



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 82496

(13) C2

(51) МПК (2006)

G01R 33/06

H01L 43/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ КВАЗІСТАЦІОНАРНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

1

(21) a200506331

(22) 29.06.2005

(24) 25.04.2008

(46) 25.04.2008, Бюл. № 8, 2008 р.

(72) БОЛЬШАКОВА ІНЕСА АНТОНІВНА, UA,
ГОЛЯКА РОМАН ЛЮБОМИРОВИЧ, UA,
ГЕРАСІМОВ СЕРГЕЙ НІКОЛАЄВИЧ(73) БОЛЬШАКОВА ІНЕСА АНТОНІВНА, UA,
ГОЛЯКА РОМАН ЛЮБОМИРОВИЧ, UA

(56) SU 125903, 06.04.1959

SU 166507, 25.01.1965

SU 440620, 11.02.1975

UA 21185, 04.11.1997

(57) 1. Спосіб вимірювання квазістаціонарного магнітного поля, який включає вимірювання вихідної напруги гальваноманітного перетворювача та наступний розрахунок індукції вимірюваного магнітного поля за виміряним значенням вихідної напруги та наперед відомою чутливістю гальваноманітного перетворювача, яку визначають шляхом періодичного калібрування гальваноманітного перетворювача через встановлення співвідношення між зміною магнітного поля та відповідною зміною вихідної

2

напруги гальваноманітного перетворювача, який **відрізняється** тим, що калібрування проводять безпосередньо в процесі вимірювання магнітного поля, а зміною магнітного поля, яку використовують для калібрування перетворювача, є зміна самого вимірюваного магнітного поля, причому калібрування здійснюють лише тоді, коли зміна вимірюваного магнітного поля за наперед визначений проміжок часу перевищує наперед задану величину.

2. Спосіб за п.1, який **відрізняється** тим, що зміну вимірюваного магнітного поля в процесі калібрування вимірюють індуктивним перетворювачем поля.

3. Спосіб за пп.1,2, який **відрізняється** тим, що величину зміни вимірюваного магнітного поля визначають шляхом інтегрування виміряної вихідної напруги індуктивного перетворювача ~~до~~ **Спосіб за пп.1,2,3, який відрізняється** тим, що індуктивний перетворювач поля містить котушку.

5. Спосіб за пп.1,2,3,4, який **відрізняється** тим, що гальваноманітний перетворювач поля розміщують всередині котушки індуктивного перетворювача поля.

Винахід стосується вимірювальної техніки, а саме способів вимірювання магнітного поля, які базуються на індуктивних та гальваноманітних вимірювальних перетворювачах і може бути застосований, зокрема, для вимірювання магнітних полів в реакторах термоядерного синтезу.

Відомий спосіб вимірювання змінного в часі магнітного поля, який базується на вимірюванні інтегралу напруги на вимірювальній котушці та подальшого розрахунку зміни індукції магнітного поля [Green M.I. Search coils.//CAS. Measurement and alignment of accelerator and detector magnets. Geneva. 1998. P.163, Fig.19.]. Магнітний потік через котушку, який є інформативним параметром зміни вимірюваного магнітного поля, обумовлює формування на виводах вимірювальної котушки електрорушійної сили (напруги). Ця напруга

інтегрується на протязі певного відрізка часу інтегратором, сигнал якого є результатом вимірювання зміни магнітного поля за час інтегрування.

Недоліком такого способу вимірювання є неможливість довготривалого вимірювання магнітних полів, і, зокрема, квазістаціонарних магнітних полів чи імпульсних магнітних полів зі значними тривалостями імпульсів тощо. Причиною цього є, по-перше, неможливість визначити початкове значення магнітного поля, яке мало місце на початку інтегрування, по-друге, низька точність функціонування інтегратора при великій тривалості процесу інтегрування та малих змінах напруги на вимірювальній котушці.

