В. Нічога<sup>1</sup>, В. Проненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка" <sup>2</sup>Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України

## МАЛОГАБАРИТНІ ІНДУКЦІЙНІ ДАВАЧІ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СЕРЕДОВИЩ І ОБ'ЄКТІВ

## © Нічога В., Проненко В., 2012

Наведено результати досліджень малогабаритних індукційних сенсорів для вивчення магнітних полів в космічному просторі і магнітних полів дефектів залізничних рейок. В обох випадках необхідно досягти максимальної чутливості за мінімальних розмірів, габаритів і маси.

Ключові слова: малогабаритні індукційні сенсори, магнітне поле, рівень шуму, чутливість, дефекти рейки.

Some results of researches of small size induction sensors intended for investigating magnetic fields in the outer space or caused by the rail defects are presented in the article. The task of achievement of the maximal sensitivity at minimal dimensions and weight is formulated in both cases.

Key words: small size induction sensor, magnetic field, noise level, sensitivity, rail defect.

Вступ. Індукційні давачі (ІД) є первинними перетворювачами індукційних магнітометрів (ІМ) – пристроїв, призначених для дослідження природних та штучно створених магнітних полів, які широко використовуються для пошуку корисних копалин, вивчення структури магнітного поля Землі, виявлення прихованих металевих об'єктів, неруйнівного контролю та технічної діагностики виробів і споруд, вирішення задач електромагнітної сумісності, дослідження власних магнітних полів біологічних об'єктів, захисту інформації в системах телекомунікації, досліджень впливу електромагнітного випромінювання на навколишнє середовище та ін. [1–10]. Широке використання ІД обумовлено їх доволі високою чутливістю, можливістю вимірювання компонент вектора змінного магнітного поля, що дає змогу одержувати повну інформацію про структуру поля, придатністю для роботи в широкому діапазоні температур, широкосмуговістю, високою надійністю, довговічністю та відносно малою вартістю і простотою обслуговування.

ІД, можливо, найпоширеніші пристрої для дослідження змінних магнітних полів в електромагнітних системах діагностики матеріалів, об'єктів та середовищ. Звичайно, різні сфери застосування електромагнітних систем накладають різні вимоги до основних параметрів ІД. Так, наприклад, електромагнітні системи діагностики об'єктів потребують індукційних давачів, які за відносно невеликої чутливості повинні забезпечити хорошу просторову роздільну здатність, тобто локальність чи "точковість" реєстрації магнітних полів збурень над дефектами [10]. Важливо зазначити, що для таких ІД не висуваються жорсткі вимоги щодо рівня власних магнітних шумів.

Навпаки, до ІД для космічних систем ставиться вимога забезпечення якнайменшого рівня магнітних шумів за мінімізації маси й споживаної потужності [2, 3, 7, 8].

Наведено індукційні давачі, призначені для дослідження магнітних полів у космічному середовищі і магнітних полів, що виникають у залізничних рейках під час їх дефектоскопії магнітними методами. Для обох випадків розглянуто способи мінімізації геометричних розмірів ІД і маси за забезпечення як мінімального рівня магнітних шумів, так і необхідної просторової роздільної здатності і чутливості відповідно.

Мініатюрний індукційний давач для космічних досліджень. Використання міні-, мікро- і наносупутників, зокрема найпопулярніших, так званих кубсатів [11], стало популярним способом для університетів і невеликих компаній отримати доступ до результатів наукових експериментів у космосі. Саме кубсати, що мають розміри всього 10х10х10 см і вагу не більшу за 1 кг, набули найбільшого поширення, і сьогодні є кілька успішних прикладів розроблення і виробництва кубсатів в європейських університетах. Деякі з них пропонують добре розроблену складну основну структуру із стабілізацією положення в просторі та доволі інформативною телеметрією. Однією з переваг кубсатів є відносно низька вартість запуску – як правило, вони запускаються групою як вторинне навантаження. Однак для проведення за їх допомогою наукових експериментів відповідного рівня необхідно вирішити найскладнішу проблему – створити дуже малі та легкі, але доволі чутливі давачі. Через це більшість запусків кубсатів, про що авторам вдалося дізнатися із доступних публікацій, спрямовані на демонстрації технології та відпрацювання переважно службових систем, а не проведення досліджень у космічній плазмі. У статті описано новий мініатюрний високочутливий трикомпонентний індукційний давач для вимірювання змінного магнітного поля на борту кубсату.

