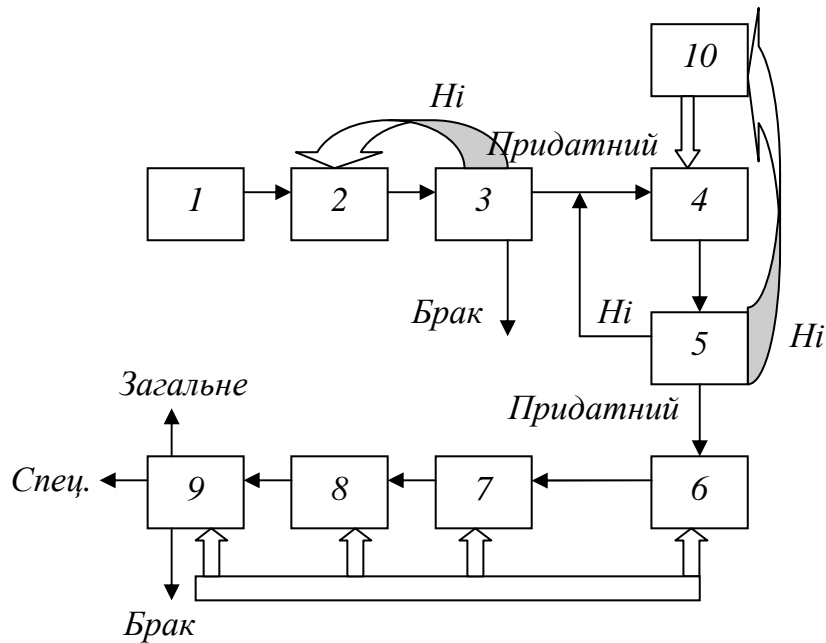


Рисунок 5.3 – Схема технологічного циклу виготовлення осердь статорів

Заготовка 1 (рулон електротехнічної сталі) проходить комплекс операцій: штамповку 2 статорних пластин, контроль магнітних характеристик і розбракування 3 деталей, відпал 4 у печі, контроль 5 характеристик після відпалу, зборку 6 осердя статора із пластин, зварювання 7 осердя, точіння 8 під задані зовнішні розміри та вихідний контроль (розбракування) 9 осердь у зборі. Контроль магнітних характеристик пластин і осердь проводиться із застосуванням магнітовимірювальних установок з пермеаметрами.

Після проведення контролю 3 магнітних характеристик пластин за умови їх відповідності потрібним значенням (діапазомам значень) деталі подаються у піч на відпал 4, а в іншому випадку вони бракуються. При багаторазовому повторенні браку видається команда управління (тут і далі – фігурні стрілки на схемі) на зміну штампу. За результатами контролю 5 (після відпалу) стандартна продукція видається на зборку 6, а невідповідна вимогам продукція повертається на вторинний відпал 4 до печі. При цьому з пристрою контролю 5 поступає команда управління режимом роботи нагрівача 10 печі 4 та здійснюється вимірювання температури і тривалість термічної обробки. Після вихідного контролю 9 готової продукції залежно від його результатів здійснюється сортування статорів для виготовлення двигунів спеціального або загального призначення. У разі виявлення бракованої продукції видається команда управління і сигналізації на технологічні ділянки зборки 6, зварювання 7, точіння 8 для зміни електродів, різців, режимів обробки тощо.

### 5.3. Промисловий магнітний контроль зразків з електротехнічної сталі

На електротехнічних заводах здійснюється вхідний контроль якості електротехнічної сталі, яка використовується для виробництва магнітопроводів електродвигунів. Основними характеристиками матеріалу, що підлягають контролю, є магнітна індукція при заданих значеннях напруженості магнітного поля і втрати потужності на гістерезис та вихрові струми у функції індукції.

Прикладом автоматизації вхідного контролю якості електротехнічної сталі є застосування у заводських лабораторіях ВО «Укрелектромаш» пермеаметрів і вимірювальних установок, до складу яких вони входять.