Відомий спосіб вимірювання магнітного поля, який базується на вимірюванні вихідної напруги гальваноманітного перетворювача, зокрема

(13) C2

(11) 82496

(19) UA

напівпровідникового перетворювача Холла, та, подальшому розрахунку індукції магнітного поля з використанням наперед відомої величини чутливості перетворювача, [Popovic R.S. Hall effect devices: magnetic sensor and characterization of semiconductors. IOP Publishing Ltd. 1991. P.188. Fig.4.22.]. Приклавши відповідним чином до гальваноманітного перетворювача напругу (струм) живлення, в ньому створюють потік носіїв заряду. Під дією сили Лоренца на рухомі носії заряду в гальваноманітному перетворювачі виникає: сигнал, наприклад різниця напруг на вихідних виводах перетворювача Холла. Ця напруга є інформативним сигналом процесу вимірювання магнітного поля. Коефіцієнт перерахунку вимірної напруги в індукцію магнітного поля є наперед відомим та незмінним.

На відміну від способу вимірювання магнітного поля на основі котушок [Green M.I. Search coils.//CAS. Measurement and alignment of accelerator and detector magnets. Geneva. 1998. P.163, Fig.19.], вищевказаний спосіб [Popovic R.S. Hall effect devices: magnetic sensor and characterization of semiconductors. IOP Publishing Ltd. 1991. P.188. Fig.4.22.] на основі гальваноманітного перетворювача забезпечує вимірювання дійсної величини магнітного поля, а не його зміни в часі. Тому, останній не має жодних обмежень щодо довготривалих вимірювань постійних та квазістаціонарних магнітних полів. Однак, його недоліком є низька точність вимірювання магнітного поля в жорстких умовах експлуатації, зокрема, в умовах високої проникаючої радіації. Причиною цього є зміна електрофізичних параметрів гальваноманітних перетворювачів в умовах проникаючої радіації, зокрема, зміна чутливості гальваноманітних перетворювачів при довготривалій дії на них

Відомий спосіб вимірювання магнітного поля, який базується на вимірюванні вихідної напруги гальваноманітного перетворювача та розрахунку індукції вимірюваного магнітного поля з використанням значення вищевказаної напруги та чутливості вищевказаного перетворювача, причому чутливість перетворювача визначається в процесі його періодичного калібрування за допомогою тестового магнітного поля. Таке калібрування проводиться in-situ, тобто, безпосередньо всередині об'єкту, де розміщено вимірювальний зонд. Тестове магнітне поле формується котушкою, в якій знаходиться гальваноманітний перетворювач. Котушка та відповідним чином розміщений в ній гальваноманітний перетворювач утворюють єдину конструкцію - функціонально інтегрований зонд. Величина тестового магнітного поля, яка визначається струмом живлення котушки і вважається відомою, та виміряне значення вихідної напруги гальваноманітного перетворювача, яке обумовлене тестовим магнітним полем, є інформативними величинами в процесі розрахунку чутливості гальваноманітного перетворювача [Bolshakova I., Holyaka R., Leroy C. Novel approaches towards the development of Hall sensor-based magnetometric devices for charged

particle accelerators//IEEE Transactions on Applied Superconductivity. - 2002. - Vol.12, №1. - P.1655-1658.].

Перевагою вказаного способу вимірювання [Bolshakova I., Holyaka R., Leroy C. Novel approaches towards the development of Hall sensor-based magnetometric devices for charged particle accelerators//IEEE Transactions on Applied Superconductivity. - 2002. - Vol.12, №1. - P.1655-1658.] є можливість періодичного калібрування, і тим самим, забезпечення компенсації зміни чутливості гальваноманітного перетворювача в умовах довготривалої дії на нього проникаючої радіації. Принципово важливим є те, що в процесі періодичного калібрування немає необхідності виймати зонд з об'єкту, де проводиться вимірювання магнітного поля. Ця перевага має принципово важливе значення при вимірюванні магнітного поля в радіаційних умовах експлуатації, зокрема в реакторах чи прискорювачах заряджених частинок. Під дією високої радіації має місце дрейф параметрів гальваноманітних перетворювачів, тому є необхідним їх періодичне калібрування. Таке калібрування необхідно

Недоліком вищевказаного способу [Bolshakova I., Holyaka R., Leroy C. Novel approaches towards the development of Hall sensor-based magnetometric devices for charged particle accelerators//IEEE Transactions on Applied Superconductivity. - 2002. - Vol.12, №1. - P.1655-1658.] є низька точність періодичного in-situ калібрування. Це обумовлено низькою стабільністю параметрів котушки, яка формує тестове магнітне поле. Для формування необхідної величини тестового магнітного поля (декілька міліТесла) котушка повинна мати якомога менший діаметр (декілька міліметрів) та якомога більшу кількість витків (декілька сотень). Крім того, через котушку необхідно пропустити значний струм (десятки-сотні міліампер), який призводить до розігріву котушки. Тому такі багатовиткові малогабаритні котушки при значних величинах струму в них, і в першу чергу міжвиткова ізоляція, не мають достатньої надійності. Особливо така ненадійність спостерігається при експлуатації котушок при високій температурі у вакуумі, де, по-перше, нема достатнього тепловідведення, а по-друге, виникають проблеми з газовиділенням з