Як відомо, чутливість ІД - G за напруженістю поля H на заданій частоті f можна визначити за рівнянням [1, 12]:

$$G_{H} = 2\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{m}_{0} \cdot \boldsymbol{m}_{c}, \frac{B}{A / M}$$
(1)

або за індукцією поля В

$$G_B = 2\mathbf{p} \cdot f \cdot \mathbf{n} \cdot S \cdot \mathbf{m}_c, \frac{B}{T\pi}.$$
 (1a)

Як видно з цих виразів, основними факторами, що впливають на чутливість ІД, є площа поперечного перерізу осердя S, кількість витків котушки n, відносна магнітна проникність осердя  $\mu_c$  і частота сигналу f. Оскільки основною вимогою при проектуванні нового ІД є зменшення розмірів і ваги давача, то неможливо вибрати ці значення довільно: кількість витків повинна бути розрахована близькою до оптимальної з погляду узгодження з вхідним підсилювачем, а площа поперечного перерізу осердя – вибиратися за умови забезпечення необхідної величини відношення  $\lambda$  довжини осердя l до його діаметра d, яка визначається з міркувань отримання максимального значення  $\mu_c$  за збереження незалежності цієї величини від змін магнітної проникності матеріалу [2]. Отже, на площу перерізу або діаметр осердя накладаються жорсткі вимоги, що не дають змоги збільшувати їх довільно.

Одним з основних параметрів, за яким можна порівнювати давачі для вимірювання магнітних полів, є поріг чутливості за магнітним полем –  $B_{min}$ , або рівень густини еквівалентного шумового поля (magnetic field noise) в смузі 1 Гц - $\sqrt{W}$ . Ці параметри ІД є частотозалежними величинами , мають розмірність  $nT \cdot Hz^{-1/2}$  і на заданій частоті  $\omega$  визначаються залежністю

$$B_{min}(\omega) = \sqrt{W} = \frac{\sqrt{\Sigma \overline{E}_u^2}}{G(\omega)}, \quad nT \times Hz^{-1/2}, \tag{16}$$

де  $\sqrt{\Sigma \overline{E}_{uu}^2}$  – середньоквадратичне значення шумів ІД у смузі 1 Гц.

Фізичний зміст порогу чутливості ІД – це таке значення вимірюваної індукції поля  $B_{min}$ , за якого відносна похибка вимірювання становить 100%, тобто за співвідношення сигнал/шум -  $\zeta = 1$  [1].

Існує декілька способів змінити магнітну проникність осердя  $\mu_c$  без зміни його розмірів, наприклад: використання трубчастого осердя [13], а також використання концентраторів магнітного потоку на краях осердя з діаметром  $D_0$ , більшим від діаметра осердя d (рис. 1) [14]. Саме останній спосіб уявляється найперспективнішим за наявності жорстких обмежень на розміри осердя, тому розглянемо його детальніше.

Відомо, що магнітна проникність осердя  $\mu_c$  буде завжди меншою, ніж магнітна проникність матеріалу  $\mu$  через явище розмагнічування, і за використання матеріалу з достатньо високою проникністю  $\mu$  залежить переважно від форми осердя і може бути обчислена як [1]:

$$\boldsymbol{m}_{c} = \frac{\boldsymbol{m}}{1 + N(\boldsymbol{m} - 1)},\tag{2}$$

де N – коефіцієнт розмагнічування, який і залежить від геометрії осердя.

