

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ФАКТОРІВ НА ІНДУКТИВНІСТЬ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ФЕРИТОВИМ ОСЕРДЬМ

© Учанін В.М., 2007

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

На основі теоретичних розрахунків показано вплив конструктивних факторів на індуктивність вихрострумівих перетворювачів з феритовим осердям. Отримані результати проаналізовані з метою досягнення високого рівня ідентичності перетворювачів та повторюваності даних контролю

У вихрострумівих дефектоскопах резонансного (зокрема автогенераторного) типу обмотка вихрострумівих перетворювача (ВСП) параметричного типу включається безпосередньо в коливальний контур автогенератора і визначає його резонансні характеристики [1]. В більшості випадків обмотки ВСП розміщують на феритових осердях, що дозволяє зменшити розміри ВСП, а також забезпечити необхідну чутливість і локальність контролю. В результаті від застосування феритових осердь збільшується внесений електропровідним матеріалом опір в 20-30 разів [2]. При цьому для кожного типу дефектоскопа існує оптимальне співвідношення резонансних характеристик робочого і опорного контурів, при якому забезпечується необхідна чутливість дефектоскопа до зміни імпедансу ВСП і забезпечується відстроювання від впливу зміни зазору. Необхідно зауважити, що можливість підстроювання резонансних характеристик контурів зовнішніми ручками настроювання дефектоскопа є обмеженою. Тому для забезпечення взаємозамінності параметричних ВСП вони мають бути ідентичними за електричними характеристиками. Це важливо також для забезпечення повторюваності результатів контролю, отриманих з використанням різних ВСП. Проблема ідентичності електричних параметрів ВСП стає особливо актуальною при серійному випуску дефектоскопів. Особливого значення ця проблема набуває при розробці спеціальних ВСП для контролю отворів малого діаметра, для яких необхідно зменшувати довжину феритового осердя, що впливає на їх електричні параметри. Для резонансних дефектоскопів необхідно також забезпечити контроль параметрів ВСП, які можуть змінюватись під час експлуатації за рахунок зношування робочого торця феритового осердя. В більшості випадків в документації на ВСП вказується гранично допустиме відхилення індуктивності від номінального значення. Тому оцінку їх якості на

практиці проводять шляхом періодичного вимірювання індуктивності [3].

Схему розміщення обмотки ВСП параметричного типу на феритовому осерді і відповідні геометричні параметри осердя і обмотки наведено на рис. 1. Серед факторів, що можуть впливати на індуктивність (і відповідно на добротність) ВСП з феромагнітним осердям, найбільш суттєвими є параметри осердя (зокрема його довжина l_ϕ , діаметр D_ϕ і магнітна проникність матеріалу осердя μ_ϕ) і розташування обмотки ВСП на осерді (довжина обмотки, що визначається кількістю витків W і відстань початку обмотки від робочого торця l_e) [2-6].

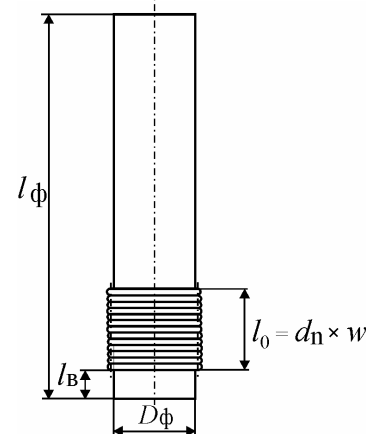


Рис. 1. Феритове осердя з розміщеною на ньому обмоткою ВСП

Відомі формули для обчислення індуктивності котушок на феритових осердях дозволяють оцінити їх індуктивність шляхом заміни осердя еквівалентним еліпсоїдом обертання при збереженні певних співвідношень їх геометричних параметрів і об'єму [4,5]. Такий підхід виправдовує себе і підтверджується експериментальними результатами

за умови розміщення обмотки в центральному перерізі осердя. При розробці ВСП для покращення ефективності їх взаємодії з контрольованим об'єктом обмотки розміщують в кінцевих зонах феритових осердь, які під час контролю наближені до контрольованої поверхні. Така схема розташування обмоток детально не досліджувалася, а використання відомих виразів призводить до значної похибки в розрахунках.