В основу винаходу поставлено задачу вдосконалити відомий спосіб вимірювання квазістаціонарного магнітного поля для підвищення точності вимірювання та надійності функціонування вимірюваного пристрою при його тривалій експлуатації в жорстких умовах високої проникаючої радіації, обмеженого тепловідведення та обмеженого доступу за рахунок періодичного калібрування гальваноманітного перетворювача безпосередньо в процесі вимірювань з використанням для такого калібрування

Поставлена задача розв'язуються тим, що в способі вимірювання квазістаціонарного магнітного поля, який включає вимірювання вихідної напруги гальваноманітного перетворювача та наступний розрахунок індукції

вимірюваного магнітного поля з використанням значення вимірної вихідної напруги та наперед відомої чутливості гальваноманітного перетворювача, яку визначають шляхом його періодичного калібрування через встановлення співвідношення між зміною магнітного поля та відповідною зміною вихідної напруги гальваноманітного перетворювача, для калібрування гальваноманітного перетворювача використовують зміну самого вимірюваного магнітного поля, яку вимірюють індуктивним перетворювачем поля, причому калібрування здійснюють лише тоді, коли зміна вимірюваного магнітного поля за деякий наперед визначений проміжок часу перевищує наперед задану величину.

Запропонований спосіб вимірювання квазістаціонарного магнітного поля далі докладно пояснюється використанням наступних фігур

На Фіг.1 зображено часові залежності індукції магнітного поля, вихідної напруги індуктивного перетворювача поля.

На Фіг.2 зображено функцію перетворення гальваноманітного перетворювача в лінійній апроксимації.

На Фіг.3 зображено блок-схему пристрою, який реалізує запропонований спосіб вимірювання квазістаціонарного магнітного поля.

На Фіг.4 зображено розміщення гальваноманітного перетворювача 1 в котушці 2 індуктивного перетворювача поля.

На Фіг.5 зображено структурну схему часового дискримінатора.

Вимірювання квазістаціонарного магнітного поля відповідно до винаходу здійснюється вимірним пристроєм на основі гальваноманітного перетворювача 1. Приклад часової залежності індукції B вимірюваного квазістаціонарного магнітного поля наведено на верхній епюрі Фіг.1, де показано зміни індукції ΔB_0 вимірюваного квазістаціонарного магнітного поля, яким відповідають часові інтервали $\Delta t = t_2 - t_1$, при зростанні та при спаданні індукції магнітного поля B . За винаходом саме ці зміни індукції ΔB_0 вимірюваного квазістаціонарного магнітного поля використовують для калібрування вимірювального пристрою на основі гальваноманітного перетворювача безпосередньо в процесі

Калібрування вимірювального пристрою на основі гальваноманітного перетворювача включає визначення коефіцієнту K_B , який визначає чутливість перетворювача і зв'язує його вихідну напругу V_H з індукцією магнітного поля B , за формулою

$$V_H = K_B \cdot B \quad (1)$$

Функцію перетворення гальваноманітного перетворювача при її лінійній апроксимації показано на Фіг.2. Коефіцієнт K_B знаходять за формулою

$$K_B = \frac{\Delta V_0}{\Delta B_0} \quad (2)$$

де $\Delta V_0 = V_H(t_2) - V_H(t_1)$ - різниця вихідних напруг $V_H(t_1)$, $V_H(t_2)$ вимірювального пристрою на основі гальваноманітного перетворювача на границях часового інтервалу $\Delta t = t_2 - t_1$. Використовуючи

визначений в такий спосіб коефіцієнт K_B і користуючись формулою (1) за виміряним значенням вихідної напруги ΔV_{Hx} розраховують індукцію магнітного поля B_M для будь-якого моменту часу t (див. Фіг.2).

