

АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ SPICE СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ ГАЛЬВАНОМАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ХОЛЛА

© Готра З., Голяка Р., Юрчак І., Марусенкова Т., 2011

Наведено алгоритм синтезу SPICE схем заміщення сенсорів магнітного поля на основі гальваномангнітних перетворювачів Холла. З використанням типових бібліотечних елементів синтезовано схеми заміщення, що враховують параметри магнітного поля та просторового положення сенсора в ортогональній системі координат. Отримані шляхом моделювання результати якісно підтверджують результати експериментів та служать основою процедури калібрування сенсорів.

Ключові слова: перетворювачі Холла, моделювання, схема заміщення, SPICE.

The work presents an algorithm of synthesis of SPICE equivalent circuits for galvanomagnetic sensors based on Hall devices. By means of typical library elements circuits were composed in order to take into account magnetic values and sensor's orthogonal coordinates that are not supported by SPICE. The obtained modeling results fit the results of experimental investigations and form the basis of the sensor's calibration procedure.

Keywords: Hall sensor, modeling, equivalent circuit, SPICE.

Вступ

Схемотехніка сучасних сенсорних пристроїв характеризується значною складністю аналізу та оптимізації. Тому в процесі проектування таких пристроїв важливого значення набувають засоби схемного моделювання. Основою більшості сучасних програмних засобів схемного моделювання є SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. На цій основі створені і постійно оновлюються пакети прикладних програм, зокрема PSPICE, LTSPICE, MicroCAP тощо [1, 2].

Запропоновано алгоритм синтезу SPICE схем заміщення гальваномангнітних перетворювачів Холла (ПХ). ПХ (синоніми – холлівські сенсори, елементи Холла, відповідні терміни англійською мовою – Hall sensor, Hall device, Hall element) є найпоширенішим типом гальваномангнітних вимірювальних перетворювачів магнітного поля (рис. 1). Їх характеризує: простота виготовлення, мінімальні габарити, достатньо високі чутливість і лінійність функції перетворення, широкий діапазон вимірювання, здатність функціонування в неоднорідних магнітних полях та в екстремальних умовах експлуатації, зокрема в широкому температурному діапазоні та при значних рівнях проникаючої радіації, а також можливість інтегрування в пристрої вищого рівня інтеграції, зокрема, кремнієві інтегральні схеми (чипи) тощо [3, 4].

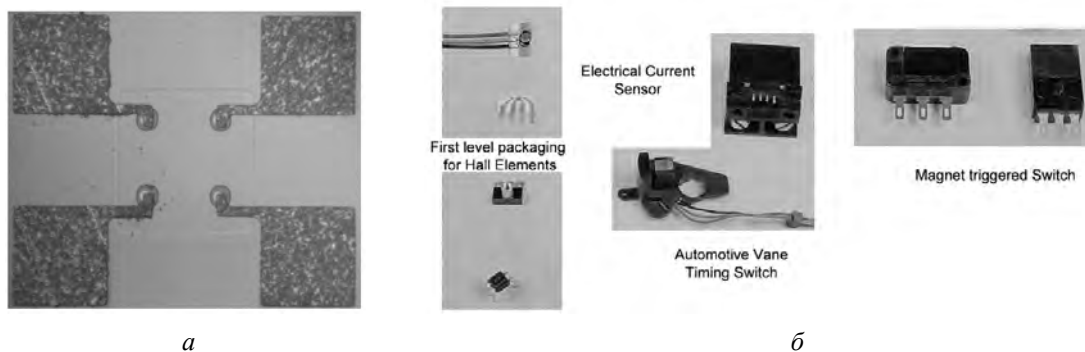


Рис. 1. Типова топологія (а) та приклади конструкцій корпусів (б) ПХ

Ринок використання ПХ є надзвичайно широким. Крім пристроїв вимірювання магнітного поля (гауссметрів), зокрема, для картографування розподілу магнітного поля в магнітних системах прискорювачів заряджених частинок, ПХ використовують у пристроях безконтактного вимірювання струму, пристроях керування та автоматики, зокрема, детектування положення об'єкта в просторі, в яких об'єкт формує чи спотворює магнітне поле тощо.