Наприклад, у таблиці 5.1 наведені результати вимірювань індукції  $B_2$  кільцевих пластин, виготовлених із сталі 2012 і 2214, при рекомендованому ГОСТ 12119.4-98 [19] значенні напруженості поля  $H = 2500$  А/м. В цій же таблиці також вказані величини вимірюваних різницевого сигналів  $\Delta U$  (з урахуванням знаку), значення площ перерізу  $S_2$  зразків, величини індукції цих пластин, які визначені контрольним ферометричним методом ( $B_2^*$ ) при попередньому нанесенні обмоток безпосередньо на зразки. Також в цій таблиці приведені значення похибок  $\delta_B$  вимірювання індукції, які розраховувались за відносними відхиленнями результатів вимірювань як за допомогою пермеаметрів, так і контрольним методом. Під час проведення диференціальних вимірювань використовувався стандартний зразок (С3) з параметрами  $B_1 = 1,659$  Тл,  $S_1 = 6,015 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Таблиця 5.1 – Результати диференціальних вимірювань індукції кілець

Матеріал	Зразок	$\Delta U$ , В	$S_2 \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup>	$B_2$ , Тл	$B_2^*$ , Тл	$\delta$ , %
Сталь 2012	1	1,25	5,665	1,5	1,52	1,32
	2	1,26	5,665	1,49	1,51	1,32
	3	1,27	5,665	1,49	1,51	1,32
Сталь 2214	1	0,97	5,403	1,63	1,6	1,88
	2	0,96	5,403	1,63	1,6	1,88
	3	0,98	5,403	1,62	1,6	1,25

Потрібно відмітити, що вказані похибки вимірювань  $\delta$  мають відношення до визначення абсолютних значень індукції при використанні формули (2.23).

Якщо виникає задача порівняння характеристик випробовуваного і стандартного виробів при фіксованих значеннях напруженості, то роздільну здатність диференціальних вимірювальних пристроїв можна суттєво підвищити. Дійсно, приріст індукції  $\Delta B$  у 0,1 Тл відповідає величині напруги вимірюваного сигналу  $\Delta U$  у 1,0 В. Якщо приріст  $\Delta B$  дорівнює 0,01 Тл, то рівень відповідного сигналу  $\Delta U$  складає 0,1 В, що на порядок

перевищує рівень сигналу небалансу двох пермеаметрів, на яких розміщені ідентичні за магнітними властивостями зразки. Отже, на фоні абсолютного значення індукції стандартного зразка у 1,659 Тл вдається розрізнити приріст індукції  $\Delta B$  у 0,01 Тл, що складає 0,6 %.

Під час визначення втрат потужності пермеаметри можуть працювати у двох режимах. В режимі контролю втрат потужності магнітні випробування здійснюють з використанням секцій вимірювальних обмоток, які розташовані тільки на магнітопроводі пермеаметру. Однак, в цьому випадку необхідно проводити градування перетворювачів методом «ефективних площ»  $S_{\text{эф}}$ , що дозволяє отримати похибки вимірювань питомих втрат потужності, які не перевищують 6 %.

Для здійснення порівняно більш точних вимірювань з метою корекції заданого значення магнітної індукції доцільно використовувати роз'ємну вимірювальну котушку з невеликим числом витків (як правило 10–15). Крім того, пермеаметр необхідно градувати на зразках з відомими значеннями втрат потужності, оскільки на результати вимірювань суттєвий вплив можуть мати потоки розсіювання.

Для градування пермеаметру (рис. 2.1) використовувались два пакети кільцевих пластин, що мають максимальний відносний діапазон різниці параметрів в межах (60–70) %. При цьому знаходили середній коефіцієнт  $k_5$  перерахунку питомих втрат відповідно для двох значень індукції в 1,0 Тл та 0,5 Тл. Знаючи ці коефіцієнти, можна розрахувати питомі втрати за формулою (2.20). Втрати у приладах  $P_{\text{ПР}}$  визначались тільки втратами у обмотці напруги ватметру.

