

З.Ю. ГОТРА, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЕП НУ "ЛП" (м. Львів),
Р.Л. ГОЛЯКА, д-р техн. наук, проф. каф. ЕП НУ "ЛП" (м. Львів),
Т.А. МАРУСЕНКОВА, аспірант каф. ЕП НУ "ЛП" (м. Львів)

МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РОЗЩЕПЛЕНИХ ХОЛЛІВСЬКИХ СТРУКТУРАХ

Розглянуто проблему калібрування магнітних сенсорів на основі розщеплених холлівських структур. З використанням методу Монте-Карло розроблено метод та програмні коди для оптимізації процедури калібрування магнітного сенсора, що здійснюється за допомогою поворотного механізму. Визначені критерії оцінки очікуваних похибок польової характеристики сенсорів та оптимальної кількості вимірювань. Лл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: калібрування, магнітні сенсори, розщеплені холлівські структури, поворотний механізм.

Постановка проблеми. В значній мірі прецизійність функціонування магнітовимірювальної апаратури визначається методологією калібрування сенсорів. Особливої актуальності набувають питання калібрування 3D сенсорів магнітного поля, які характеризуються значною кількістю параметрів, зокрема, коефіцієнтами поліномів польової характеристики. Тому процес створення магнітовимірювальної апаратури на розщеплених холлівських структурах (РХС) потребує подальшого розвитку методології калібрування.

Пристрої калібрування РХС базуються на механізмах обертання, які забезпечують можливість вимірювання вихідних сигналів при певній послідовності кутів нахилу площини сенсора в однорідному магнітному полі. При обертанні змінюються проекції вектора магнітного поля на осі системи координат, пов'язаної з сенсором, а відтак змінюється і холлівська напруга, що є інформативним сигналом індукції вимірюваного магнітного поля. Очевидно, що орієнтація сенсора у магнітному полі не може бути абсолютно точною і навіть найбільш прецизійні поворотні механізми не забезпечують необхідної для високоточної магнітовимірювальної апаратури точності кутової орієнтації. Додаткові труднощі при оцінці якості виконаної процедури калібрування кутових РХС спричинені складним характером залежності їхньої польової характеристики від кутів обертання. Якщо похибки кутів обертання є випадковими, то точність знаходження коефіцієнтів польової характеристики залежить від кількості проведених вимірювань. Тому для пошуку коефіцієнтів польової характеристики магнітного сенсора необхідно скласти перевизначену систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР). Отже, процедура калібрування не є жорстко встановленою, а має підлягати модифікації в залежності від вимог точності, що висуваються до магнітного сенсора. Тому є необхідність у розробленні методу та відповідного програмного забезпечення для пошуку оптимальної кількості вимірювань, при якій забезпечується бажана точність.

Аналіз літератури. У [1, 2] розглянуто фізичні принципи роботи сенсора Холла та проаналізовано залежність вихідного сигналу традиційного сенсора Холла від компонент вектора магнітної індукції. Польова характеристика традиційних сенсорів Холла може бути адекватно описана поліномом другого степеня (а подекуди – лінійною функцією), що залежить лише від компоненти вектора магнітної індукції, перпендикулярної до площини сенсора. У [3 – 6] представлено кутову РХС, яка характерна тим, що її чутлива область зосереджена у кутовій ділянці підкладки, обґрунтовано актуальність РХС, а також детально пояснено, що польова характеристика РХС має враховувати вплив всіх компонент вектора магнітної індукції на вихідний сигнал, при цьому вихідний сигнал залежить як від самих компонент вектора магнітної індукції, так і від їхніх квадратів. У [7, 8] подано спосіб калібрування магнітних сенсорів, щоправда, з простішою польовою характеристикою, ніж в аналізованих у даній роботі РХС. У публікаціях [7, 8] представлено математичний апарат, частково врахований при написанні даної роботи.

Мета статті – розробка методу та програмного забезпечення для оптимізації процедури калібрування магнітних сенсорів на основі РХС.