Аналіз проблеми та базовий підхід

Зазначимо, що безпосереднє використання SPICE та пакетів на його основі для моделювання ПХ є неможливим. По-перше, в SPICE бібліотеках не передбачені параметри магнітного поля. По-друге, модельний аналіз ПХ, і особливо коли йдеться про конструктивно складні сенсори на основі розщеплених холлівських структур [5, 6], повинен передбачати зміну не лише індукції магнітного поля, але і просторового положення сенсора в магнітному полі. Причому, залежно від типу задачі модельного аналізу, аргументами функції може бути модуль вектора поля, проекції цього вектора на систему координат сенсора (його просторове положення), параметри структури сенсора чи температура.

Для вирішення вказаної проблеми запропоновано базовий підхід до синтезу моделей ПХ на основі схем заміщення, параметри елементів яких (напруга, струм, опір) керуються (модулюються) формальними аналогами. Такими формальними аналогами є параметри допоміжних схемних компонентів, які формально описують кількісні характеристики (числові значення) магнітного поля, просторового положення сенсора в магнітному полі та коефіцієнтів функціональної характеристики сенсора, зокрема, чутливість, напругу зміщення (off-set), вхідний та вихідний опір тощо.

У бібліотеках PSPICE та MicroCAP є широкий ряд типових елементів – резисторів, конденсаторів, діодів, транзисторів, а також керованих джерел напруги та струму (VofV, VofI, IofV, IofI, NFV тощо) – модельних елементів, синтаксис яких дозволяє таблично або аналітично задати залежність вихідної величини джерела від певних напруг чи струмів схеми.

З погляду задачі розроблення схем заміщення ПХ, зокрема сенсорів на розщеплених холлівських структурах, необхідними вимогами до моделей елементів, що синтезують ці схеми, є можливість аналітичного опису:

- керованих джерел напруги, що використовуються для моделювання холлівських напруг;
- керованих резисторів, що використовуються для моделювання омичних складових сигналу;
- функціональних взаємозв'язків між параметрами ПХ та проекціями вектора індукції магнітного поля, що реалізуються формальними аналогами і описуються з використанням тригонометричних функціональних залежностей, зокрема, залежностей холлівських та омичних складових сигналу від кута нахилу сенсора в магнітному полі.

Проведений нами аналіз функціональних та параметричних можливостей керованих джерел показав, що для синтезу холлівських напруг найбільш доцільними є керовані джерела напруги типу NFV. Синтаксис цих модельних елементів і приклад схеми керування NFV джерелом наведено на рис. 2.

Для схемного аналізу, що наводиться у статті, використовувався пакет програм MicroCAP компанії Spectrum Software. Цей пакет є одним з найпоширеніших, підтримує SPICE синтаксис, має широку бібліотеку компонентів та зручний графічний інтерфейс.

Алгоритм синтезу схем заміщення ПХ

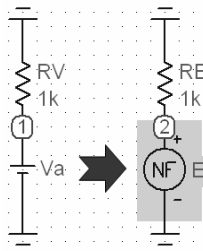
Функціональну залежність холлівської напруги від кута α_N між вектором індукції \vec{B} магнітного поля та нормаллю N до площини сенсора $V_H = V_M \cos \alpha_N$ формально запишемо у вигляді аналітичного виразу $V(E) = V_M \cos(V(1) \cdot \pi/180)$, де $V(E)$ – напруга NFV джерела E ; $V_M = 1$ В – нормоване значення максимальної напруги; $V(1)$ – напруга у вузлі (1), що формується джерелом напруги V_a – формального аналога кута нахилу $V(1) = V(V_a) \equiv \alpha_N$. Приклад отриманої так модельної аналогії наведено на рис. 3.

Function Source - Formula type voltage

SPICE format:
There is no SPICE function source.

Schematic format:
PART attribute:
<name>
This attribute defines the part name.
Examples:
Funct1
NFV1

VALUE attribute:
<formula>
This attribute defines the nonlinear function *expression*.
Examples:
 $U_0 * Cox * Wid * Len * ((Vgs1 - VT1) - (Vds1/2)) * Vds1 * (1 + Lam * Vds1)$
 $1.5 + 2 * sin(2 * PI * 1E6 * t) + 25 * IB(Q1)$



NFV dialog box showing configuration for a function source. The VALUE field contains the formula: $\cos(V(1)*3.14/180)$. The VALUE window displays the result: $\cos(V(1)*3.14/180)$.