В таблиці 5.2 надані результати вимірювань питомих втрат потужності  $P_{\text{ПІТ}}$  кільцевих зразків за допомогою пермеаметру. Як контрольний метод був використаний ватметровий метод з нанесенням обмоток на ці ж зразки. Результати вимірювань питомих втрат  $P_{\text{ПІТ}}^*$  контрольним методом наведені у цій же таблиці. Числові значення похибок  $\delta_r$  вимірювань питомих визначались за відносними відхиленнями середньоарифметичних значень (з 15 вимірювань) втрат  $P_{\text{ПІТ}}$ , які визначались за допомогою пермеаметру, від відповідних значень втрат, що вимірялись контрольним методом. Як видно, для достатньо великого діапазону зміни  $P_{\text{ПІТ}}$  різних зразків похибки вимірювань не перевищують 2,5 %. Слід відмітити, що вказані значення похибок досягаються при більш точному визначенні індукції у зразку за допомогою роз'ємної вимірювальної котушки.

Відтворюваність результатів вимірювань пермеаметром така ж, як і у стандартних установок для визначення втрат потужності. Наприклад, максимальна похибка одинарного вимірювання на пермеаметрі складає менше 3,0 %, що в основному відповідає точності вимірювань ватметровими установками, які виробляються промисловістю.

Обробка багаторазових вимірювань дозволяє уточнити результати вимірювань втрат. Отримані результати свідчать про те, що випадкова се-

редньоквадратична похибка результату п'ятнадцяти спостережень для кожного зразка і двох значень індукції не перевищує 1,0 % при надійній імовірності 0,95.

У випадку випробувань серійних виробів, які виготовлені з однієї або близьких за магнітними властивостями марками сталі, можна також суттєво підвищити точність вимірювання  $P_{\text{ПІТ}}$  пермеаметром при його роботі в двох вказаних режимах. В цьому випадку градувальний коефіцієнт  $k_5$  і значення «ефективних площ  $S_{\text{еф}}$ » визначаються із застосуванням зразків, які мають менш ширший діапазон вимірювань, ніж у виробів, які були використані при подібних градуваннях. Наприклад, якщо різниця величин втрат потужності між зразками складає 30 %, то можна отримати значення похибок  $\delta_P$ , які не перевищують 1,5 % і 4,0 % відповідно для режимів вимірювань і контролю.

Таблиця 5.2 – Результати вимірювань питомих втрат потужності кільцевих зразків за допомогою пермеаметрів

Матеріал	Зразок	$B$ , Тл	$k_5$	$P$ , Вт	$P_{\text{ПР}}$ , мВт	$P_{\text{ПІТ}}$ , Вт/кг	$P_{\text{ПІТ}}^*$ , Вт/кг	$\delta_P$ , %
Сталь 2012	1	1,0	0,77	0,313	6,2	3,036	3,006	1,0
	2	1,0	0,77	0,301	5,8	2,916	2,88	1,25
	3	1,0	0,77	0,299	5,8	2,897	2,89	0,25
Сталь 2012	1	1,5	0,625	0,832	17,3	6,533	6,59	0,86
	2	1,5	0,625	0,795	16,7	6,24	6,31	1,11
	3	1,5	0,625	0,844	17,3	6,632	6,658	0,39
Сталь 2016	1	1,0	0,77	0,347	6,2	3,306	3,276	0,91
	2	1,0	0,77	0,356	6,4	3,391	3,43	1,14
	3	1,0	0,77	0,349	6,4	3,323	3,335	0,36
Сталь 2016	1	1,5	0,625	0,919	17,3	7,093	7,098	0,07
	2	1,5	0,625	0,96	18,0	7,411	7,37	0,56
	3	1,5	0,625	0,89	17,3	6,868	6,73	2,05
Сталь 2012-ТО	1	1,0	0,77	0,501	7,0	4,908	4,971	1,27
	2	1,0	0,77	0,491	7,3	4,811	4,84	0,6
Сталь 2012-ТО	1	1,5	0,625	1,283	25,2	10,151	10,086	0,64
	2	1,5	0,625	1,285	24,0	10,174	10,194	0,2

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть принцип роботи установки за схемою рис. 5.1.
2. На яких етапах технологічного циклу виготовлення осердя статорів електродвигунів доцільно застосовувати пермеаметри для поопераційного контролю якості?
3. Які магнітні характеристики підлягають контролю пермеаметрами?
4. Які види пермеаметрів (з наведених у розділі 3.2) доцільніше застосовувати на конкретному етапі поопераційного контролю виготовлення осердя статорів?