В представленій роботі дослідження параметрів параметричного ВСП з феритовим осердям проведено чисельним методом за допомогою спеціалізованої програми VIC-3D (назва програми є аббревіатурою "Volume Integral Code in 3 Dimensions") [8]. Програма VIC-3D побудована на використанні методу об'ємних інтегралів [9]. Використовувалася версія 2.4 програми, яка дозволяє проводити розрахунок параметрів ВСП з феритовим осердям [10-11]. Ефективність програми VIC-3D була підтверджена рядом дослідників шляхом порівняння розрахункових і експериментальних даних [11-12]. Для додаткового підтвердження ефективності програми проведений обрахунок експериментальних даних, що були отримані раніше в роботі [2]. В табл.1 представлено експериментальні значення реактивної складової комплексного опору X_e і відповідні розрахункові значення X_p , отримані з використанням програми VIC-3D для різних

варіантів ВСП з феритовим осердям, а також відносні значення розбіжності результатів у відсотках $\delta = 100(X_p - X_e)/X_e$.

Таблиця 1 – Порівняння експериментальних і розрахункових значень реактивного опору ВСП

Номер ВСП, згідно [2]	Уявний опір ВСП, Ом		δ , %
	X_e , згідно [2]	X_p	
3-1	380	387,3	2,3
3-2	530	546,3	3,0
3-3	760	841,2	10,6
3-4	2010	2189,7	8,9
3-5	3570	3377,8	-5,4
3-6	4080	3661,5	-10,3
3-7	6200	5745,5	-7,3
3-8	7450	7104,3	-4,6
3-9	8450	8726,2	3,3

Аналіз результатів табл. 1 показує, що розбіжність розрахункових і експериментальних значень реактивної складової опору для обраних ВСП складає від 2,3 до 10,6 відсотків, що підтверджує високу ефективність програми VIC-3D, особливо якщо зважити на велику кількість факторів, що можуть впливати на точність експериментів. На

розходження експериментальних і розрахункових даних, крім безпосередньої похибки вимірювання X_e , впливають також інші фактори, зокрема похибка визначення положення обмотки на осерді, внутрішній і зовнішній радіуси обмотки в експериментальних ВСП.

Номінальні параметри досліджуваних ВСП були вибрані на основі попередніх досліджень, виходячи із задачі досягнення можливості надійного виявлення тріщин завдовжки 2 мм і завглибшки 0,2 мм [1]. Такий поріг чутливості забезпечує ВСП, який складається із 25 витків намотаних впритул в один шар дротом діаметром 0,63 мм. Початок обмотки розміщений на відстані 0,5 мм від кінця осердя. Зокрема, використовується осердя із магній-цинковий фериту марки 7М62 (виробник – НВФ "Феррокерам", м. Біла-Церква), яке має номінальні діаметр і довжину 1,2 і 7,0 мм відповідно. Відносна довжина осердя $\lambda = l_\phi / D_\phi$ дорівнює 5,84. Номінальне значення початкової магнітної проникності матеріалу феритового осердя – $\mu_\phi = 500$. Експериментально визначене значення індуктивності досліджуваного ВСП (розраховане як середнє значення індуктивності комплексу 5-ти ідентичних ВСП) складає 4,58 мкГн.

Індуктивності ВСП визначались за допомогою вимірювача добротності типу VM560 шляхом вимірювання резонансної частоти $f_{рез}$ і власної ємності обмотки ВСП C_0 з наступним розрахунком згідно формули Томсона [13-14]:

$$L = 25330 / f_{рез}^2 (C + C_0), \quad (1)$$

де C - ємність зразкового конденсатора при настроєному в резонанс контурі.