Доведено [14], що завдяки використанню концентраторів потоку коефіцієнт розмагнічування зменшується в  $(d/D_0)^2$  разів, і для осердь з котушкою завдовжки 0.9*l* магнітна проникність осердя з концентраторами потоку  $\mu_{cFC}$  обчислюється як:

$$\mathbf{m}_{cFC} = \frac{\mathbf{m}}{1 + (\mathbf{m} - 1)N \frac{l}{D_0} \left(\frac{d}{D_0}\right)^2}.$$
(3)

Покажемо, що ефективність застосування кінцевих концентраторів залежить від довжини осердя. Якщо магнітна проникність матеріалу осердя дуже велика, тобто  $\mu \rightarrow \infty$ , *то* можна прийняти, що  $\mu_c \approx 1/N$ . Тоді збільшення магнітної проникності осердя за рахунок використання концентраторів  $\mu_{cFC}/\mu_c$  визначається як:

$$\frac{\mathbf{m}_{cFC}}{\mathbf{m}_{c}} \approx \frac{D_{0}}{l} \left(\frac{D_{0}}{d}\right)^{2}.$$
(4)

Це рівняння показує, що загалом застосування концентраторів доцільне для осердь невеликої довжини, коли  $l/D_0 \ll (d/D_0)^2$ . На рис. 2 показано побудовану залежність  $\mu_{cFC}/\mu_c$  від відношення довжини осердя до діаметра концентраторів за різних значень відношення діаметра концентраторів до діаметра осердя.



Рис. 2. залежність зоглышення магнітної проникності осердя за рахунок використання концентраторів μ<sub>cFC</sub>/μ<sub>c</sub> від відношення довжини осердя до діаметра концентраторів за різних значень відношення діаметра концентраторів до діаметра осердя

Отже, для IM широкого застосування, в яких відношення  $\lambda = l/d$  переважно доволі велике, такий шлях буде неефективним. Однак для коротких IM спеціального призначення такий тип осердя можна рекомендувати.

Осердя з концентраторами потоку було використане у малогабаритному давачі ІМ LEMI-139 (рис. 3), створеному для досліджень на борту наносупутників типу "кубсат", в яких розміри давача треба було зменшити без відчутної втрати чутливості. Три компоненти давача було розміщено в кубі з ребром 19 мм, як показано на рис.3. Розміри осердя є такими: l=19 мм, d = 3.5 мм,  $D_0 = 10$  мм.

Для такого випадку згідно з рівнянням (3) ефективна магнітна проникність осердя за рахунок використання концентраторів із поданими розмірами повинна збільшитися у 3,8 раза. Однак за даними експерименту отримано виграш щодо чутливості давача *G* лише у 2,2 раза (див. рис. 4.)



Рис. З. Давач ІМ LEMI-139

Рис. 4. Вплив концентраторів потоку на чутливість ІД: АЧХ ІД – штрихова крива; АЧХ ІД з осердям з концентраторами потоку – суцільна крива

Було також виміряно зміни рівня власних шумів за наявності та відсутності концентраторів (див. рис. 5). У результаті також отримано зменшення порогу чутливості на таку саму величину.



*Рис. 5. Вплив концентраторів потоку на рівень власних шумів ІМ LEMI-139: рівень власних шумів ІМ LEMI-139 – трикутники; рівень власних шумів ІМ LEMI-139 з осердям з концентраторами потоку – кружечки* 

Отриману відмінність між розрахунковими і експериментальними даними можна пояснити особливостями конструктивного виконання концентратора в таких малих розмірах, за яких не вдалося забезпечити щільний контакт між концентратором і осердям, що призвело до зменшення ефективності застосування концентраторів. Правильність цього положення підтверджується відносним зниженням ефективності концентратора на високих частотах (див. рисунки), де малі щілини між осердям і концентратором, яких не вдалося уникнути, вже мають важливіше значення. Для перевірки правильності цього припущення розрахована ефективність концентраторів для випадку, описаного у роботі [14], в якій осердя давача було виконане суцільним за методом лиття без порушення контактів між концентраторами і самим осердям. Від авторів роботи було отримано такі дані про розміри осердя: l=100 мм, d = 2 мм,  $D_0 = 12$  мм. Підставляючи ці дані до формули (3), проведено розрахунки, які показали очікуване зменшення рівня власних шумів у 4,3 раза, що повністю збіглося із даними експерименту, наведеними у згадуваній роботі. При цьому зменшення ефективності концентраторів з частотою не було помічене. Ці результати підтверджують як

справедливість застосування формули (3) для оцінювання ефективності застосування концентраторів, так і правильність зроблених припущень щодо причин розходження експериментальних і розрахункових даних у випадку випробувань, проведених із малогабаритним магнітометром LEMI-139.