a

б

Рис. 2. Синтаксис керованого джерела напруги типу NFV (а) та приклад схеми керування цим джерелом (б)

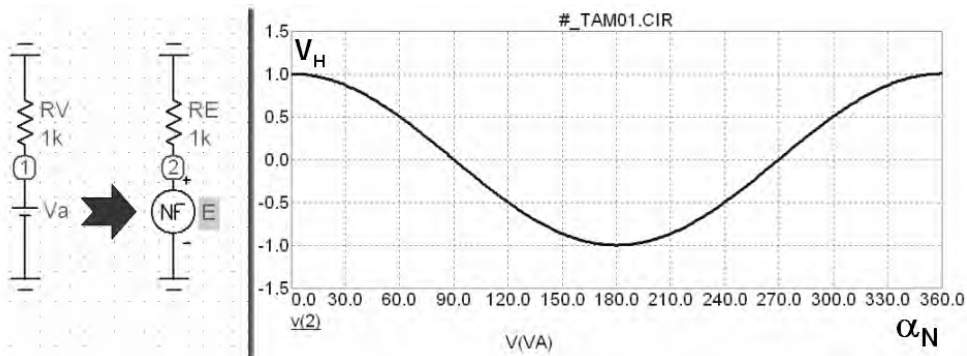


Рис. 3. Приклад модельної аналогії між холлівською напругою V_H та кутом α_N

Для синтезу магніторезистивної структури сенсора використаємо модель функціонального резистора, опір якого може задаватися аналітичним виразом. Приклад результату синтезу квадратичної залежності опору R_B резистивної структури сенсора від індукції B магнітного поля $R_B(B) = R_0(1 + K_{RB}B^2)$ у вигляді формальної залежності $R(R_B) = R_0(1 + K_{RB}V(1)^2)$, де $R_0 = 100$ – опір при $B = 0$, K_{RB} – квадратичний коефіцієнт магнітоопору, $V(1) = V(VB) \equiv B$ – формальний аналог індукції поля, наведено на рис. 4.

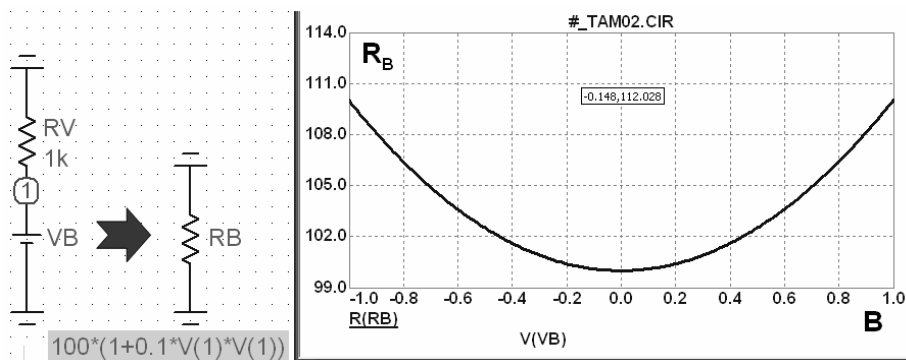


Рис. 4. Приклад специфікації моделі магніторезистивної структури

Крім польової залежності, схема заміщення ПХ повинна описувати його температурні параметри. Оскільки температурна залежність холлівської напруги та опору сенсора типово є нелінійною, необхідно використовувати поліноміальні функції.

Приклад модельного дослідження температурної залежності опору наведено на рис. 5. Моделювання проводилося при лінійному коефіцієнті $RC_1 = -0.002$ з використанням методу “Stepping”, який передбачає неперервну зміну аргументу (в даному випадку температури Temp) при

наборі дискретних значень квадратичних коефіцієнтів $RC_2 = [0, -0.00003, -0.0001, 0.00003, 0.0001]$. Сімейства отримують, активізувавши метод “Stepping” режимом <Step It: Yes>. Дискретні значення температурних коефіцієнтів компонентів (режим <Parameter Type: Component>) чи моделей (режим <Parameter Type: Model>) задаються в режимі <Method: List>. Можливі і інші варіанти вибору змінних, зокрема режимами <Method: List>, <Method: Linear> чи <Method: Log>.