Амплітуда резонансу і відповідна частота $f_{рез}$ визначались за допомогою цифрового осцилографу типу TDS 101 в режимі максимального підсилення.

Власна ємність обмотки ВСП визначалась методом двох частот [14]. Визначення власної ємності за цим методом проводять шляхом настроювання обмотки ВСП в резонанс за допомогою магазину ємностей за двох різних частот $f_2 > f_1$. Власна ємність C_0 обмотки розраховується за формулою

$$C_0 = \frac{C_1 - n^2 C_2}{n^2 - 1}, \quad (2)$$

де C_1 і C_2 - резонансні ємності магазину ємності на частоті f_1 і f_2 відповідно, $n = f_2 / f_1$ - відношення частот (в нашому випадку $n = 2$), тобто використовувались частоти, що відрізнялись у два рази $f_2 = 2f_1$).

Точність досліджень за програмою VIC-3D значною мірою залежить від кількості комірок, на які розбивається об'єм магнітодіелектричного осердя (рис. 2). При цьому, збільшення кількості комірок суттєво збільшує час розрахунку. Кількість комірок має вибиратись із ряду чисел 2^n . Кількість комірок по координатах X і Y (в радіальному напрямку) має бути однаковою, а по координаті Z (по довжині феритового осердя) може бути іншою.

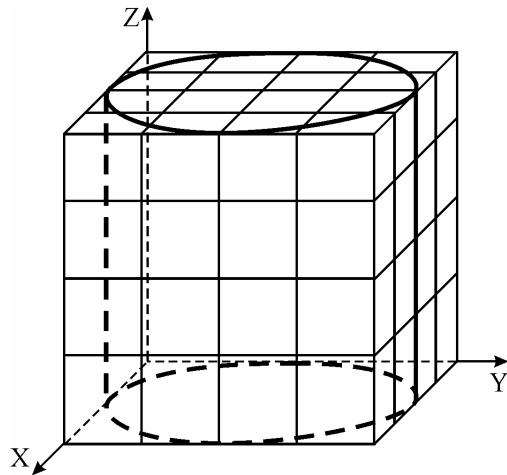


Рис. 2. Схема розбиття феритового осердя на комірки при розрахунках

В табл. 2 представлено розрахункові значення індуктивності L_p для різної кількості комірок N_x, N_y і N_z (відповідно по координатах X, Y і Z). В табл. 2 також представлено час t_p обчислень індуктивності параметричного ВСП для обраної кількості комірок на персональному комп'ютері (процесор Intel Celeron, частота 1 ГГц).

Таблиця 2- Параметри розрахунку для різної кількості комірок

N_x	N_y	N_z	t_p , мин	L_p , мкГн
2	2	16	0,3	3,647
4	4	16	0,83	4,135
8	8	16	2,73	4,293
16	16	16	12,1	4,311
8	8	4	0,1	2,747
16	16	4	2,53	2,854
8	8	8	1,5	3,615
4	4	32	1,5	4,431
8	8	32	5,68	4,572
16	16	32	21,62	4,530

Проведені попередні розрахунки і порівняння з експериментально вимірним значенням індуктивності показали, що достатня точність досліджень може бути досягнута при виборі 8 або 16

комірок по координатах X і Y . По координаті Z кількість комірок має вибиратись більшою, що можна пояснити необхідністю досягнення високої точності розрахунку індуктивності обмоток, розташованих на кінцях осердя. Задовільна збіжність розрахункових і експериментальних значень отримана при розбитті осердя по координаті Z на 32 комірки. Для забезпечення максимальної точності обчислень в подальшому використовувалась максимальна кількість комірок ($N_x = N_y = 16$ і $N_z = 32$).

Розглянемо отримані залежності індуктивності параметричного ВСП від різних параметрів ВСП при розміщенні його в повітрі. При цьому змінювався тільки один із параметрів ВСП, в той час як всі інші параметри дорівнювали номінальному значенню. На всіх поданих рис. 3 ÷ рис. 7 пунктиром вказані номінальні значення досліджуваного параметра і відповідне номінальне значення індуктивності, яке дорівнює 4,53 мкГн.