За винаходом зміну індукції ΔB_0 вимірюваного квазістаціонарного магнітного поля вимірюють індуктивним датчиком магнітного поля, який звичайно включає котушку 2 розміщену у вимірюваному магнітному полі.

Напруга V_{COIL} на виводах котушки 2 є пропорційною ефективній площі A її витків та швидкості зміни перпендикулярної до площі A складової вектора індукції магнітного поля B

$$V_{COIL} = K_C \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

де K_C - коефіцієнт пропорційності.

За винаходом величину зміни індукції вимірюваного магнітного поля визначають шляхом інтегрування вимірної вихідної напруги індуктивного перетворювача поля відповідно до

$$V_{out} = K_C \cdot \frac{A}{\tau} \Delta B \quad (4)$$

де τ - постійна часу інтегрування.

Оскільки для калібрування гальваноманітного перетворювача 1 необхідно визначати величину зміни індукції вимірюваного магнітного поля ΔB саме в області розташування гальваноманітного перетворювача 1 його розміщують всередині котушки 2 індуктивного перетворювача поля.

Запропонований спосіб вимірювання квазістаціонарного магнітного поля може бути реалізований в пристрої для вимірювання квазістаціонарного магнітного поля, блок-схему якого зображено на Фіг.3. Цей пристрій містить гальваноманітний перетворювач 1 виконаний як перетворювач Холла, котушку 2 індуктивного перетворювача магнітного поля, драйвер 3, який під'єднано до гальваноманітного перетворювача 1 і який забезпечує його функціонування, часовий дискримінатор 4, який під'єднано до котушки 2 і який визначає часові інтервали, в яких зміна магнітного поля досягнула наперед заданого значення, оперативну пам'ять 5, яка керується часовим дискримінатором 4 і зберігає результати вимірювання вихідної напруги драйвера 3, та коректор 6, який керується часовим дискримінатором 4 і забезпечує періодичне калібрування пристрою відповідно до запропонованого способу.

Конструктивно гальваноманітний перетворювач 1 розміщено всередині котушки 2 індуктивного перетворювача магнітного поля (Фіг.4), причому вісь чутливості гальваноманітного перетворювача 1 (зокрема, нормаль N до площини перетворювача Холла) співпадає з віссю котушки 2. Таким чином, забезпечується вимірювання змін індукції магнітного поля індуктивним перетворювачем в тій самій ділянці поля, в якій здійснюється

В зоні вимірювання магнітного поля з екстремальними умовами експлуатації знаходяться лише гальваноманітний перетворювач 1 та котушка 2 індуктивного перетворювача магнітного поля, а інші елементи

пристрою для вимірювання магнітного поля знаходяться поза зоною з екстремальними умовами експлуатації, що практично виключає вплив на них дестабілізуючих факторів, що діють в зоні з екстремальними умовами експлуатації.

Вимірювання магнітного поля здійснюється гальваномagnetним перетворювачем 1 (перетворювачем Холла). Драйвер 3 забезпечує формування сигналу гальваномagnetного перетворювача і включає стабілізатор струму живлення гальваномagnetного перетворювача, підсилювач та аналого-цифровий перетворювач.

Для спрощення викладу використаємо лінійну апроксимацію функції перетворення пристрою вимірювання магнітного поля з перетворювачем Холла в якості гальваномagnetного перетворювача. Тоді вихідна напруга драйвера V_H може бути подана у вигляді

$$V_H = K_H \cdot K_A \cdot I_H \cdot B \quad (5)$$

де K_H - магнітна чутливість перетворювача Холла; K_A - коефіцієнт перетворення сигналу драйвером; I_H - струм живлення перетворювача Холла; B - перпендикулярна до площини перетворювача Холла складова вектора індукції магнітного поля.

В процесі тривалої експлуатації пристрою вимірювання магнітного поля в екстремальних умовах експлуатації магнітна чутливість K_H гальваномagnetного перетворювача зазнає змін, що призводить до виникнення похибки вимірювання. В загальному випадку джерелами нестабільності також можуть бути коефіцієнт перетворення K_A та струм живлення I_H . Тому калібрування гальваномagnetного перетворювача включає визначення єдиного коефіцієнту K_B , який зв'язує вихідну напругу V_H вимірювального пристрою з індукцією магнітного поля відповідно

Часовий дискримінатор 4 визначає часові інтервали, на границях яких зміна магнітного поля, виміряна з допомогою котушки 2, досягає заданого значення ΔB_0 . Згідно винаходу на вхід часового дискримінатора 4 надходить напруга V_{COIL} з котушки 2 індуктивного перетворювача магнітного поля, а вихід часового дискримінатора 4 керує роботою оперативної пам'яті 5 та коректора 6 цього пристрою.