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер. – М.: Энергия, 1969. – 360 с.
2. А.с. 1377790 (СССР). Устройство для измерения магнитных характеристик ферромагнитных образцов / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н. Сиренко. Опубл. в Б.И. – 1988. – № 8.
3. Себко В.П. Устройство контроля магнитных характеристик изделий из электротехнических сталей / В.П. Себко, Н.Н. Сиренко // Вестник Харьковского политехнического института. – 1989. – № 264. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. Вып. 16. – С. 53–55.
4. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин. (Измерительные преобразователи) / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
5. Устройство контроля удельных потерь мощности в стали/ Авраменко А.А., Себко В.П., Сиренко Н.Н., Горкунов Б.М. // Электротехника. – 1990. – №5. – С. 52–55.
6. Прибор контроля магнитных параметров замкнутых образцов / Себко В.П., Авраменко А.А., Горкунов Б.М., Сиренко Н.Н. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 1988. – Т.31, № 12. – С. 44–47.
7. Электромагнитные измерительные преобразователи физических величин : учеб.-метод. пособие / Авраменко А.А., Горкунов Б.М., Сиренко Н.Н., Львов С.Г. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 80с.
8. Авраменко А.А. Устройство для определения магнитных характеристик материалов магнитопроводов энергетического оборудования / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н. Сиренко // Вторая Республиканская научно-техническая конференция «Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике». – Харьков, 1985. – С. 46–47.
9. А.с. 1670638 (СССР). Устройство для определения магнитных характеристик замкнутых образцов / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н. Сиренко. Опубл. в Б.И., 1991, № 30.
10. А.с. 1569756 (СССР). Пермеаметр / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н.Сиренко. Опубл. в Б.И., 1990, № 21.
11. А.с. 1594467 (СССР). Устройство для контроля замкнутых ферромагнитных образцов / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н. Сиренко. Опубл. в Б.И., 1990, № 35.
12. А.с. 1404994 (СССР). Устройство для определения магнитных характеристик цилиндрических изделий / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н. Сиренко. Опубл. в Б.И., 1983, № 23.
13. А.с. 1666995 (СССР). Устройство для определения магнитных характеристик цилиндрических изделий/ / А.А. Авраменко, В.П. Себко, Н.Н. Сиренко. Опубл. в Б.И., 1991, № 28.

14. А.с. 1564577 (СССР). Устройство для определения магнитных характеристик ферромагнитных изделий / В.П. Себко, Н.Н. Сиренко. Оpubл. в Б.И., 1990, № 18.

15. Корицкий Ю.В. Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Т.3 – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 1988. – 728 с.

16. ДСТУ 2681-94. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.

17. ДСТУ 2682-94. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологічне забезпечення. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 15 с.

18. ГОСТ 12119.2-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения магнитной индукции в пермеамetre. Межгосударственный стандарт.: – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

19. ГОСТ 12119.4-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. Межгосударственный стандарт.: – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

20. ГОСТ 12119.5-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения амплитуд магнитной индукции и напряженности магнитного поля. Межгосударственный стандарт.: –М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

21. ГОСТ 12119.6-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь мостом переменного тока. Межгосударственный стандарт.: –М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

22. ГОСТ 12119.0-98. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Общие требования. Межгосударственный стандарт.: – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

23. Студенцов Н.В. Выбор размеров кольцевых образцов при испытании ферромагнитных материалов / Н.В. Студенцов // Измерительная техника. – 1967. – № 6. – С. 83–86.