На рис. 3 наведено залежність розрахункових і експериментальних значень індуктивності L_0 від розміщення обмотки на феритовому осерді (відступу обмотки від робочого кінця l_g). Інші конструктивні параметри ВСП (діаметр дроту, кількість витків, діаметр, довжина і магнітна проникність осердя тощо) відповідають номінальним значенням і вказані вище. Експериментальні значення індуктивності отримані за представленою вище методикою.

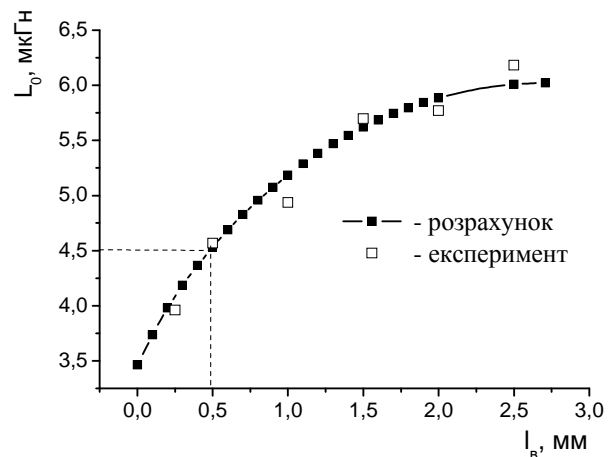


Рис. 3. Залежність індуктивності L_0 параметричного ВСП від відступу l_g обмотки від робочого кінця осердя

Залежність на рис. 3 показує високу збіжність розрахункових і експериментальних значень індуктивності ВСП з різним розміщенням обмоток на феритовому осерді. Максимальна розбіжність експериментальних і розрахункових значень складає

5 відсотків, що ще раз підтверджує ефективність програми при розрахунках ВСП з феритовими осердями. Наведені залежності показують досить сильний вплив відхилень відступу обмотки від робочого кінця осердя на індуктивність ВСП. Так, при зміні параметру l_e від 0 до 0,5 мм індуктивність змінюється від 3,5 до 4,53 мкГн, тобто більше, ніж на 20%. Необхідно відзначити, що цей параметр визначає відстань до контрольованої поверхні, що зумовлює зв'язок між обмоткою ВСП і вихровими струмами об'єкта контролю. Таким чином, неточність при розміщенні обмоток ВСП на феритовому осерді може бути дуже суттєвим фактором для забезпечення повторюваності результатів контролю, виконаного різними ВСП. Це визначає особливу важливість ретельного контролю за дотриманням цього параметру при виготовленні ВСП.

На рис. 4 представлена залежність розрахованої індуктивності L_0 розміщеного в повітрі параметричного ВСП від відносної магнітної проникності матеріалу осердя μ_ϕ . Інші конструктивні параметри ВСП відповідають номінальним значенням.

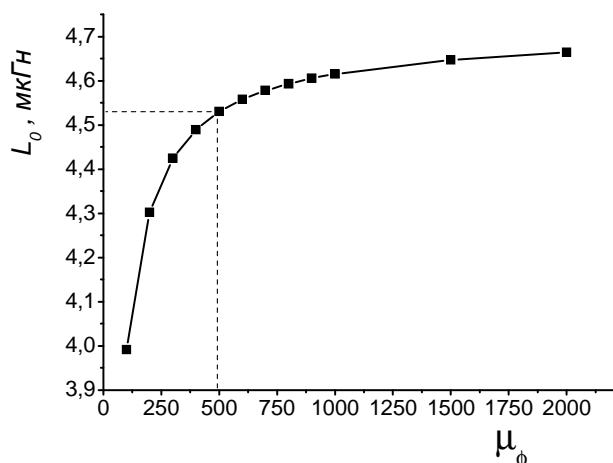


Рис. 4. Залежність індуктивності параметричного ВСП від магнітної проникності феритового осердя