Отже, запропонований метод може бути ефективно використаний для створення надмалих індукційних давачів. З його застосуванням побудовано найменший з відомих, але достатньо чутливий для проведення вимірювань у навколоземній космічній плазмі індукційний магнітометр типу LEMI-139, основні технічні параметри якого порівняно з кращими відомими закордонними приладами наведено нижче.

Таблиця 1

N⁰	Проект	Частотний	Довжина,	Maca,	Поріг чутливості,	Посилания
3/П	TIPOCKI	діапазон, Гц	мм г пТ/√Гц		пТ/√Гц	посилання
1	Double Star	8-10000	250	135	3 – 10 Гц	
					5,6·10 <sup>-2</sup> – 1 кГц	[15]
					5·10 <sup>-1</sup> – 10 кГц	
2	THEMIS	0,1 - 4000	170	110	7,6·10 <sup>-1</sup> – 10 Гц	[16]
					2,2·10 <sup>-2</sup> – 1 кГц	
3	Bepi Colombo	1 - 640000	100	11	2 – 10 Гц	[17]
					1·10⁻¹ −>200 Гц	
4	LEMI-139	40-10000	19x19x19	11	10 – 100 Гц 5·10 <sup>-1</sup> – 1 кГц	
	(трикомпонентний)				9·10 <sup>-2</sup> – 7 кГц	

Основні параметри супутникових ІМ

**Локальні індукційні давачі для діагностики дефектів залізничних рейок.** Сьогодні для швидкісної дефектоскопії магнітодинамічним методом на Укрзалізниці використовують рамкові інтегральні індукційні давачі, які реєструють поздовжню (H<sub>y</sub>) складову магнітного поля, що створюється намагнічувальною системою. Такий давач заводського виготовлення (ЗД) являє собою рамку розмірами 10х75 мм<sup>2</sup>, його ширина орієнтовно дорівнює ширині головки рейки. Він постійно експлуатується на вагоні-дефектоскопі [10]

Існує новий інтегральний модернізований давач (МД), що має майже удвічі більшу чутливість порівняно з ЗД (рис. 6).



Рис. 6. Інтегральний ІД типу ЗД на пошуковій лижі під час випробувань

Обидва типи давачів мають однакову конструкцію і розміри. Основні параметри заводського (ЗД) і нового модернізованого давача (МД) наведено в табл. 2, де

 $S_{\phi} = a \cdot s \, [\text{M}^2] - \phi$ ізична площа ІД, *a* і *s* геометричні розміри поперечного перерізу котушки ІД;  $S_{\mathcal{A}} = S_{\phi} \cdot n = a \cdot s \cdot n \, [\text{M}^2] - еквівалентна площа ІД, w – кількість витків котушки давача;$   $M = \mu_0 \cdot \mu_c \cdot S_{\mathcal{I}} = \mu_0 \cdot \mu_c \cdot S_{\phi} \cdot n$  [Гн·м] – магнітний момент ІД,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

 $\mu_c$  –магнітна проникливість осердя ІД (для рамкових ІД, якими є давачі ЗД і МД  $\mu_c$  =1);

 $G = \omega \cdot M [B/A^*M]$  – чутливість ІД за напруженістю магнітного поля ( на частотах  $\omega < \omega_0$ , де  $\omega_0$  – власна резонансна частота ІД ),  $G_{f=1\kappa\Gamma\mu}$  – чутливість ІД на частоті 1 кГц.