Аналогічні підходи використовують при описі температурних характеристик інших елементів схем заміщення ПХ, зокрема, керованих джерел напруги. Зазначимо також, що відповідно до можливостей сучасних версій пакетів схемного моделювання, температури елементів схем заміщення можуть змінюватися незалежно. Тобто, представляється можливим проводити схемний аналіз при локально перегрітих, зокрема, струмом живлення, елементах. Для цього необхідно визначити тепловий опір цих елементів та, отримавши модельним дослідженням потужність, що виділяється на елементах, розрахувати різницю їхніх температур.

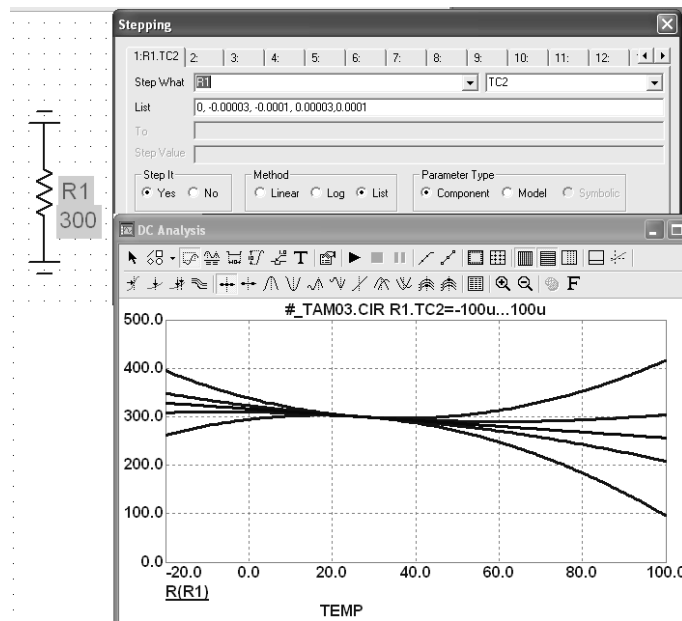


Рис. 5. Приклад моделювання температурних залежностей опору

Модель ПХ повинна враховувати три проекції вектора індукції \vec{B} магнітного поля на ортогональні осі N, L та W, що, відповідно, визначаються кутами α_N та α_P сферичної системи координат (рис. 6, а):

$$B_N = B \cos \alpha_N ; B_L = B_{LW} \cos \alpha_P = B \sin \alpha_N \cos \alpha_P ; B_W = B_{LW} \sin \alpha_P = B \sin \alpha_N \sin \alpha_P .$$

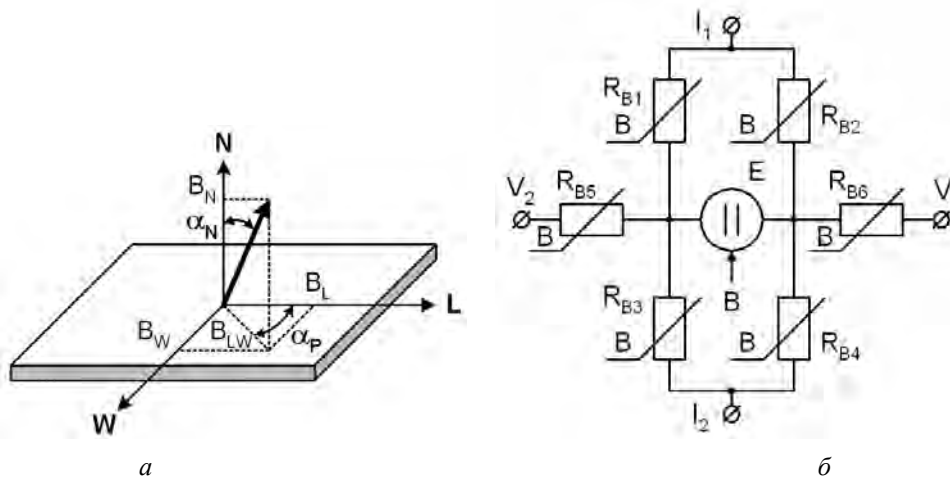


Рис. 6. Система координат (а) та схема заміщення (б) холлівського сенсора

Враховуючи вищезгадані елементи та формальні аналоги, модель ПХ може бути представлена наведеною на рис. 6, б схемою заміщення. Резистори R_B , опір яких модулюється магнітним полем, представляють омичну структуру сенсора, зокрема, R_{B1} , R_{B2} , R_{B3} та R_{B4} – його струмового, а R_{B5} та R_{B6} – потенціального кіл. Кероване джерело напруги E формує холлівську V_H та паразитну V_P диференційні (різницеві) складові вихідного сигналу $V_2 - V_1$.