Із цієї залежності видно, що збільшення відносної магнітної проникності призводить до збільшення індуктивності ВСП, але, починаючи із деякого значення, індуктивність практично не змінюється. Якщо магнітна проникність зменшується відносно номінального значення $\mu_\phi = 500$ (виділено пунктиром), її зміни сильніше впливають на індуктивність, ніж у випадку збільшення μ_ϕ . Для зменшення впливу відносної проникності на ідентичність ВСП при їх виробництві введений вхідний контроль параметрів феритових осердь. Методика контролю і розбраковування

осердь реалізується шляхом вимірювання індуктивності тестової котушки при послідовному розміщенні в ній контрольованих осердь. Феритові осердя, індуктивність яких менша граничного значення, до виробництва ВСП не допускаються.

На рис. 5 наведено залежність розрахованої індуктивності ВСП L_0 в повітрі від кількості витків обмотки w . Інші конструктивні параметри ВСП (діаметр дроту, довжина, діаметр і магнітна проникність матеріалу осердя, відступ обмотки від кінця осердя тощо) відповідають номінальним значенням і представлені вище.

Аналіз рис. 5 показує прогнозовано значну залежність індуктивності ВСП від кількості витків. В той же час, якщо порівняти індуктивності для кількості витків, що відрізняються $\sqrt{2}$ разів (наприклад для 20 і 28 витків), то можна зауважити, що в нашому випадку спостерігається порушення класичної [4] пропорційності індуктивності обмотки квадрату числа витків, яка характерна для обмоток, розміщених на феритових осердях симетрично. Це можна пояснити тим, що котушечна магнітна проникність для витків, розміщених в центрі і на кінцях осердя, може

відрізнятися в декілька разів. Залежність індуктивності від кількості витків вказує на необхідність точного контролю кількості витків. Тим більше, що зростання цього параметру збільшує також активну складову опору ВСП і погіршує його добротність.

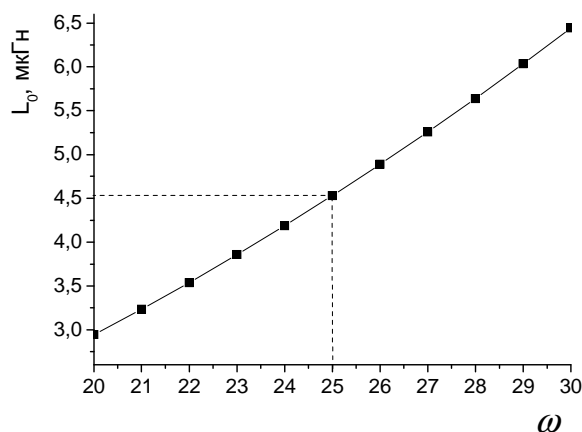


Рис. 5. Залежність індуктивності параметричного ВСП від кількості витків

На рис. 6 наведено розрахункову залежність індуктивності L_0 від довжини феритового осердя l_ϕ . Інші конструктивні параметри ВСП (діаметр дроту, кількість витків, діаметр і магнітна проникність матеріалу осердя, відступ обмотки від кінця осердя тощо) відповідають номінальним значенням і представлені вище.