Варіант структурної схеми часового дискримінатора 4 та його зв'язки з іншими елементами пристрою наведено на Фіг.5. Такий часовий дискримінатор містить інтегратор (операційний підсилювач ОА1, резистор R , конденсатор C та ключ SW), два компаратори (операційні підсилювачі ОА2, ОА33),

Напруга V_{OUT} на виході інтегратора визначається формулою (4), в якій $\tau = RC$ - постійна часу інтегратора.

Отже котушка 2 індуктивного перетворювача магнітного поля та інтегратор забезпечують вимірювання зміни індукції магнітного поля, результат якого практично не залежить від дестабілізуючих факторів, зокрема від високого рівня проникаючої радіації та температури. Необхідно відзначити, що можлива зміна електрофізичних параметрів дроту котушки 2 ніяким чином не впливає на сигнал. Відповідно до

формули (3) сигнал, що знімається з котушки 2 визначається не електрофізичними параметрами дроту, а лише ефективною площею її витків A , яка не змінюється під дією радіації.

Роботу часового дискримінатора демонструють часові епюри (Фіг.1), на яких показано часову зміну індукції магнітного поля $B(t)$, вихідну напругу інтегратора $V_{OUT}(t)$ та імпульси керування S_1, S_2, S_3 . Таймер ТМ (Фіг.5) формує послідовність синхронізуючих імпульсів $S_1(t)$, тривалість та період слідування яких є фіксованими $P_1 = P_2 = P_3 = \text{const}$. Синхронізуючі імпульси $S_1(t)$ періодично замикають ключ SW , що обнулює напругу на виході інтегратора, $V_{OUT}(t_1) = 0$. Відразу по завершенню кожного синхронізуючого імпульсу (t_1) розпочинається процес періодичного інтегрування (вимірювання магнітного поля) та формується передній фронт імпульсу $S_2(t)$ керування оперативною пам'яттю. Цей імпульс виконує функцію команди, яка вибирає та заносить в оперативну пам'ять 5 вихідний сигнал $V_H(t_1)$ драйвера 3 гальваномagnetного перетворювача 1. Переважно, цей сигнал вже сформовано в цифровому виді аналого-цифровим перетворювачем цього драйвера. Таким чином, в пам'ять 5 заноситься напруга $V_H(t)$, яка є інформативною величиною виміряної за допомогою гальваномagnetного перетворювача 1

Подальша робота часового дискримінатора залежить від швидкості зміни магнітного поля $B(t)$. У випадку достатньо високої швидкої зміни магнітного поля, напруга на виході інтегратора V_{OUT} перевищить одне з опорних значень $+V_0$ (для прикладу, перший період P_1 на Фіг.1) або $-V_0$ (третій період P_3 на Фіг.1) ще до початку наступного синхронізуючого імпульсу. Ці опорні значення напруги визначають порогові значення зміни магнітного поля ΔB_0 . В момент часу t_2 , коли має місце рівність вихідної напруги інтегратора одній з опорних напруг $V_{OUT} = \pm V_0$, формується спад імпульсу $S_2(t)$ та фронт імпульсу $S_3(t)$ керування коректора 6 (Фіг.1). В цей час вимірюється і заноситься в оперативну пам'ять вихідний сигнал $V_H(t_2)$ драйвера гальваномagnetного

У протилежному випадку, коли до завершення періоду (для прикладу, другий період P_2) зміна магнітного поля не перевищить порогового значення ΔB_0 , синхронізуючий імпульс $S_1(t)$ наступного періоду обнулить інтегратор. Як наслідок цього, імпульс $S_3(t)$ не буде сформовано. Таким чином, при незначній зміні магнітного поля, коли точність функціонування інтегратора є низькою, корекція функції перетворення пристрою вимірювання магнітного поля згідно винаходу не