Точний аналіз параметрів ПХ передбачає врахування планарного ефекту. Цей ефект обумовлює виникнення паразитної складової V_P сигналу сенсора при дії паралельної його площині складової вектора індукції магнітного поля. Враховуючи, що основною причиною планарного ефекту є несиметрія магніторезистивної модуляції, цей ефект можна описати квадратичною функцією проекції вектора магнітного поля на осі L та W . В залежності від напрямку проходження струму в структурі сенсора паразитна складова буде пропорційною: $V_P \sim B_L^2 = B^2 \sin^2 \alpha_N \cos^2 \alpha_P$ чи $V_P \sim B_W^2 = B^2 \sin^2 \alpha_N \sin^2 \alpha_P$.

У низці літературних джерел, зокрема в [3] планарний ефект характеризують функцією $\sin 2\alpha$, яка визначає максимальне значення паразитної складової напруги при $\alpha_P = 45^\circ$. Це, на перший погляд, протиріччя пояснюється результатами таких математичних перетворень

$$\begin{aligned} 2 \sin^2 \left(\alpha + \frac{\pi}{4} \right) &= 2 \left(\sin \alpha \cos \frac{\pi}{4} + \cos \alpha \sin \frac{\pi}{4} \right)^2 = 2 \left(\sin \alpha \frac{\sqrt{2}}{2} + \cos \alpha \frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = \\ &= 2 \cdot \frac{2}{4} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)^2 = \sin^2 \alpha + 2 \sin \alpha \cos \alpha + \cos^2 \alpha = 1 + \sin 2\alpha. \end{aligned}$$

Отже, можна зробити висновок, що для опису планарного ефекту функції $\sin^2 \alpha$ та $\sin 2\alpha$ є якісно рівнозначними (необхідно враховувати лише фазові зміщення та зміну амплітуди).

Для опису планарного ефекту використаємо те саме джерело напруги, що і для опису холлівської напруги, однак, аргументом функції планарного ефекту буде кут α_P між проекцією вектора індукції поля на площину сенсора та віссю L (див. рис. 6, а). У типових холлівських сенсорів ця вісь відповідає напрямку протікання струму в чутливому шарі сенсора.

Для зручності, як це було показано вище, кути α_N та α_P та більшість кількісних величин моделі, зокрема, польова вольтова чутливість сенсора, напруга зміщення, опір в нульовому полі тощо, представляються у вигляді параметрів функціональних аналогів. Таке представлення дає змогу оперативно проводити серії модельних аналізів, змінюючи параметри функціональних аналогів в циклах Stepping.

Приклад синтезу схеми заміщення ПХ з функціональними елементами-аналогами наведено на рис. 7.

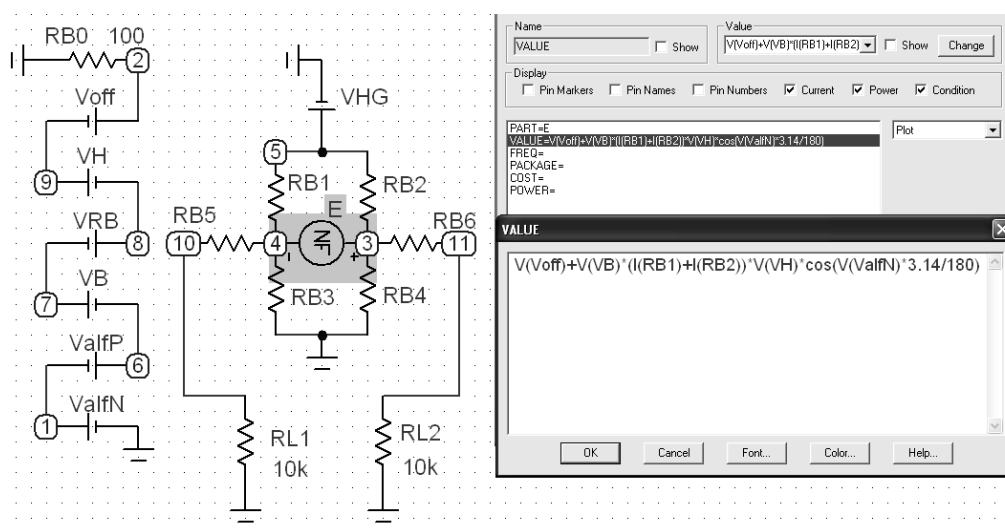


Рис. 7. PSPICE схема заміщення холлівського сенсора та специфікація джерела E

Функціональними елементами-аналогами схеми заміщення ПХ є, зокрема:

