

УДК 621.315

І.А. Большакова, д-р техн. наук, Р.Л. Голяка, д-р техн. наук, З Ю Готра, д-р техн. наук,  
Т.А. Марусенкова

## Методи моделювання та калібрування 3D-зондів магнітного поля на розщеплених холлівських структурах

С целью определения коэффициентов полевой характеристики трехкоординатного 3D-зонда на основе расщепленных холловских структур (РХС) предложена методика их моделирования и калибровки. Преимуществом РХС является возможность локализации чувствительной области сенсора в угловой части структуры, что обеспечивает высокое пространственное разрешение 3D-зонда при соответствующей его конструкции. Коэффициенты полевых характеристик находят численными методами на основе наборов выходных сигналов РХС при произвольном вращении 3D-зонда в однородном магнитном поле.

The work proposes a method of modeling and calibration intended for defining coefficients of field characteristics of 3D magnetic sensors based on splitted Hall structures. A splitted Hall structure allows to locate the sensor sensitive region in its corner, so having constructed a 3D sensor appropriately one can achieve high spatial resolution. The coefficients of field characteristics can be found using calculus of approximation and triples of a 3D sensor's output signals obtained during its arbitrary rotation in a uniform magnetic field.

**Ключевые слова:** *расщепленная холловская структура, РХС, датчик Холла, 3D-зонд магнитного поля, калибрование, полевая характеристика.*

### Вступ

Датчики Холла є одними з найбільш розповсюджених сенсорів магнітного поля. Їх характеризує здатність вимірювати магнітне поле в широких межах ( $10^{-5} \dots 10^2$  Т), низьке енергоспоживання ( $< 10$  мВт), мінімальні габарити (1...3 мм) тощо. Сигнал елементарних датчиків Холла є пропорційним проекції вектора індукції магнітного поля на нормаль до площини їхнього чутливого напівпровідникового шару. Тому для забезпечення можливості вимірювати три ортогональні проекції вектора індукції магнітного поля датчики Холла об'єднують у 3D-зонди [1, 2].

Останнім часом зростає зацікавленість до розщеплених холлівських структур (РХС) [3–7], зокрема кутових. Особливість кутової РХС (рис. 1) полягає в тому, що її чутлива зона знаходиться в кутовій частині підкладки, а тому однією з переваг 3D-зондів магнітного поля на основі кутових РХС є висока просторова роздільна здатність (у дослідних зразках чутливі ділянки всіх кутових РХС 3D-зонда знаходилися в просторі діаметром 0.2 мм, забезпечуючи роздільну здатність, на порядок кращу, ніж у 3D-зондах на основі традиційних давачів Холла).

В ідеальному випадку РХС розміщуються у 3D-зонді строго ортогонально, проте в реальності має місце розсміщення площин РХС з площинами відповідних граней кубічної