Таблиця 2

Параметри давача	$S_{\varphi}$ , м <sup>2</sup>	$S_{д}, M^2$	М, Гн*м	f <sub>0</sub> , кГц	$G_{f=1\kappa\Gamma\mu}, B/A*_M$
Заводський давач (ЗД)	4,55*10 <sup>-4</sup>	0,063	7,9*10 <sup>-8</sup>	330	5*10-4
Модернізований давач (МД)	4,55*10 <sup>-4</sup>	0,115	$14,4*10^{-8}$	186	9*10 <sup>-4</sup>

Параметри інтегральних давачів ЗД і МД

Значним недоліком як ЗД, так і і МД є невисока чутливість, а також недостатня просторова роздільна здатність. Крім того, як показано в [18–20], під час переходу на багатоканальні вимірювання із застосуванням точкових давачів, розміщених певним чином по поверхні головки рейки, можна отримати додаткову інформацію про дефектний стан головки рейки. Отже, для вирішення завдань багатокомпонентної і багатоканальної дефектоскопії необхідні локальні або точкові давачі, геометричні розміри яких будуть співвимірними з розмірами дефектів, що підлягають виявленню.

Для вирішення цього завдання в ФМІ НАН України було створено базові взірці локальних феромагнітних індукційних давачів (ФІД) і точкових рамкових давачів (ТРД).

У давачах ФІД (див. рис.7) використовується феритове осердя з матеріалу НЦ 2000 розміром 3х7х34 мм<sup>3</sup>. Маса давача – 10 г. Було розроблено чотири варіанти давачів ФІД.

ФІД1 і ФІД2 складаються з 2 котушок: вимірювальної (w=460 витків) і зворотного зв'язку (w<sub>33</sub>=100 витків), розташованих в ФІД1 по центру феритового осердя, в ФІД2 – на торці осердя. Завдяки використанню зворотного зв'язку в давачах ФІД1 і ФІД2 реалізовано частотонезалежну (плоску) АЧХ [4, 8].

ФІД5 і ФІД6 являють собою вимірювальну котушку (w=560 витків), розміщену безпосередньо на осерді, в ФІД5 – по центру осердя, в ФІД6 – на торці осердя. Давачі ФІД5 і ФІД6 безпосередньо з'єднані з попереднім підсилювачем сигналу і мають лінійну АЧХ. Давачі з торцевим розташуванням котушок – ФІД5 і ФІД2 – призначені для реєстрації вертикальної  $H_Z$  складової магнітного поля.



Рис. 7. Ескіз феромагнітного індукційного давача типу ФІД

Рис. 8. Ескіз точкового рамкового давача типу ТРД

Точковий рамковий давач (ТРД) являє собою багатовиткову рамку без феромагнітного осердя, що розміщена на круглому котушковому каркасі (рис. 8).

Розміри каркаса: довжина l = 7 мм, діаметр d = 6 мм. Котушка давача містить w=1100 витків, рівномірно розташованих на каркасі. Маса давача – 2 г. Зовнішній вигляд давачів типу ТРД і ФІД показано на рис. 9. Основні параметри давачів типу ФІД і ТРД подано в табл. 3.



Рис. 9. Зовнішній вигляд точкового рамкового (ТРД) і феромагнітного давачів (ФІД) для діагностики рейки

Таблиця 3

Параметр давача	Ф I Д 1	Ф IД 2	<b>Ф I Д</b> 5	Ф I Д 6	трд
Фізична площа Sф(м 2)	3 * 1 0 <sup>-4</sup>	3 * 1 0 - 4	3 * 1 0 <sup>-4</sup>	3 * 1 0 - 4	0,5*10 <sup>-4</sup>
Еквівалентна площа Ѕд(м2)	2 , 2	1,99	2,34	3,2	0,055
Магнітний момент М (Гн*м)	3 , 0 * 1 0 <sup>-6</sup>	2 ,5 * 1 0 -6	3 ,3 * 1 0 <sup>-6</sup>	3 ,7 * 1 0 <sup>-6</sup>	0 , 1 7 * 1 0 <sup>-6</sup>
Власна резонансна частота f(кГц)	140	150	110	100	150
Еквівалентна магнітна проникність осердя ?	17,4	14,5	14,9	17,8	1
Чутливість по полю на f = 1кГц G (в/а*м)	0,019	0,016	0 ,0 2 1	0,023	0,011

## Параметри давачів типу ФІД і ТРД

Оскільки прототипом давачів для діагностики рейок були інтегральні заводські давачі типу ЗД, то всі характеристики розроблених нових як інтегральних, так і точкових давачів порівнювались саме зі штатними давачами ЗД. У табл. 4 подано результати порівняння параметрів давачів МД, ТРД і ФІДб з давачем типу ЗД.