24. основополагающие стандарты в области метрологического обеспечения. ГОСТ 8.207-76. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. Группа Т 80. – М.: Издательство стандартов, 1983. – С.150–158.

25. Себко В.П. Устройство контроля магнитных характеристик изделий из электротехнических сталей / В.П. Себко, Н.Н. Сиренко // Вестник

Харьковского политехнического института. – 1989. – № 264. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. Вып. 16. – С. 53–55.

26. Адаптивные к конфигурации изделий электромагнитные преобразователи ИВК и АСНИ / Себко В.П., Сиренко Н.Н., Авраменко А.А., Голоцван С.Б. // Научно-техническая конференция «Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях». – Севастополь, 1990. – С. 189–190.

27. Разработка методики контроля магнитных свойств пакетов магнитопроводов двигателей. Отчет / Харьковский политехнический институт. Отв. исполн. – В.П.Себко. – 61325; № ГР 01.83.007.84.35. Харьков, 1985. – 36 с.



Додаток А. Параметри намотувальних дротів

Таблиця Д1 – Основні параметри намотувальних мідних дротів

Номінальний діаметр дроту по міді, мм	Площа перерізу дроту по міді, мм <sup>2</sup>	Діаметр дроту з ізоляцією, мм				Опір 1 м дроту при 20°C, Ом	Допустимий струм при густині			
		ПЭВ -1	ПЭВ -2	ПЭЛ	ПЭТ В		2 А/м <sup>2</sup> , А	3 А/м <sup>2</sup> , А	4 А/м <sup>2</sup> , А	5 А/м <sup>2</sup> , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.02	0.00031	0.027	-	0.035	-	61.5	0.0006	0.0009	0.0012	0.0015
0.025	0.00051	0.034	-	0.04	-	37.16	0.001	0.0015	0.002	0.0025
0.03	0.00071	0.041	-	0.045	-	24.7	0.0014	0.002	0.0028	0.0035
0.032	0.0008	0.043	-	0.046	-	22.4	0.0016	0.0024	0.0032	0.004
0.04	0.0013	0.055	-	0.055	-	13.9	0.0026	0.004	0.005	0.0065
0.05	0.00196	0.062	0.08	0.07	-	9.169	0.004	0.0058	0.008	0.01
0.06	0.00283	0.075	0.09	0.085	0.09	6.367	0.0057	0.0084	0.011	0.014
0.063	0.0031	0.078	0.09	0.085	0.09	4.677	0.0063	0.0093	0.012	0.015
0.07	0.00385	0.084	0.092	0.092	0.1	4.677	0.0071	0.01	0.014	0.019
0.071	0.00396	0.088	0.095	0.095	0.1	4.71	0.0078	0.011	0.015	0.02
0.08	0.00503	0.095	0.105	0.105	0.11	6.63	0.01	0.015	0.02	0.025
0.09	0.00636	0.105	0.12	0.115	0.12	2.86	0.0127	0.0018	0.025	0.0315
0.1	0.00785	0.122	0.13	0.125	0.13	2.291	0.0157	0.023	0.035	0.04
0.112	0.0099	0.134	0.14	0.125	0.14	1.895	0.021	0.029	0.042	0.05
0.12	0.0113	0.144	0.15	0.145	0.15	1.591	0.0226	0.034	0.045	0.055
0.125	0.0122	0.149	0.155	0.15	0.155	1.4	0.0248	0.036	0.047	0.06
0.13	0.0133	0.155	0.16	0.155	0.16	1.32	0.0266	0.04	0.053	0.065
0.14	0.0154	0.165	0.17	0.165	0.17	1.14	0.03	0.046	0.06	0.07
0.15	0.01767	0.176	0.19	0.18	0.19	0.99	0.0354	0.053	0.07	0.085
0.16	0.02011	0.187	0.2	0.19	0.2	0.873	0.06	0.04	0.08	0.1
0.17	0.0227	0.197	0.21	0.2	0.21	0.773	0.0454	0.066	0.09	0.11
0.18	0.02545	0.21	0.22	0.21	0.22	0.688	0.051	0.075	0.1	0.125
0.19	0.02835	0.22	0.23	0.22	0.23	0.618	0.0568	0.084	0.12	0.14
0.2	0.03142	0.23	0.24	0.23	0.24	0.558	0.063	0.093	0.125	0.154
0.21	0.03464	0.24	0.25	0.25	0.25	0.507	0.07	0.1	0.14	0.17
0.224	0.0394	0.256	0.27	0.26	0.27	0.445	0.08	0.11	0.16	0.19
0.236	0.0437	0.26	0.285	0.27	0.28	0.402	0.0875	0.13	0.17	0.215
0.25	0.04909	0.284	0.3	0.275	0.3	0.357	0.098	0.147	0.196	0.245
0.265	0.0552	0.305	0.315	0.305	0.31	0.318	0.111	0.165	0.222	0.275
0.28	0.0615	0.315	0.33	0.315	0.33	0.285	0.124	0.183	0.248	0.3
0.3	0.0708	0.34	0.35	0.34	0.34	0.248	0.143	0.21	0.248	0.34
0.315	0.078	0.35	0.365	0.352	0.36	0.225	0.158	0.23	0.316	0.39
0.335	0.0885	0.375	0.385	0.375	0.38	0.198	0.396	0.26	0.44	0.179