Коректор 6 (Фіг.3) розраховує коефіцієнт K_B , який зв'язує визначений часовим дискримінатором часовий інтервал $\Delta t = t_2 - t_1$, в якому відбулася зміна магнітного поля ΔB_0 , з вихідними напругами $V_H(t_1)$, $V_H(t_2)$ драйвера гальваномagnetного перетворювача на границях цього часового інтервалу за формулою

$$K_B = \frac{V_H(t_2) - V_H(t_1)}{\Delta B_0} \quad (6)$$

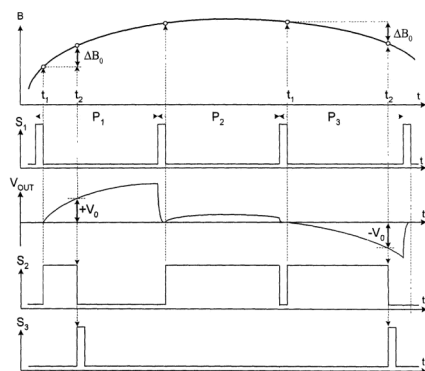
Беручи до уваги вираз (4) та те, що за час Δt зміна магнітного поля становить ΔB_0 , коефіцієнт K_B визначається як

$$K_B = K_C \cdot \frac{A}{\tau} \cdot \frac{V_H(t_2) - V_H(t_1)}{V_0} \quad (7)$$

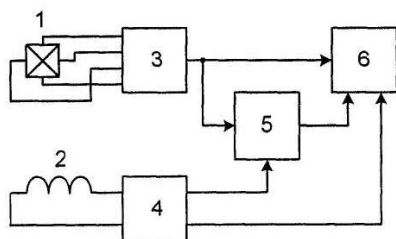
де V_0 - значення опорної напруги схеми часового дискримінатора.

В подальшому, вимірюючи в будь який момент часу величину напруги V_{HM} драйвера гальваноманітного перетворювача, та використовуючи коефіцієнт K_B , проводять розрахунок індукції магнітного поля B_M . Зокрема, при лінійній апроксимації функції перетворення (Фіг.2) результатом вимірювання індукції магнітного поля пристрою згідно винаходу буде значення індукції

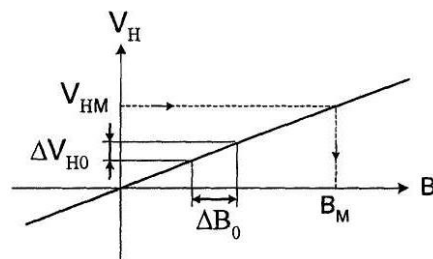
$$B_M = \frac{V_{HM}}{K_B} \quad (8)$$



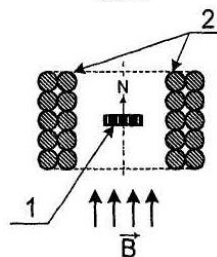
Фіг. 1



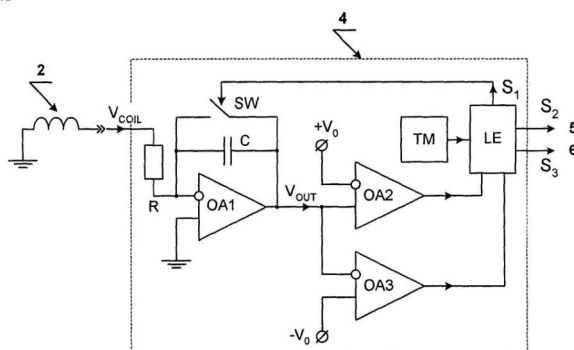
Фіг. 3



Фіг. 2



Фіг. 4



Фіг. 5

При кусково-лінійній апроксимації функції перетворення пристрою вимірювання магнітного поля коефіцієнт K_{Bj} визначають для кожної ділянки j функції перетворення. При апроксимації функції перетворення поліномами для розрахунку використовують систему рівнянь, в якій, зокрема, залежність коефіцієнту $K_B(B)$ представляється як перша похідна dV_H/dB .

Запропонований спосіб дозволяє підвищити точність вимірювання квазістаціонарного магнітного поля (похибка вимірювання з врахуванням in-situ калібрування не перевищує 0.1%) та надійність безперервного на протязі декількох років функціонування в тривалих жорстких умовах експлуатації, зокрема, в умовах високої проникаючої радіації та температури.