Математична модель процесу калібрування. Польова характеристика кутової РХС з урахуванням того факту, що площина чутливого елемента може виявитися розсміщеною з площиною підкладки, шукається у вигляді:

$$c_{11}B_x + c_{12}B_y + c_{13}B_z + c_{21}B_x^2 + c_{22}B_y^2 + c_{23}B_z^2 + c_{31}B_xB_y + c_{32}B_xB_z + c_{33}B_yB_z = S - c_0, \quad (1)$$

де B_x , B_y , B_z – проекції вектора магнітної індукції на осі координат, які пов'язані з кутовою РХС; S – вихідний сигнал, c_0 – коефіцієнт, що вказує на напругу нееквіпотенційності. Оскільки коефіцієнт c_0 не залежить від магнітного поля, його доцільно визначити окремо у магнітному екрані при $B = 0$. Коефіцієнти

$$c_{ij}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad j = \overline{1, 3} \quad (2)$$

є невідомими; калібрування кутової РХС зводиться до їх відшукування. Якщо калібрування здійснюється в однорідному магнітному полі з модулем вектора магнітної індукції B , то проекції вектора магнітної індукції B_x , B_y , B_z визначаються з таких залежностей:

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = B \begin{pmatrix} \sin A_z \sin A_x - \cos A_z \sin A_y \cos A_x \\ \cos A_z \sin A_x + \sin A_z \sin A_y \cos A_x \\ \cos A_y \cos A_x \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де A_x , A_y , A_z – кути обертання навколо осей x , y , z відповідно.

Для знаходження коефіцієнтів (2) необхідно скласти СЛАР з рівнянь вигляду (1), що з міркувань мінімізації похибок повинна бути перевизначеною.

Оцінка похибок обчислення коефіцієнтів польової характеристики.

Для оцінки точності обчислення коефіцієнтів польової характеристики доцільно користуватися відношенням середньої похибки коефіцієнта до його абсолютного значення. Оперування саме середньою похибкою замість модуля максимального ("найгіршого") відхилення обчислених значень коефіцієнтів від їхніх номінальних значень виправдовується принаймні двома факторами. По-перше, враховуючи досить складну залежність польової характеристики (1) каліброваного сенсора від кутів обертання, важко визначити, при яких саме похибках кутів обертання похибки обчислення коефіцієнтів є "найгіршими". По-друге, "найгірші" похибки коефіцієнтів (2) є явно завищеними, а тому вони не можуть адекватно характеризувати точність обчислення коефіцієнтів.

Найбільш вірогідну оцінку похибок коефіцієнтів (2) можна отримати за допомогою методу Монте-Карло, що завдяки простоті його програмної реалізації та рівню розвитку сучасної обчислювальної техніки дозволяє за короткий час без жодних фізичних вимірювань провести потрібну кількість "віртуальних експериментів" та змодельовати очікувані похибки.

Фактичний кут обертання сенсора є сумою зумисне встановленого кута та деякої невідомої похибки ρ . Нехай встановлення довільного кута обертання поворотного механізму характеризується похибкою $\pm m^\circ$, розподіленою за гаусівським законом. Тоді, оскільки за правилом "трьох сигм" в окремо взятому досліді значення похибки кута обертання з ймовірністю 0.997 не перевищуватиме 3σ , то параметри нормального розподілу похибки ρ є такими: $a = M\rho = 0$; $\sigma = m/3$.

Нехай для знаходження коефіцієнтів (2) використовується СЛАР з рівнянь вигляду (1), для якої вже вибрано деяку початкову кількість рівнянь n та набори кутів обертання, застосовуваних у цих рівняннях. Тоді спосіб застосування методу Монте-Карло для оцінки похибок обчислення коефіцієнтів (2) є наступним. Слід за допомогою генератора псевдовипадкових чисел згенерувати стільки похибок із зазначеними вище властивостями, скільки кутів обертання використовується для знаходження коефіцієнтів (2). Змодельовані у такий спосіб значення похибок необхідно додати до застосовуваних у СЛАР вигляду (1) кутів обертання без похибок. Далі, в результаті розв'язання СЛАР вигляду (1), сформованої з урахуванням згенерованих похибок, обчислюємо шукані коефіцієнти. Процедура генерування похибок та розв'язання СЛАР вигляду (1) повторюємо деяку кількість разів N , внаслідок чого отримуємо масив з N розв'язків. Якщо число N є розумно великим, щоб можна було говорити про статистичну обробку одержаних N різних значень кожного з коефіцієнтів (2), то дисперсія кожного з дев'яти коефіцієнтів дасть підставу для оцінки його середньої похибки. Дисперсія випадкової величини ξ виражається формулою:

$$D\xi = M\left[(\xi - M\xi)^2\right] \approx \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^N (\xi_j)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{j=1}^N \xi_j \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Дисперсія є математичним сподіванням квадрата відхилення випадкової величини від її середнього значення. Корені квадратні з порахованих дисперсій власне і є середніми похибками коефіцієнтів (2).