Закінчення таблиці Д1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.355	0.099	0.395	0.414	0.395	0.41	0.177	0.2	0.29	0.4	0.495
0.38	0.1134	0.42	0.44	0.42	0.44	0.155	0.226	0.34	0.452	0.55
0.4	0.126	0.44	0.46	0.442	0.46	0.14	0.251	0.37	0.5	0.63
0.425	0.142	0.465	0.485	0.47	0.47	0.124	0.283	0.42	0.566	0.7
0.45	0.16	0.49	0.51	0.495	0.5	0.11	0.32	0.48	0.64	0.8
0.475	0.177	0.525	0.545	0.495	0.53	0.099	0.35	0.53	0.7	0.85
0.5	0.196	0.55	0.57	0.55	0.55	0.09	0.39	0.58	0.78	0.95
0.53	0.2206	0.58	0.6	0.578	0.6	0.0795	0.44	0.66	0.88	1.1
0.56	0.247	0.61	0.63	0.61	0.62	0.071	0.494	0.74	0.95	1.2
0.6	0.283	0.65	0.67	0.65	0.66	0.062	0.56	0.84	1.12	1.4
0.63	0.313	0.68	0.7	0.68	0.69	0.056	0.626	0.93	1.25	1.55
0.67	0.352	0.72	0.75	0.72	0.75	0.05	0.7	1.0	1.4	1.75
0.71	0.398	0.76	0.79	0.77	0.78	0.044	0.797	1.2	1.6	1.95
0.75	0.441	0.81	0.84	0.81	0.83	0.039	0.884	1.32	1.768	2.2
0.8	0.503	0.86	0.89	0.86	0.89	0.035	1.0	1.5	2.0	2.5
0.85	0.567	0.91	0.94	0.91	0.94	0.031	1.13	1.7	2.26	2.8
0.9	0.636	0.96	0.99	0.96	0.99	0.0275	1.27	1.9	2.54	3.15
0.93	0.6793	0.99	1.02	0.99	1.02	0.0253	1.33	2.0	2.66	3.35
0.95	0.712	1.01	1.04	1.02	1.04	0.0248	1.42	2.13	2.84	3.55
1.0	0.7854	1.07	1.1	1.07	1.11	0.0224	1.57	2.35	3.14	3.9
1.06	0.884	1.13	1.16	1.14	1.16	0.0199	1.765	2.64	3.53	4.4
1.08	0.9161	1.16	1.19	1.16	1.19	0.0188	1.83	2.73	3.66	4.55
1.12	0.9852	1.19	1.22	1.2	1.23	0.0178	1.97	2.94	3.94	4.9
1.18	1.092	1.26	1.28	1.26	1.26	0.0161	2.185	3.27	4.37	5.45
1.25	1.2272	1.33	1.35	1.33	1.36	0.0143	2.45	3.68	4.9	6.1
1.32	1.362	1.4	1.42	1.4	1.42	0.0129	2.72	4.0	5.44	6.8
1.4	1.5394	1.48	1.51	1.48	1.51	0.0113	3.078	4.6	6.156	7.65
1.45	1.6513	1.53	1.56	1.53	1.56	0.0106	3.306	4.95	6.612	8.25
1.5	1.7672	1.58	1.61	1.58	1.61	0.0093	3.534	5.28	7.06	8.8
1.56	1.9113	1.63	1.67	1.64	1.67	0.00917	3.876	5.73	7.752	9.55
1.6	2.01	1.68	1.71	1.68	1.71	0.0086	4.02	6.03	8.04	10.05
1.7	2.2697	1.78	1.81	1.78	1.81	0.0078	4.54	6.78	9.08	11.3
1.74	2.378	1.82	1.85	1.82	1.85	0.00737	4.75	7.13	9.5	11.85
1.8	2.54468	1.89	1.92	1.89	1.92	0.00692	5.0	7.63	10.0	12.7
1.9	2.8105	1.99	2.02	1.99	2.02	0.00612	5.6	8.43	11.2	14.05
2.0	3.1415	2.1	2.12	2.1	2.12	0.00556	6.3	9.42	12.6	15.7
2.12	3.5298	2.21	2.24	2.22	2.24	0.00495	7.0	10.56	14.0	17.6
2.24	4.0112	2.34	2.46	2.34	2.46	0.00445	8.02	12.03	16.04	20.05
2.36	4.3743	2.46	2.48	2.36	2.48	0.00477	8.75	13.11	17.5	21.5
2.5	4.9212	2.6	2.63	2.6	2.62	0.00399	9.85	14.7	19.7	24.5