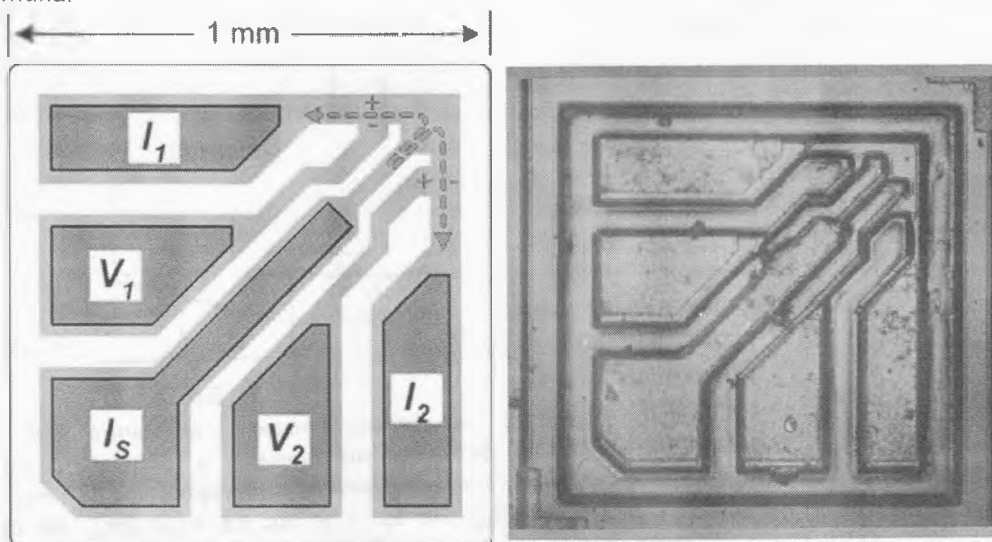


Рис. 1. Схема та фотографія кутової РХС

підкладки 3D-зонда. Невраховані похибки розміщення РХС спричиняють похибки вимірювання проєкцій вектора магнітної індукції. Тому для створення прецизійних 3D-зондів магнітного поля на основі РХС необхідно визначити та врахувати похибки позиціонування РХС у 3D-зонді.

Метою даної роботи є розробка методики калібрування 3D-зонда на основі РХС для визначення та врахування похибок розміщення РХС у 3D-зонді.

## 1. Математична модель 3D-зонда магнітного поля

Розглянемо 3D-зонд магнітного поля на РХС, польові характеристики яких у першому наближенні описуються лінійними функціями:

$$\begin{aligned} U_{1i} &= U_{01} + a_1 B_{N1i} \\ U_{2i} &= U_{02} + a_2 B_{N2i} \\ U_{3i} &= U_{03} + a_3 B_{N3i} \end{aligned} \quad (1)$$

де  $U_{1i}$ ,  $U_{2i}$ ,  $U_{3i}$  – значення вихідних сигналів першої, другої та третьої РХС відповідно при  $i$ -ому вимірюванні;  $U_{01}$ ,  $U_{02}$ ,  $U_{03}$  – напруги зміщення (off-set) трьох РХС;  $B_{N1i}$ ,  $B_{N2i}$ ,  $B_{N3i}$  – поточні проєкції вектора магнітної індукції на нормалі  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  до площин першої, другої та третьої РХС відповідно, виражені у локальних системах координат  $x_1y_1z_1$ ,  $x_2y_2z_2$  та  $x_3y_3z_3$ , пов'язаних з цими РХС. Коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  використовуються для стислості математичного опису і дорівнюють:

$$a_1 = \frac{R_{H1} \cdot I_1}{d_1}; a_2 = \frac{R_{H2} \cdot I_2}{d_2}; a_3 = \frac{R_{H3} \cdot I_3}{d_3} \quad (2)$$

де  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$ ,  $R_{H3}$  – коефіцієнти Холла, а  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  – товщини першої, другої та третьої РХС відповідно;  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  – струми, які проходять через струмові електроди трьох РХС.

Виразимо польові характеристики трьох РХС через єдині проєкції  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  у системі координат  $xyz$ , пов'язаній з кубічною підкладкою 3D-зонда. Прийнемо наступні позначення у системі координат  $xyz$  нормаль  $N_1$  має напрямні косинуси  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ , нормаль  $N_2$  – напрямні косинуси  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ , а нормаль  $N_3$  – напрямні косинуси  $t_{31}$ ,  $t_{32}$ ,  $t_{33}$ .

Взагалі кажучи, між локальними системами координат трьох РХС та системою координат  $xyz$  може мати місце і перенос, і поворот. Проте, якщо калібрування 3D-зонда магнітного поля

здійснюється в однорідному магнітному полі, переносом можна знехтувати.