Таблиця 4

Параметри	$\mathbf{S}$ , $\mathbf{w}^2$	$S M^2$	М Ги*м	fo KU	$G_{f=1\kappa\Gamma\mu}, B/A*_M$
давача	υφ, м	5д, м	<b>IVI, I</b> II M	10, кі ц	
Заводський давач (ЗД)	$4,55*10^{-4}$	0,063	7,9*10 <sup>-8</sup>	330	5*10-4
Модернізований	$4,55*10^{-4}$	0,115	14,4*10 <sup>-8</sup>	186	9*10 <sup>-4</sup>
давач (МД)					
ТРД	0.5*10 <sup>-4</sup>	0.055	0.17*10 <sup>-6</sup>	150	0.011
Точковий давач	0,5 10	0,055	0,17 10	150	0,011
ФІД6					
лінійна АЧХ	3*10 <sup>-4</sup>	3,2	3,7*10 <sup>-6</sup>	100	0,0231
(основний варіант)					

## Результати порівняння параметрів давачів ТРД і ФІД з давачем типу ЗД

На рис. 10 показано розташування індукційних давачів на діагностичних візочках під час лабораторних випробувань на відрізку дефектної залізничної рейки.

За результатами проведених експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

1. Розроблені взірці локальних і точкових індукційних давачів типу ФІД і ТРД при обмежених габаритах і масі забезпечують значно вищу чутливість за магнітним полем, ніж інтегральні давачі типу ЗД і МД.

2. На основі давачів ФІД і ТРД можна створити первинні перетворювачі для багатокомпонентної і багатоканальної реєстрації магнітного поля збурень над дефектами залізничних рейок.



Рис. 10. Лабораторний діагностичний візок на рейці з трьома взаємоортогональними локальними давачами ФІД

**Висновки.** Метою даної роботи було продемонструвати, що за відповідного підходу до проектування, навіть за значних обмежень на такий важливий параметр ІД, як геометричні розміри, вдається отримати достатньо високу чутливість для вирішення поставленого завдання.

У випадку космічного давача, що має найменші з відомих у світі розміри, було досягнуто рівня шумів, який дав змогу його використати у шведському ракетному експерименті SQUID.

Стосовно ІД для рейкової дефектоскопії показано можливість реалізації інтегральних давачів зі значно більшою чутливістю, ніж ті, що зараз використовуються в наявних вагонах-дефектоскопах.

Водночас для багатокомпонентної і багатоканальної рейкової дефектоскопії залізничних рейок запропоновано локальні і точкові ІД, які за обмежених масі і габаритах забезпечують значно вищу чутливість, ніж інтегральні давачі.