- ValfN – аналог кута α_N ;
- ValfP – аналог кута α_P ;
- VB – аналог модуля вектора індукції;
- VRB – аналог коефіцієнта магнітоопору;
- VH – аналог коефіцієнта холлівської напруги;
- Voff – аналог напруги зміщення вихідної напруги сенсора;
- RB0 – аналог опору резистивних елементів моделі в нульовому полі.

Розміщення та з'єднання цих функціональних аналогів може бути довільним, оскільки інформативною величиною в модельних дослідженнях є значення параметрів елементів-аналогів, а не результат їхньої взаємодії в схемі. Важливо лише не допускати режимів холостого ходу чи короткого замикання джерел напруг, що типово призводить до синтаксичної чи параметричної помилки моделі. За необхідності до моделі додають інші функціональні аналоги, що описують зокрема коефіцієнти планарного ефекту та несиметрію ПХ.

Аналогічно до рис. 6, б, схема заміщення сенсора у форматі PSPICE містить резистивні елементи RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6 та кероване джерело напруги E типу NFV (відповідно до синтаксису PSPICE нижні та верхні індекси в умовних позначеннях елементів не застосовуються). Елементарний варіант польової залежності опорів R(RB) резистивних елементів та напруги V(E) джерела E без врахування планарного ефекту визначається аналітичними виразами (тут та надалі формульні записи відповідають вимогам синтаксису PSPICE):

$$R(RB) = R(RB0) * (1 + V(VRB) * V(VB) * V(VB));$$

$$V(E) = V(Voff) + V(VB) * (I(RB1) + I(RB2)) * V(VH) * \cos(V(ValfN) * 3.14 / 180).$$

Джерело напруги VHГ представляє напругу живлення сенсора, а резистори RL1, RL2 – опори навантаження потенціального кола. Важливим є не лише функціональний зв'язок між напругою джерела E та проекцією магнітного поля на нормаль, але і залежність цієї напруги від струму живлення сенсора – холлівська напруга є лінійною функцією струму. В моделі цей струм визначається сумою струмів через резистори RB1 та RB2: $I(RB1) + I(RB2)$. Лістинг схеми заміщення ПХ SUBCKT TAM_HS у форматі PSPICE наведений нижче:

```
* TAM PSPICE HALL SENSOR MODEL 2011
.SUBCKT TAM_HS 5 0 10 11
E 3 4 VALUE = { V(VOFF)+V(VB)*(I(RB1)+
+I(RB2))*V(VH)*COS(V(VALFN)*3.14/180) }
RB0 0 2 100
RB1 4 5 { R(RB0)*(1+V(VRB)*V(VB)*V(VB)) }
RB2 3 5 { R(RB0)*(1+V(VRB)*V(VB)*V(VB)) }
RB3 0 4 { R(RB0)*(1+V(VRB)*V(VB)*V(VB)) }
RB4 0 3 { R(RB0)*(1+V(VRB)*V(VB)*V(VB)) }
RB5 10 4 { R(RB0)*(1+V(VRB)*V(VB)*V(VB)) }
RB6 3 11 { R(RB0)*(1+V(VRB)*V(VB)*V(VB)) }
RL1 10 0 10K
RL2 11 0 10K
VALFN 1 0 0V
VALFP 6 1 0V
VB 7 6 1V
VH 9 8 20V
VHG 5 0 1V
VOFF 2 9 0.01V
VRB 8 7 0.1V
.ENDS TAM_HS
```

Ряд результатів модельних досліджень польових характеристик ПХ з використанням запропонованої SPICE схеми заміщення представлені на рис. 8–11. Можна бачити, зокрема, несиметричність та нелінійність польової залежності перерозподілу струму в структурі сенсора, причиною яких є обумовлена технологічним розкидом електрофізичних параметрів несиметричність структури та магніторезистивна модуляція її опору. Ці самі причини обумовлюють несиметрію та нелінійність польової залежності вихідних напруг (рис. 9: напруги V(10), V(11)).