Тоді після перетворення координат одержуємо:

$$\begin{aligned} a_1 t_{11} B_{xi} + a_1 t_{12} B_{yi} + a_1 t_{13} B_{zi} &= U_{1i}' \\ a_2 t_{21} B_{xi} + a_2 t_{22} B_{yi} + a_2 t_{23} B_{zi} &= U_{2i}' \\ a_3 t_{31} B_{xi} + a_3 t_{32} B_{yi} + a_3 t_{33} B_{zi} &= U_{3i}' \end{aligned} \quad (3)$$

де  $U_{1i}' = U_{1i} - U_{01}$ ;  $U_{2i}' = U_{2i} - U_{02}$ ;

$$U_{3i}' = U_{3i} - U_{03}$$

Традиційно калібрування 3D-зондів здійснюють у два етапи. На першому, розмістивши 3D-зонд у магнітному екрані, вимірюють напруги зміщення РХС. На другому етапі, розмістивши 3D-зонд в однорідному магнітному полі, зокрема електромагніта, та використовуючи механізми обертання цього зонда, вимірюють залежність сигналів від кутів обертання. При відомих кутах обчислюються значення проєкцій вектора магнітної індукції  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  у вибраній системі прямокутних декартових координат  $xyz$  за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} B_x &= B \sin \alpha \cos \beta, \\ B_y &= B \sin \alpha \sin \beta, \\ B_z &= B \cos \alpha, \end{aligned}$$

де  $B$  – модуль вектора магнітної індукції,  $\alpha$  – кут між вектором магнітної індукції та віссю  $z$ , а  $\beta$  – кут між вектором магнітної індукції та віссю  $x$ . У цьому випадку три РХС можна калібрувати окремо, до з'єднання їх у 3D-зонд і таким чином визначити коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , а коефіцієнти  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ ,  $t_{31}$ ,  $t_{32}$ ,  $t_{33}$  знайти як розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) (3).

Проте, по-перше, реальні механізми обертання характеризуються похибками встановлення кутів, що, в свою чергу, призводять до обчислення невідомих коефіцієнтів з похибками. А по-друге, необхідність застосування механізмів обертання робить процедуру калібрування більш вартісною та трудомісткою.

Відомо, що при експлуатації 3D-зондів магнітного поля в екстремальних умовах, зокрема, у системах магнітного відхилення прискорювачів заряджених частинок та системах магнітного утримання плазми в реакторах термоядерного синтезу, коефіцієнти Холла з часом змінюються, тому 3D-зонди магнітного поля потребують повторного калібрування [8]. Отже, актуальною є розробка методики калібрування, що не потре-

бує точних механізмів обертання.

Співвідношення (3) можна розглядати як СЛАР відносно невідомих  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ . Тоді за теоремою Крамера, якщо детермінант СЛАР (3) відмінний від 0, її розв'язок відносно  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  записується так:

$$B_x = \frac{\det A_{xi}}{\det A}; \quad B_y = \frac{\det A_{yi}}{\det A}; \quad B_z = \frac{\det A_{zi}}{\det A}, \quad (4)$$

$$\text{де } A = \begin{pmatrix} a_1 t_{11} & a_1 t_{12} & a_1 t_{13} \\ a_2 t_{21} & a_2 t_{22} & a_2 t_{23} \\ a_3 t_{31} & a_3 t_{32} & a_3 t_{33} \end{pmatrix} - \text{матриця СЛАР (3),}$$

а матриці  $A_{xi}$ ,  $A_{yi}$ ,  $A_{zi}$  відповідно утворюються шляхом заміни в матриці  $A$  першого, другого та третього стовпця на вектор-стовпець, записаний у правій частині СЛАР (3), а саме, на вектор  $(U_{1i} \ U_{2i} \ U_{3i})$ .