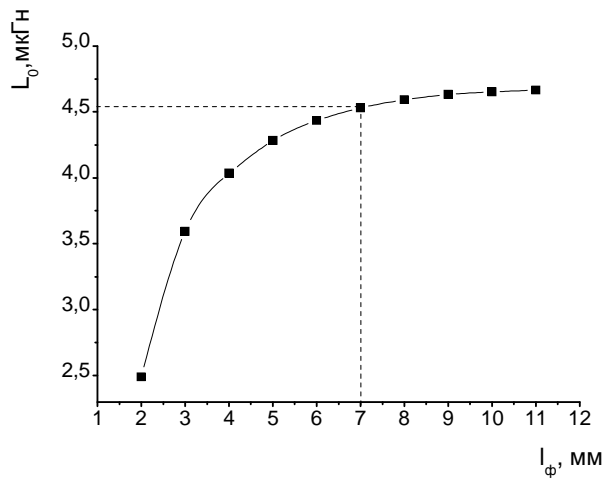


Рис. 6. Залежність індуктивності L_0 від довжини феритового осердя l_{ϕ}

Залежність індуктивності ВСП від довжини феритового осердя подібна до залежності індуктивності від відносної магнітної проникності матеріалу. Це можна пояснити тим, що збільшення довжини осердя так само, як і відносна магнітна проникність, призводить до збільшення магнітної проникності осердя. Залежність індуктивності починаючи із деякого значення довжини осердя виходить на асимптоту і практично не змінюється. Зменшення довжини осердя від номінального значення, яке дорівнює 7 мм (виділено пунктиром), значно сильніше впливає на індуктивність.

Загальний характер отриманої залежності добре збігається з результатами відомих досліджень, в яких проаналізовано вплив геометричних параметрів осердя і розміщення на ньому обмотки на відносну магнітну проникність матеріалу осердя [5-7]. Крім того, отримані результати підтверджують результати роботи В.О. Нічоги, в якій введено поняття критичної відносної довжини осердя $\lambda_{sp} = l_{\phi} / D_{\phi}$ [7]. Збільшення довжини осердя більше критичного є нераціональним, так як не призводить до подальшого збільшення проникності осердя і відповідного збільшення індуктивності обмотки. Представлені результати ще раз підтверджують правильність вибору номінального значення висоти осердя при розробці ВСП, так як її збільшення від номінального (7 мм) не дає помітного виграшу по індуктивності.

Точність серійного виготовлення осердь по довжині задається допуском в технічній документації. Наприклад, американська фірма Fair-Rite Product Corp. виготовляє осердя такої довжини з похибкою до $\pm 0,3$ мм. Із наведеної залежності видно, що такі відхилення від номінального значення практично не впливають на індуктивність. Однак, серйозна проблема полягає в необхідності

зменшувати довжину феритових осердь при контролі отворів діаметром менше 7 мм. Так, для найменшого із контрольованих отворів діаметром 5 мм довжина феритового осердя обирається рівною 4,5 мм. Це майже на 10% зменшує індуктивність обмотки, що є недопустимим. Тому при виробництві ВСП для контролю отворів відповідне зменшення індуктивності за рахунок зменшення довжини феритового осердя компенсують збільшенням діаметру осердя або шляхом двошарового намотування обмоток.

На рис. 7 наведено залежність індуктивності L_0 від діаметру феритового осердя D_{ϕ} .

Результати на рис. 7 показують сильний вплив відхилення діаметру осердя від номінального (1,2 мм) на індуктивність ВСП. При цьому залежність індуктивності ВСП від діаметру осердя близька до лінійної. Це можна пояснити тим, що в нашому випадку досліджувався вплив невеликих відхилень діаметру осердя від номінального для осердь, відносна довжина яких близька до критичної. Для осердь меншої довжини і більших варіацій діаметру осердя лінійність може порушуватись за рахунок можливого впливу зміни відносної довжини осердя (рис. 6). Аналіз отриманих характеристик показує можливість компенсації впливу зменшення довжини феритового осердя шляхом збільшення його діаметру. Зокрема, при розробці ВСП для контролю отворів з осердям довжиною 4,5 мм було використано феритове осердя діаметром 1,5 мм.

