

## Компенсация аддитивной температурной погрешности преобразователя

Холла

*В.К. Игнатьев, А.А. Орлов, С.В. Перченко*  
*Волгоградский государственный университет*

**Аннотация:** В статье рассматриваются температурные погрешности, обусловленные нестационарными тепловыми процессами в тонкопленочном преобразователе Холла. Показано существенное влияние эффектов Пельтье и Зеебека на результаты измерений напряжения Холла в режиме коммутации токов. Предложен новый двадцатитактный алгоритм коммутации токов преобразователя Холла, позволяющий снизить аддитивную температурную погрешность в 30 раз для преобразователя ПХЭ602117 в сравнении с четырехтактным алгоритмом.

**Ключевые слова:** преобразователь Холла, температурная аддитивная погрешность, эффект Пельтье, нестационарные процессы, термо-э.д.с., магнитные измерения, коммутация токов

### Четырехтактный алгоритм компенсации погрешностей

Первичные преобразователи на эффекте Холла часто используются в магнитометрах и градиометрах различного применения [1]. Их основным преимуществом является высокое пространственное разрешение и высокая чувствительность [2, 3]. Недостатком таких преобразователей являются зависящие от температуры аддитивная и мультипликативная погрешности [4]. Для частичного исключения аддитивной погрешности часто применяется четырехтактный алгоритм коммутации токов [5, 6] (Рис. 1).

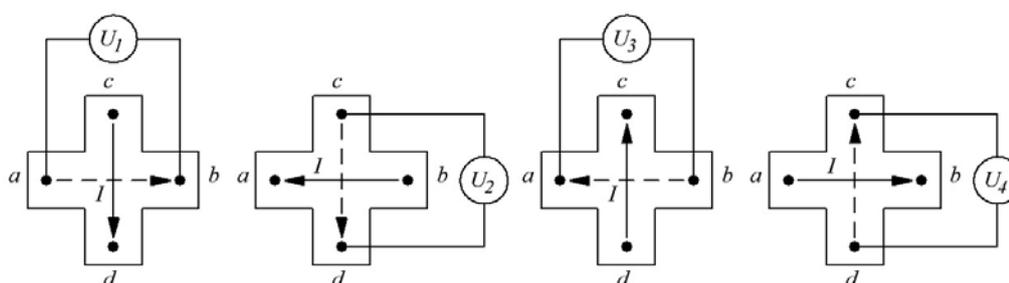


Рис. 1. – Схема коммутации тока в преобразователе Холла при четырехтактном алгоритме работы (Пунктиром показано направление тока на предыдущем такте)

Он заключается в том, что производятся измерения напряжений на различных парах полюсов преобразователя при двух противоположных значениях тока через него, и на основе полученных значений вычисляется напряжение Холла:

$$\begin{aligned}U_1 &= K_H BI + R_U I + U_{off} + U_{T1}; U_2 = K_H BI - R_U I + U_{off} + U_{T2}; \\U_3 &= -K_H BI - R_U I + U_{off} + U_{T3}; U_4 = -K_H BI + R_U I + U_{off} + U_{T4}; \quad (1) \\U_H &= (U_1 + U_2 - U_3 - U_4) / 4 = K_H BI + U_{TH}.\end{aligned}$$

Здесь  $K_H$  – константа Холла,  $B$  – индукция измеряемого магнитного поля,  $I$  – ток через преобразователь,  $R_U$  – сопротивление небаланса, связанное с асимметрией преобразователя,  $U_{off}$  – напряжение смещения измерительных цепей. Напряжения  $U_{Tk}$  характеризуют часть погрешности, связанную с термоэлектрическими эффектами, которые приводят к не компенсируемому четырехтактным алгоритмом смещению  $U_{TH} = (U_{T1} + U_{T2} - U_{T3} - U_{T4}) / 4$ .

Как видно из формул (1), линейная комбинация измеренных напряжений позволяет уменьшить влияние смещения измерительных цепей и сопротивления небаланса. Если считать распределение температурного поля в преобразователе обусловленным только выделением джоулевого тепла, то разница температур контактов преобразователя не будет зависеть от направления тока и  $U_{T1} = U_{T3}$ ,  $U_{T2} = U_{T4}$ , откуда  $U_{TH} = 0$ .