При обертанні 3D-зонда магнітного поля в однорідному магнітному полі модуль вектора магнітної індукції залишатиметься незмінним:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (5)$$

З урахуванням співвідношень (4) та (5) одержуємо:

$$B^2 = \frac{(\det A_{xi})^2}{(\det A)^2} + \frac{(\det A_{yi})^2}{(\det A)^2} + \frac{(\det A_{zi})^2}{(\det A)^2} \quad (6)$$

Провівши  $N$  вимірювань та склавши систему з  $N$  нелінійних рівнянь вигляду (6), можна знайти невідомі коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ ,  $t_{31}$ ,  $t_{32}$ ,  $t_{33}$ . Задача розв'язання системи рівнянь вигляду (6) може бути зведена до задачі знаходження мінімуму функції

$$F = \sum_{i=1}^N \left| \frac{(\det A_{xi})^2}{(\det A)^2} + \frac{(\det A_{yi})^2}{(\det A)^2} + \frac{(\det A_{zi})^2}{(\det A)^2} - B^2 \right| \quad (7)$$

Оскільки для напрямних косинусів справджуються рівності

$$\begin{aligned} t_{11}^2 + t_{12}^2 + t_{13}^2 &= 1, \\ t_{21}^2 + t_{22}^2 + t_{23}^2 &= 1, \\ t_{31}^2 + t_{32}^2 + t_{33}^2 &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

то ці обмеження слід врахувати при пошуку мінімуму функції (7).

З метою досягнення мінімального часу калібрування та з урахуванням відсутності прямих методів розв'язання систем нелінійних рівнянь необхідно застосовувати чисельні методи для пошуку мінімуму функції (7).

## 2. Аналіз невідомих функції мінімізації

При ідеальному суміщенні площин РХС з гранями підкладки 3D- зонда нормаль до кожної РХС утворює з однією з осей системи координат хуз кут 0, а з двома іншими – кути по 90°. Приймемо, що у довільному 3D-зонді магнітного поля нормаль кожної з трьох РХС утворює з осями системи координат, прив'язаної до підкладки, кути, значення яких відрізняються від ідеальних не більше, ніж на 10°. Тоді, за формулами додавання для тригонометричних функцій, одержуємо, що змінні  $t_{11}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{33}$  належать проміжку  $[\cos 10^\circ; 1]$ , а змінні  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{23}$ ,  $t_{31}$ ,  $t_{32}$  – проміжку  $[-\sin 10^\circ; \sin 10^\circ]$ .

Функція мінімізації (7) залежить від 12 змінних. Відомо, що зі збільшенням числа змінних зростає складність задачі пошуку мінімуму, зменшується кількість придатних ітераційних методів, або суттєво знижується їхня ефективність. Так, метод сіток типово не застосовується для кількості змінних більше 3, а метод Нелдера-Міда є ефективним при числі змінних не більше 6.

Тому в рамках запропонованої нами методики з метою зменшення кількості невідомих проводять окреме калібрування РХС до з'єднання їх у 3D-зонд і знаходять таким чином коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ . Далі, з решти 9 змінних  $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ ,  $t_{31}$ ,  $t_{32}$ ,  $t_{33}$  змінні  $t_{13}$ ,  $t_{23}$  та  $t_{32}$  виражають через пари змінних  $t_{11}$  і  $t_{12}$ ,  $t_{21}$  і  $t_{22}$  та  $t_{31}$  і  $t_{33}$  за співвідношеннями (8).

Оскільки кожна з трьох залежних змінних може бути додатною або від'ємною, то слід шукати мінімум функції  $F = \sum_{i=1}^N F_{i \min}$ , де  $F_{i \min}$  –

мінімальне з 23=8 можливих значень функції

$$F_i = \left| \frac{(\det A_{xi})^2}{(\det A)^2} + \frac{(\det A_{yi})^2}{(\det A)^2} + \frac{(\det A_{zi})^2}{(\det A)^2} - B^2 \right|$$

для кожного  $i$ -ого вимірювання.