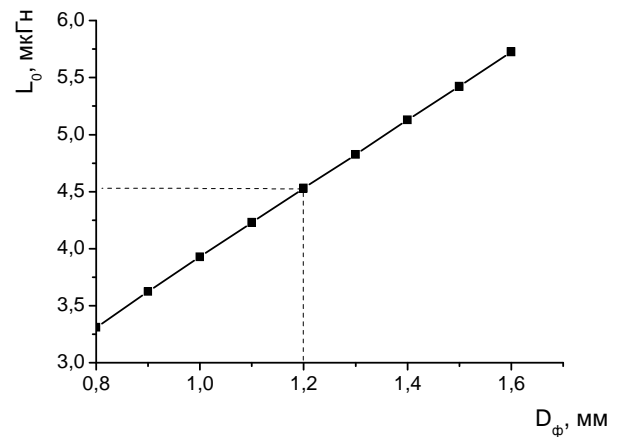


Рис. 7. Залежність індуктивності L_0 параметричного ВСП від діаметру феритового осердя D_{ϕ}

Представлені результати дозволили визначити критичні параметри конструкції ВСП з феритовим осердям, які важливі з точки зору забезпечення їх ідентичності. Проведений аналіз дозволив розробити технологічні заходи, які забезпечили ідентичність

електричних характеристик ВСП в межах $\pm 5\%$. Це дозволило реалізувати можливість взаємозамінності ВСП при їх серійному виготовленні і необхідну повторюваність результатів контролю. Крім того, отримані результати дозволили розробити ВСП для контролю бічної стінки отворів малого діаметру (менше 6 мм), електричні параметри яких ідентичні параметрам стандартних ВСП.

1. Учанин В.Н., Дереча В.Я. Вихретоковый метод выявления поверхностных дефектов узлов авиационной техники в условиях эксплуатации // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2006. 2006. - № 4. - С. 20 – 28. 2. Попов В.К., Кабашева А.А. Влияние ферритовых сердечников на электрические параметры вихретоковых накладных преобразователей // *Дефектоскопия*. – 1973. - № 4. – С.80-85. 3. Quaranta M., Rea G., Gagliardi G. Characterization of absolute-resonant eddy current probes // *Non-Destructive Testing* 92, Elsevier Science Publishers B.V. – 1992. – P. 351-355. 4. Мизюк Л.Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей. – К.: Наукова думка. – 1964. – 168 с. 5. Мизюк Л.Я., Ничога В.А. Электрические параметры индукционных низкочастотных магнитоприемников с ферромагнитными сердечниками. *Геофизическое приборостроение*, вып. 20, Л.: Недра. - 1964. – С. 37-61. 6. Мизюк Л.Я., Ничога В.А. К расчету добротности низкочастотных индукционных магнитоприемников

// *Теория и элементы систем отбора геофизической информации*. - Киев: Наукова думка. - 1965. – С. 101-110. 7. Ничога В.А. К определению критической относительной длины цилиндрических ферромагнитных сердечников // *Геофизическая аппаратура*, вып. 25. – 1965. – Л.: Недра. - С. 40 – 44. 8. User's Guide for VIC-3D: An Eddy current NDE Code. Version 2.4. - USA, Bloomington: Sabbagh Associates, Inc. - 1996. – 90 p. 9. Dunbar W.S. The Volume Integral Method of Eddy Current Modeling // *J. Nondestructive Evaluation*. - 1985. – Vol. 5. - № 1. – P. 9-14. 10. Sabbagh H.A., Sabbagh L.D., Bowler J.R. A Model of Ferrite-core Probes over Composite Workpieces. // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – Vol. 7A. – New York: Plenum Press. – 1988. – P. 479-486. 11. Sabbagh L.D., Hedengren K.H., Hurley D.C. Interaction of Flaw with a Ferrite-core Eddy Current Probe: Comparison Between Model and Experiment // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. – Vol. 10A. – New York: Plenum Press. – 1991. – P. 883-888. 12. Burke S. A Benchmark Problem for Computation of ΔZ in Eddy Current NDE // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – Vol. 7. – 1988. – 3. 35-41. 13. Измеритель добротности VM 560. Инструкция по эксплуатации. - Брно: Тесла. – 84 с. 14. Ничога В.А. Устройство для измерения собственной емкости катушек индуктивности // *Геофизическая аппаратура*, вып. 31. – 1966. – Л.: Недра. - С. 154 – 158.