Четырехтактный алгоритм позволяет скомпенсировать нелинейность преобразователя благодаря выполнению соотношений взаимности [6]. Однако, температурный дрейф смещения напряжения Холла скомпенсировать таким алгоритмом нельзя [7]. В работе [8] показывается, что аддитивная погрешность зависит от формы преобразователя. Существуют методы подавления этой погрешности, основанные на аппаратной реализации следящих алгоритмов [9, 10]. Результирующее смещение после применения метода в существующих магнитометрах составляет порядка 1 мкТл [9], что не позволяет использовать их для

прецизионных измерений. При этом дополнительная погрешность прецизионного АЦП не является определяющей, поскольку может быть скомпенсирована описанным в [11] методом.

Выражения (1) и приведенные рассуждения справедливы только для случая, когда температура внешней среды и индукция магнитного поля меняются за время четырех тактов незначительно. Поэтому для увеличения точности измерений длительность такта  $\tau$  следует уменьшить. Мы исследовали работу различных преобразователей Холла на высокой скорости при использовании четырехтактного алгоритма и обнаружили переходные процессы напряжения подобные описанным в [5], но не связанные с паразитной емкостью и индуктивностью измерительных цепей [12]. Прямыми измерениями удалось показать, что основной причиной обнаруженных переходных процессов является неоднородность температуры чувствительной пленки преобразователя. Влияние переходных процессов  $U_{Tk}(t)$  в каждом такте на вычисленное по формуле (1) напряжение Холла показано на рис. 2.

При проведении измерений с одновременной компенсацией геомагнитного поля вычисленное напряжение Холла содержит только некомпенсированное смещение:

$$U_H(t) = U_{TH}(t) = (U_{T1}(t) + U_{T2}(t) - U_{T3}(t) - U_{T4}(t)) / 4,$$

где  $t$  отсчитывается от начала каждого такта.

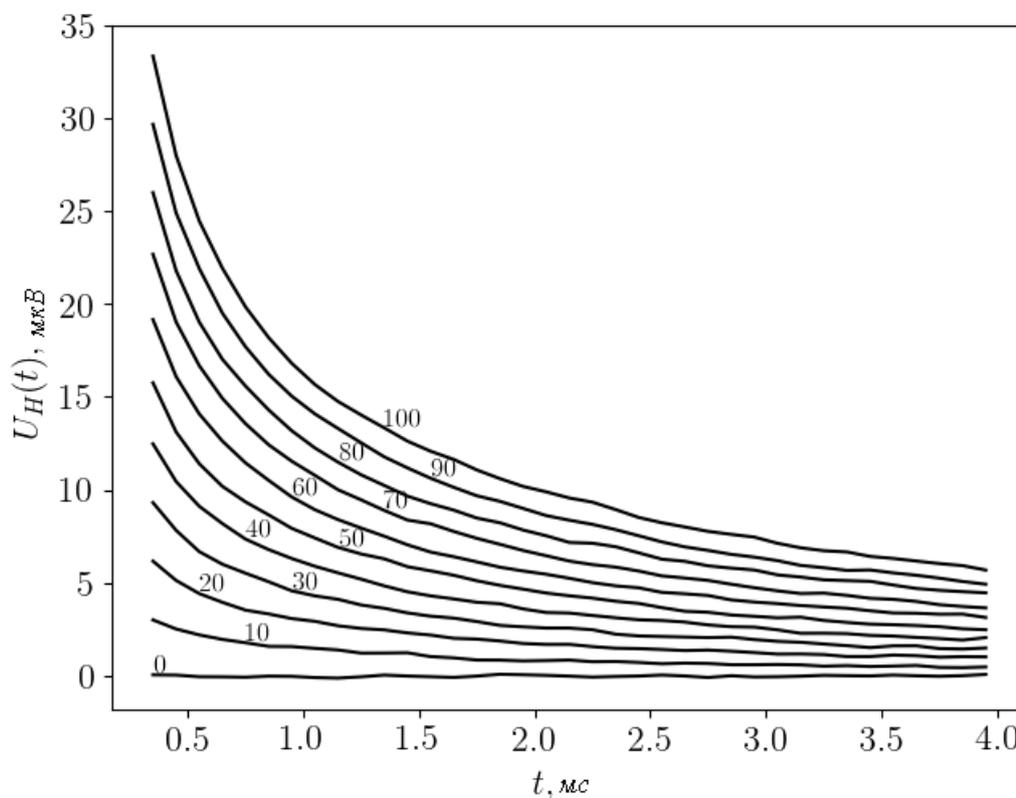


Рис. 2. – График переходных процессов напряжения Холла, цифрами над каждым графиком показаны значения тока через преобразователь в мА