## 3. Апробація методики

Запропонована методика калібрування 3D-зонда магнітного поля на основі РХС була апробована наступним чином. Спочатку в магнітному екрані були визначені напруги зміщення трьох РХС  $U_{01} = 1.93$ ,  $U_{02} = 0.21$ ,  $U_{03} = 1.41$  (враховуючи, що вирішувана задача розглядається лише з алгоритмічної точки зору, тут і надалі розмірність коефіцієнтів не є визначальною і не наводиться) Тоді в результаті калібрування кожної РХС окремо визначалися

коєфіцієнти  $a_1 = 479.4863$ ,  $a_2 = 479.0998$ ,  $a_3 = 477.9846$  в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією  $B = 100$  мТ. Далі, після об'єднання трьох РХС у 3D-зонд, проводилося вимірювання їхніх вихідних сигналів у 100 довільних положеннях в однорідному полі з індукцією  $B = 100$  мТ. Усі одержані вимірюванням дані задавалися як вхідні дані програми, розробленої у середовищі MATLAB з використанням методів Ньютона-Гауса та градієнта. Перше наближення програмою шукається за допомогою методу Монте-Карло. Модуль вектора магнітної індукції розраховувався двома способами – на основі знайдених програмою коєфіцієнтів  $t_{12}, t_{13}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{31}, t_{32}, t_{33}$  і на основі припущення, що РХС ідеально співпадають з відповідними гранями підкладки, тобто

$$t_{12} = t_{13} = t_{21} = t_{23} = t_{31} = t_{32} = 0, \quad a$$

$$t_{11} = t_{22} = t_{33} = 1$$

На рис. 2 показано фрагмент програмного коду для розрахунку напрямних косинусів  $t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{31}, t_{32}, t_{33}$ , обчислені програмою напрямні косинуси та нев'язку, що спостерігається при цих значеннях напрямних косинусів. Крім того, на графіку наведені результати розрахунків модуля вектора магнітної індукції на основі обчислених напрямних косинусів (графік  $B_{cor}$ ) і при припущенні про ідеальне розміщення РХС у зонді (графік  $B_{er}$ ).

Виявилось, що без врахування похибок розміщення РХС у 3D-зонді магнітного поля відносна похибка вимірювання модуля вектора магнітної індукції сягала  $\pm 5\%$ , тоді як з урахуванням параметрів розміщення РХС із відповідними гранями підкладки зонда похибка не перевищувала  $\pm 0,5\%$ .