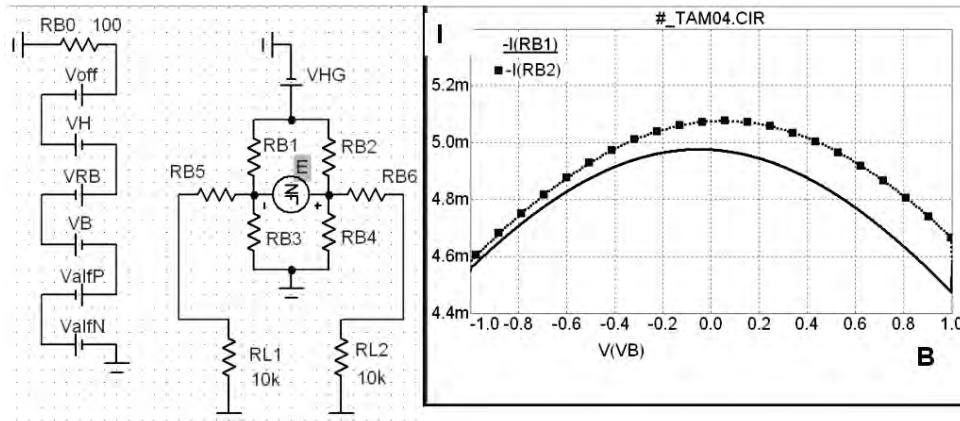


Рис. 8. Польова залежність перерозподілу струму в структурі сенсора

Нелінійність польових залежностей вихідних напруг доцільно оцінювати за першими похідними напруг по полю dV/dB , зокрема, похідними напруг V(10) і V(11) $\frac{\partial V(10)}{\partial B}$ та $\frac{\partial V(11)}{\partial B}$ відповідно. Використовуючи функціональну аналогію та відповідно до синтаксису SPICE ці похідні визначають записами DD(V(10)) та DD(V(11)).

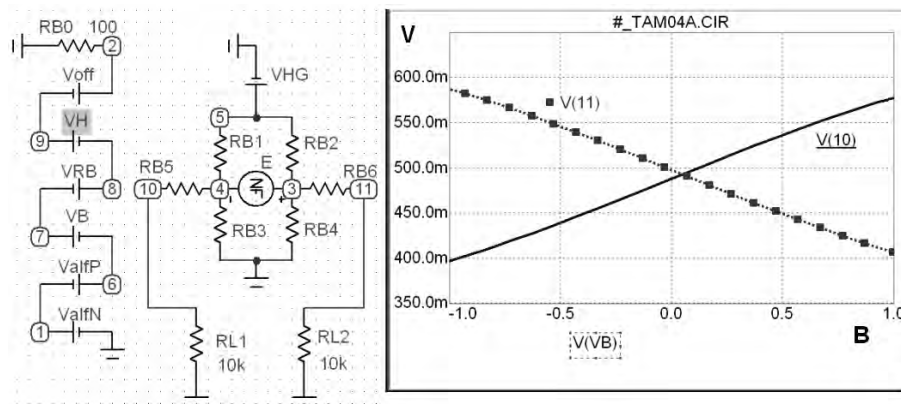


Рис. 9. Польова залежність вихідних напруг сенсора

Приклад таких модельних досліджень наведено на рис. 10. Можна бачити, що для вибраних в наведеному прикладі значень елементів схеми заміщення нелінійність функції перетворення в діапазоні 1T ($V(VB) = \pm 1V$ – формальний аналог індукції поля B), приблизно становить $100\text{ mV} - 80\text{ mV} = 20\text{ mV}$. Очевидно, що для традиційних холлівських сенсорів з чутливістю приблизно $dV/dB \approx (600\text{ mV} - 400\text{ mV})/1T = 200\text{ mV/T}$ це значення нелінійності є доволі значним, однак, нелінійності функції перетворення сенсорів на основі розщеплених холлівських структур можуть мати й значно більші значення.