Додаток Б. Перелік рекомендованих засобів вимірювань

Таблиця Д2 – Перелік рекомендованих ГОСТ 12119.0-98 засобів вимірювань із застосуванням пермеаметрів

Найменування засобу вимірювань	Позначення типу	Границі вимірювань, діапазони вимірювань	Клас точності або основна похибка	Призначення
1	2	3	4	5
Амперметр постійного струму	M1104	Від 0,75 мА до 30 А	0,2	Вимірювання постійного намагнічувального струму. Градування балістичного гальванометра
	M2007		0,2	
	M2015		0,2	
Амперметр змінного струму	Д5017	Від 0,1 до 20 А; від 0,45 до 1,0 кГц	0,2	Вимірювання дійсного значення намагнічувального струму
		От 1 до 3 кГц	0,5	
	Д573	Від 0,01 до 10 А; від 45 Гц до 1 кГц	0,2	
		Від 1 до 3 кГц	0,5	
	Д570	Від 0,1 до 2,0 А; від 45 Гц до 5 кГц	0,5	
Д5014	Від 0,5 мА до 10 А; від 45 Гц до 1 кГц	0,2		
Ватметр	Д50201- Д50204	30-600 В; від 0,25 до 10 А	0,5	Вимірювання магнітних втрат
	Д542		0,5	
Вольтметр постійного струму	M1106	Від 45 мВ до 750 В	0,2	Вимірювання постійної напруги
Вольтметр змінного струму	Ф5053	Від 10 мВ до 300 В; від 40 Гц до 100 кГц	0,5	Вимірювання середньо випрямленої напруги