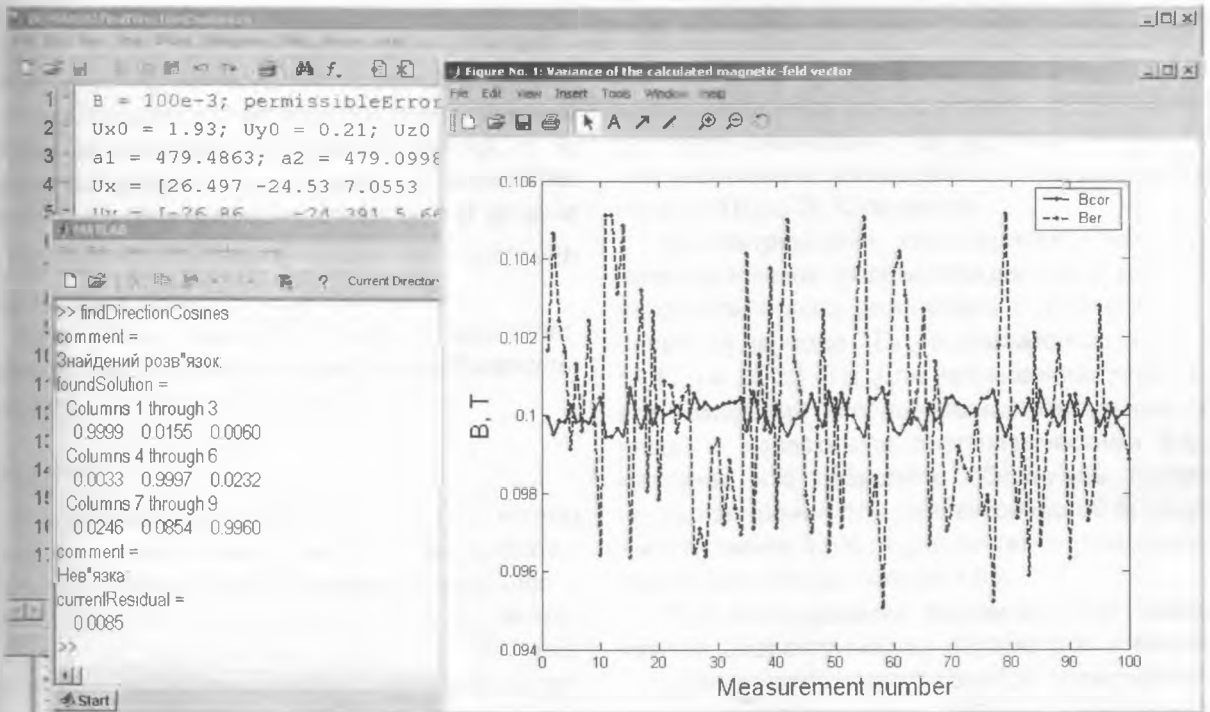


Рис. 2. Результати роботи програми пошуку коєфіцієнтів польових характеристик РХС у 3D-зонді

## Висновки

Розроблено модель і метод калібрування 3D-зондів магнітного поля на основі РХС. Метод калібрування передбачає обертання 3D-зонда довільним чином в однорідному магнітному полі. Невідомі коєфіцієнти польових характеристик РХС у 3D-зонді розраховуються чисельними методами на основі певної кількості наборів сигналів трьох РХС, зчитаних у кожному довільному положенні 3D-зонда. Перевагою методу є зменшення трудомісткості та уникнення необхідності в точних механізмах обертання.

## Література

1. Popovic R.S. Hall Effect Devices. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 2002.
2. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля. За ред. Готри З.Ю. / Большакова І.А., Гладун М.Р., Голяка Р.Л., Готра З.Ю., Лопатинський І.Є., Потенці Є., Сопільник Л.І. -Львів: Вид. Національного університету "Львівська політехніка", 2001.
3. Пат. № 72832 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06, Н 01 L 43/06. Вимірювальний перетворювач магнітного поля / Большакова І.А., Голя-

- ка Р.Л. (Україна) - № 2003065533; Заявлено 13.06.03; Опубл. 15.04.05, Бюл. №4.
4. Пат. № 73816 Україна, МКИ 7 G 01 R 33/06. Вимірювальний перетворювач магнітного поля / Большакова І.А., Голяка Р.Л. (Україна) - № 2003065532; Заявлено 13.06.03; Опубл. 15.09.05, Бюл. №9.
  5. Большакова І.А., Голяка Р.Л., Макідо О.Ю., Марусенкова Т.А. Нові конструкції напівпровідникових тонкоплівкових 3-D сенсорів магнітного поля // Електроніка і зв'язь – 2009. – №2-3. – С.6-10.  
Большакова І.А., Голяка Р.Л., Мороз А.П., Єрашок В.Е., Марусенкова Т.А. Сенсорні пристрої магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою // Вісник НУ «ЛП». Електроніка. – № 646. – 2009. – С. 38-46.
  6. Большакова І.А., Голяка Р.Л., Марусенкова Т.А. Польова характеристика сенсорів магнітного поля на розщеплених холлівських структурах // Вісник НУ «ЛП». Електроніка. – № 680. – 2010. – С. 66-74.
  7. Bolshakova I., Brudnyi V., Holyaka R., Kolin N., Kumada M., Leroy C. Stable semiconductor magnetic field sensors under dozes of high radiation // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2003. – Vol.45. – Num.12A. – P.4.68.