Обчислені похибки коефіцієнтів (2) при вибраних кількості n рівнянь у СЛАР (1) та наборах кутів обертання слід порівняти із відповідними заданими максимально допустимими похибками. Якщо хоча б одна з обчислених похибок перевищує відповідну максимально допустиму похибку, потрібно збільшити початкову кількість рівнянь на заданий крок і повторювати описану вище процедуру доти, поки всі похибки обчислення коефіцієнтів (2) не перестануть перевищувати відповідні їм максимально допустимі похибки.

Математично доведено, що відносні похибки коефіцієнтів (2) не залежать від самих значень цих коефіцієнтів. Це дозволяє розробити програмний код, що обчислює відносні похибки для деяких ненульових еталонних коефіцієнтів, і вважати знайдені відносні похибки чинними для будь-якої кутової РХС.

В ході багатократного виконання розроблених програмних кодів було встановлено, що зі зростанням числа проведених вимірювань залежність точності розв'язку від вибраних кутів обертання зменшується. Виявлено, що кути можна навіть генерувати випадковим чином, але так, щоб вони підлягали рівномірному розподілу, оскільки інакше підвищується ймовірність генерації однакових наборів кутів, а отже, і однакових рівнянь у СЛАР, що не несуть ніякої додаткової інформації. При генерації кутів обертання слід враховувати обмеження, продиктовані недоліками поворотного пристрою.

Результати виконання програмних кодів. На основі викладеного підходу реалізовано програмні коди для виконання у пакеті MATLAB.

У всіх програмних кодах взято кількість "виртуальних експериментів" $N = 2000$. Вибране число N є достатнім, щоб вважати статистичну обробку достовірною, оскільки, як це впливає з ряду проведених трансляцій розробленого програмного коду, вже починаючи від $N = 1500$ подальше зростання числа N не впливає на результат.

Програмний код, розроблений для оптимізації процедури калібрування, виконує наступні дії:

- Приймає від користувача такі параметри: максимальну допустиму похибку для кожного з шуканих коефіцієнтів; початкову прогнозовану кількість вимірювань; максимальну абсолютну похибку встановлення кута обертання, мінімально можливий кут обертання.

- Генерує випадковим чином матрицю кутів обертання, кратних мінімально можливому куту обертання.

- В ітераційному процесі оцінює відносні похибки коефіцієнтів і порівнює їх з максимально допустимими похибками. Процес повторюється,

поки кожна з відносних похибок коефіцієнтів польової характеристики РХС не перестане перевищувати відповідну максимально допустиму похибку. На кожній ітерації число рівнянь у СЛАР (1) збільшується з заданим кроком.

– Після знаходження оптимальної кількості рівнянь СЛАР (1) за допомогою генератора псевдовипадкових чисел генерується певна кількість разів нова матриця кутів обертання і для неї обчислюються відносні похибки коефіцієнтів (2). Серед всіх таких згенерованих матриць обирається та, для якої обчислені похибки виявилися найменшими.

Як результат роботи програми на екран виводиться інструкція користувачеві, що описує всі кроки процедури калібрування з використанням обчисленої оптимальної кількості вимірювань та наборів кутів обертання.

На рис. 1 показано графік залежності відносних похибок обчислення коефіцієнтів (2) від кількості рівнянь у СЛАР (1), тобто, від кількості вимірювань. Для даного тестового прикладу було взято коефіцієнти: $c_{11} = 0.5$; $c_{12} = 1.1$; $c_{13} = 2.2$; $c_{21} = -1$; $c_{22} = -2$; $c_{23} = 2.78$; $c_{31} = 0$; $c_{32} = 0$; $c_{33} = 0$ (для нульових коефіцієнтів відносні похибки не обчислювалися).