Продовження таблиці Д2

1	2	3	4	5
Вольтметр змінного струму	Ф485	Від 10 мВ до 100 В;	0,2	Вимірювання дійсного значення напруги
	Ф486	від 45 Гц до 20 кГц	0,2	
Вольтамперметр	М253	Від 15 мВ до 600 В; від 0,75 мА до 30 А	0,5	Вимірювання коефіцієнту опору ізоляційного покриття
Ваги лабораторні	ВЛТ-1	До 1 кг	±0,1 г	Вимірювання маси зразків
	ВЛКТ-1	До 1 кг	±0,1 г	
	ВЛТ-200	До 200 г	±50 мг	
Гальванометр	М17	Від 0,5 до 2,5 поділ./мкВб	-	Вимірювання магнітного потоку у постійних полях
	М197	Від 20 до 200 поділ./мВб	-	
Індикатор нуля	Ф582	Від 1 мкВ до 10 В; від 20 Гц до 200 кГц	-	Індикатор напруги моста
Вимірювальна інформаційна система	У5045	Від 10 мТл до 10 Тл	±3%	Вимірювання статичних магнітних характеристик
	У5057	Від 0,3 до 30,0 Вт/кг; від 50 Гц до 10 кГц	±0,5%	Вимірювання питомих магнітних втрат
Вимірювач нелінійних спотворень	С6-1А	Від 20 Гц до 200 кГц	±10%	Вимірювання коефіцієнту гармонік
	С6-5 - С6-12		±5%	
Магазин опору	Р33	Від 0,1 до 999,9 Ом	0,2	Регулювання чутливості та режиму роботи гальванометра
	Р4830/2	0,1-10 <sup>4</sup> Ом	0,05	Урівноваження моста
	Р4830/3	1-10 <sup>5</sup> Ом	0,05	
Магазин ємності	Р5025	0-111 мкФ	0,1	Урівноваження моста

Закінчення таблиці Д2

Міра взаємної індуктивності	P5009	Від 0,1 до 10 мГн	0,1	Градування ба- лістичного гальванометра
	P536	Від 1 до 10 мГн	0,2	
Мікrobeберметр	Ф190	Від 2 до 500 мкВб	Від $\pm 1,5$ до $\pm 2,5\%$	Вимірювання маг- нітного потоку у постійних полях
	Ф5050	Від 10 мкВб до 10 мВб	$\pm 0,5\%$	
	Ф199	0-500 мкВб	$\pm 1,5\%$	Вимірювання маг- нітної індукції
Міст постійного струму	P329	Від $10^{-8}$ до $10^6$ Ом	Від 0,05 до 2,0	Вимірювання пи- тшого електрич- ного опору
	МО-70	Від $10^{-3}$ до $10^6$ Ом	Від 0,1 до 1,0	
	МОД-61	Від $10^{-3}$ до $10^3$ Ом	Від 0,02 до 2,0	
	P39	Від $10^{-3}$ до $10^2$ Ом	Від 0,01 до 2,0	
	МО-62	Від $10^{-4}$ до $2 \cdot 10^6$ Ом	Від 0,1 до 2,0	
Феррометр	Ф5063	0,01-10 В; від 50 Гц до 10 кГц	$\pm 1,0\%$	Вимірювання се- реднього значення напруги
Частотомір	Ф5034	Від 0,1 Гц до 1,0 МГц	$\pm 10^{-4}\%$	Вимірювання час- тоти намагнічу- вання
	Ф5041	До 10 МГц	$\pm 10^{-4}\%$	
	Ф205	Від 45 до 56 Гц	$\pm 0,1\%$	

Навчальне видання

АВРАМЕНКО Олександр Анатолійович

ГОРКУНОВ Борис Митрофанович

СІРЕНКО Микола Миколайович

ЛЬВОВ Сергій Геннадійович

**ПЕРМЕАМЕТРИ.  
КОНСТРУЮВАННЯ, МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ,  
ЗАСТОСУВАННЯ**

Навчальний посібник

Відповідальний за випуск проф. *Г.М. Сучков*

Роботу рекомендував до видання проф. *В.І. Мілих*

В авторській редакції

План 2012 р., поз. 110

Підп. до друку 23.08.2012 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 8,3. Наклад 100 пр.

Зам. № 222. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №3657 від 24.12.2009 р.

---

Друкарня НТУ «ХП», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21