Представлений вище алгоритм синтезу SPICE схем заміщення ПХ був апробований в численних експериментах з дослідження польових характеристик сенсорів Холла, які підтверджують правильність запропонованого алгоритму синтезу схем заміщення ПХ, дають змогу уточнити кількісні параметри математичних моделей та є основою процедури калібрування гальваномагнітних сенсорів магнітного поля.

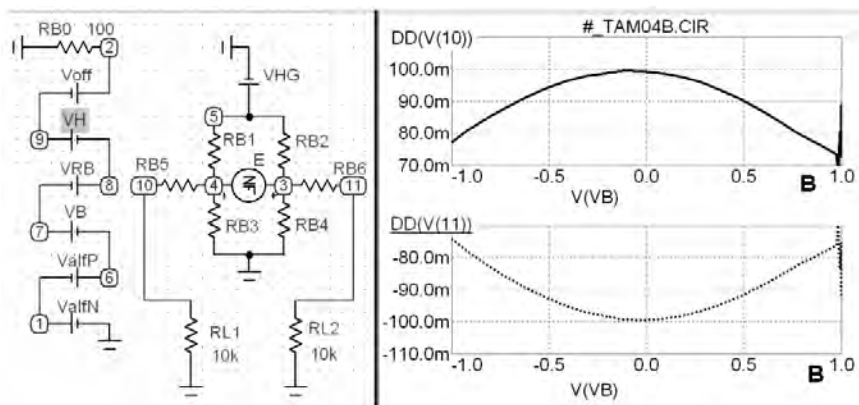


Рис. 10. Нелінійність (перша похідна) польової залежності вихідних напруг

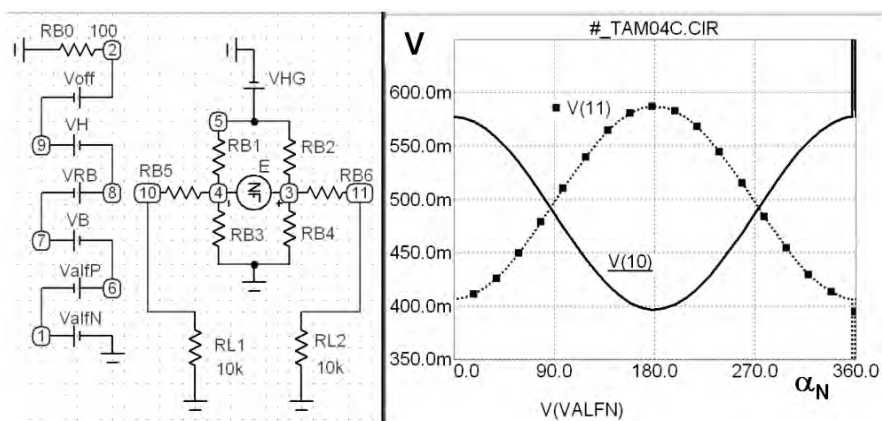


Рис. 11. Кутова залежність вихідних напруг сенсора

Висновки

Представлено підходи та алгоритм синтезу схем заміщення ПХ з використанням типових SPICE бібліотечних елементів, зокрема, джерел напруги типу NFV та функціонально керованих резисторів. Схеми заміщення враховують параметри магнітного поля та просторового положення сенсора в ортогональній системі координат. Результати моделювання підтверджені даними експериментальних досліджень. Запропоновані схеми заміщення дають змогу уточнити кількісні параметри математичних моделей ПХ та використовуються в процесі калібрування гальвано-магнітних сенсорів магнітного поля.

1. Daniel Foty, *MOSFET Modeling with SPICE. Principles and Practice*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458. 1997. 2. *Micro-Cap 7.0, 8.0, 9.0 Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual*. Spectrum Software. 2001, 2005, 2008. www.spectrum-soft.com. 3. R.S. Popovic, *Hall Effect Devices. Second edition*. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 2002. 4. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / За ред. З.Ю. Готри / І.А. Большакова, М.Р. Гладун, Р.Л. Голяка, З.Ю. Готра, І.Є. Лопатинський, Є. Потенцікі, Л.І. Сопільник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2001. 5. F. Burger, P.-A. Besse, R.S. Popovic. *New fully integrated 3-D silicon Hall sensor for precise angular-position measurements. Sensors and Actuators*. A 67. 1998. PP. 72-76. 6. 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 // *Електроніка. Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 2009. – № 646. – С. 38–46.