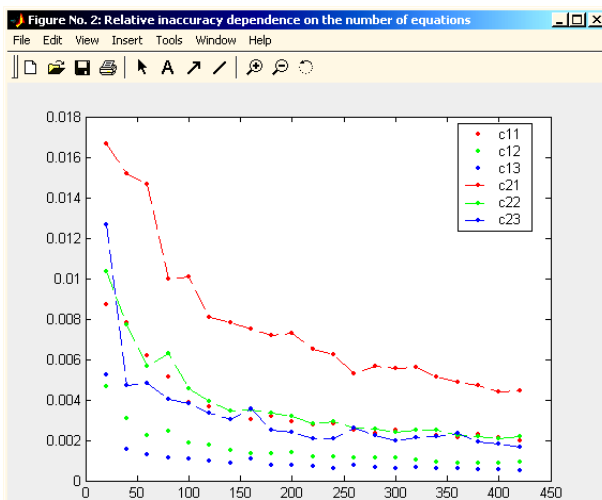


Рис. Залежність відносних похибок коефіцієнтів польової характеристики від кількості вимірювань

З графіка видно, що залежність точності обчислення коефіцієнтів від кількості вимірювань має виражений нелінійний характер. Враховуючи незалежність відносних похибок обчислення коефіцієнтів від самих значень цих коефіцієнтів, можна стверджувати, що показані залежності універсальні і застосовні при калібруванні будь-якої кутової РХС.

Висновки. Розглянуто спосіб оцінки похибок коефіцієнтів польової характеристики кутової РХС. Запропоновано алгоритм на основі методу Монте-Карло для оптимізації процедури калібрування. Показано приклад результату роботи розробленого за цим алгоритмом програмного коду, виконання якого може передувати фізичному процесу калібрування довільної кутової РХС. Планується розширений аналіз залежності допустимих похибок коефіцієнтів польової характеристики РХС від допустимих похибок вимірювання компонентів вектора індукції магнітного поля.

Список літератури. 1. *Popovic R.S. Hall Effect Devices / R.S. Popovic // Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York. – 2002. – 305 p.* 2. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / За ред. *З.Ю. Готри* – Львів: Вид. НУ "Львівська політехніка". – 2001. – 411 с. 3. *Большакова І.А.* Сенсорні пристрої магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою / *І.А. Большакова, Р.Л. Голяка, В.Е. Страшок, Т.А. Марусенкова // Електроніка. Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2009. – № 646. – С. 38-46.* 4. Пат. № 72832 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06, Н 01 L 43/06. Вимірювальний перетворювач магнітного поля / *І.А. Большакова, Р.Л. Голяка* (Україна) – № 2003065533. Заявлено 13.06.03. Опубл. 15.04.05. Бюл. № 4. 5. Пат. № 73816 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06. Вимірювальний перетворювач магнітного поля / *І.А. Большакова, Р.Л. Голяка.* (Україна) – № 2003065532. Заявлено 13.06.03. Опубл. 15.09.05. Бюл. № 9. 6. *Большакова І.А.* Нові конструкції напівпровідникових тонкоплівкових 3-D сенсорів магнітного поля / *І.А. Большакова, Р.Л. Голяка, О.Ю. Макідо, Т.А. Марусенкова // Електроніка і зв'язь. – 2009. – № 2-3. – С. 6-10.* 7. *Burger F.* New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements / *F. Burger, P.-A. Besse, R.S. Popovic // Sensors and Actuators. – 1998. – P. 72-76.* 8. *Auster H.U.* Calibration of flux-gate magnetometers using relative motion / *H.U. Auster, K.H. Fornacon, E. Georgescu, K.H. Glassmeier, U. Motschmann // Institute of physics publishing. Measurement science and technology. – 2002. – № 13. – P. 1124-1131.*

УДК 621.315

Метод калібрування сенсорів магнітного поля на розщеплених холловських структурах / Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Марусенкова Т. А. // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 31. – С. 74 – 79.

Рассмотрена проблема калибрования магнитных сенсоров на основе расщепленных холловских структур. С использованием метода Монте-Карло разработаны программные коды для оптимизации процедуры калибрования магнитного сенсора с помощью поворотного механизма. Определены критерии оценки ожидаемых погрешностей полевой характеристики сенсоров и оптимальное количество измерений. Ил.: 1. Библиогр.: 8.

Ключевые слова: калибрование, магнитные сенсоры, расщепленные холловские структуры, поворотный механизм.

UDC 621.315

Method of calibration of magnetic sensors based on splitted Hall structures / Hotra Z. Yu., Holiyaka R. L., Marusenkova T. A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2010. – № 31. – P. 74 – 79.

This work considers calibration of magnetic sensors based on splitted Hall structures and proposes programs developed on Monte-Carlo method basis for optimization of calibration process using rotation mechanism. The result of these programs execution would be expected inaccuracy of the field characteristic coefficients and an optimal number of measurements to be conducted. Figs.: 1. Refs.: 8 titles.

Keywords: calibration, magnetic sensors, splitted Hall structures, rotating mechanism.

Поступила в редакцію 30.05.2010