1. Мизюк Л.Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей. – К.: Наук. думка, 1964. – 166 с. 2. Проненко В., Корепанов В. Особливості проектування індукційних магнітометрів // Геофизический журнал. – 2011. – № 4. – С. 127 – 133. 3. Ничога В.А. Измерение весьма слабых низкочастотных магнитных полей в геофизических и космических исследованиях // Отбор и передача информации. – 1993. – Вып.9. – С.70–77. 4. V.Nichoga, P.Dub, L.Sopilnyk, G.Trokhym, E.Grudzinski. Usage of Information-Measuring System "Kaskad" for Diagnostics of Electromagnetic radiation of Some Objects // Proceedings of International Conference on Modern of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2004), pp.536-539, Lviv-Slavsko, Ukraine, February 24-28, 2004. 5. Нічога В.О. Тенденції розвитку та побудови давачів магнітних і механічний величин сучасних інформаційно-вимірювальних систем // Відбір і обробка інформації. – 2001. – Вип. 15(91). – С.112–122. 6. Nichoga V., Dub P. Measuring Sensors for Investigation of Magnetic Field on the Board of Space Apparatuses // Proceedings of the Fourteenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, pp.220-223, Wroclaw, Poland, June 23-25, 1998. 7. Vitalij Nichoga, Eugeniusz Grudziński, Petro Dub, Vira Pronenko Superwide Band Low-Noise Induction Sensors in Magnetic Field Measurements // Proceedings of the 9th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2008), 19-23 February 2008, Lviv-Slavsko, Ukraine, p. 18–21. 8. Hiyora B.O., Дуб П.Б., Проненко В.О. Сучасні низькопорогові інфранизькочастотні індукційні давачі для вимірювання надслабких магнітних полів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2008. – Вип. 618. – С. 37–46. 9. Eugeniusz Grudziński, Vitalij Nichoga, Ivan Prudyus Diagnostowanie i monitoring struktur promienujących pod

katem zagróżeń stwarzanych dla aparatury i ludzie // VI Krajowa Koferencja "Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów" (Diag'2006). Ustroń. Polska. 17–20 października 2006 r. Referaty. S. 75–76. 10. В.О. Нічога, П. Б. Дуб, В.М. Іванчук Сучасний стан методів та апаратури для швидкісної технічної діагностики залізничної колії електромагнітними методами // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія). Випуск 12: Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Зб. наук праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2007. – С. 3–15. 11. Храмов Д.А. Миниатюрные спутники стандарта "Cubesat" Космічна наука і технологія. – 2009. Т. 15. № 3. – С. 20–31. 12. Мизюк Л.Я., Ничога В.А. Электрические параметры индукционных низкочастотных магнитоприемников с ферромагнитными сердечниками // Геофизическое приборостроение. – Вып.20. – Л., 1964. – С.37– 61.13. Nichoga V., Dub P., Kaczmarek Z. Hollow ellipsoid of rotation as a physical model of tubular cylindrical ferromagnetic core. J. of Tech. Phys., 42, 4, 449-458, 2001. 14. Coillot C., Montoussamy J., Leroy P., Chanteur G., and Roux A., "Improvements on the design of search coil magnetometer for space experiments", Sensors Letters, 2007, vol. 5, pp. 167-170. 15. Cao J. B., Liu Z. X. et al. First results of low frequency electromagnetic wave detector of TC-2/Double Star program. Annales Geophysicae, 23, 2803– 2811, 2005 Sref-ID: 1432-0576/ag/2005-23-2803. 16. Roux A., Le Contel O., Robert P., Coillot C., Bouabdellah A., La Porte B., Alison D., Ruocco S., Vassal M.C. The Search Coil Magnetometer for THEMIS. Space Sci Rev (2008) 141: 265–275 DOI 10.1007/s11214-008-9455-8.17. Coillot C., Moutoussamy J., Lebourgeois R., Ruocco S., and Chanteur G. Principle and Performance of a Dual-Band Search Coil Magnetometer: A New Instrument to Investigate Fluctuating Magnetic Fields in Space. IEEE Sens. J., Vol. 10, No. 2, 255 – 260, Feb. 2010. 18. Toliyat H.A., Abbaszadeh K., Rahimian M.M., Olson L.E. Rail Defect Diagnosis Using Wavelet Packet Decomposition // IEEE Transactions of industry applications. – 2003. – Vol. 39, No. 5, September/October. – P. 1454-1461. 19. Thin-skin electromagnetic fields in the neighbourhood of surface breaking cracks in metals / D. H. Michael, A. M. Lewis, M. McIver, and R. Collins // Proc. R. Soc. London, Ser. A 434, 587 (1991). 20. R.K. Amineh, M. Ravan, S.H. Hesam Sadeghi, R. Moini Using AC field measurement data at an arbitrary liftoff distance to size long surfacebreaking cracks in ferrous metals // NDT&E International 41. – 2008. – P. 169-177.