В ходе этого исследования были обнаружены два независимых переходных процесса: первый пропорционален току через преобразователь; второй пропорционален квадрату этого тока. Приведем упрощенную физическую модель процесса коммутации тока при использовании четырехтактного алгоритма. Предположим, что теплоемкость материала преобразователя не зависит от температуры, связь разности температуры пар контактов  $ab$  и  $cd$  с тепловыделением определяется решением линейного уравнения теплопроводности. При работе по четырехтактному алгоритму можно ввести четыре функции для каждой из пар контактов  $\Delta T_{kab}(t)$ ,  $\Delta T_{kcd}(t)$ , где  $k = 1, 2, 3, 4$  – индексы, соответствующие тактам алгоритма.

В модели будем учитывать, что ток при протекании через пленку приводит к выделению джоулевого тепла и теплового потока, создаваемого эффектом Пельтье. Следовательно,

$$\begin{aligned}\Delta T_{3ab}(t) &= \Delta T_{1ab}(t) = I^2 f_{13cd}(t); \Delta T_{4ab}(t) = \Pi g_{24ab}(t) + I^2 f_{24ab}(t); \\ \Delta T_{2ab}(t) &= -\Pi g_{24ab}(t) + I^2 f_{24ab}(t); \Delta T_{4cd}(t) = \Delta T_{2cd}(t) = I^2 f_{24ab}(t); \\ \Delta T_{3cd}(t) &= -\Pi g_{13cd}(t) + I^2 f_{13cd}(t); \Delta T_{1cd}(t) = \Pi g_{13cd}(t) + I^2 f_{13cd}(t).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь функции времени  $f$  описывают реакцию на тепловые процессы, вызванные джоулевым теплом,  $g$  – эффектом Пельтье,  $\Pi$  – коэффициент Пельтье материала чувствительной пленки. Цифровые индексы обозначают номера тактов, для которых используются эти функции, буквенные индексы – названия контактов, через которые пропускался ток.

Для четырехтактного алгоритма разница температур в каждом такте определяется бесконечной суммой функций  $\Delta T_{kab}(t)$ ,  $\Delta T_{kcd}(t)$ , смещенных на времена, кратные длительности такта  $\tau$ . Оборвем эти суммы на третьих слагаемых и запишем выражения для термо-э.д.с. между контактами во время каждого такта:

$$\begin{aligned}U_{T1} &= \varepsilon(\Delta T_{1ab}(\tau) + \Delta T_{4ab}(2\tau) + \Delta T_{3ab}(3\tau)); \\ U_{T2} &= \varepsilon(\Delta T_{2cd}(\tau) + \Delta T_{1cd}(2\tau) + \Delta T_{4cd}(3\tau)); \\ U_{T3} &= \varepsilon(\Delta T_{3ab}(\tau) + \Delta T_{2ab}(2\tau) + \Delta T_{1ab}(3\tau)); \\ U_{T4} &= \varepsilon(\Delta T_{4cd}(\tau) + \Delta T_{3cd}(2\tau) + \Delta T_{2cd}(3\tau)).\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon$  – коэффициент Зеебека. Следовательно, общий вклад термо-э.д.с. в результат измерения напряжения Холла с учетом соотношений (2) и второго соотношения Томпсона [13] имеет вид:

$$\begin{aligned}U_{TH} &= \varepsilon(\Delta T_{1ab}(\tau) + \Delta T_{2cd}(\tau) - \Delta T_{3ab}(\tau) - \Delta T_{4cd}(\tau) + \Delta T_{4ab}(2\tau) + \Delta T_{1cd}(2\tau) - \Delta T_{2ab}(2\tau) + \\ &- \Delta T_{3cd}(2\tau) + \Delta T_{3ab}(3\tau) + \Delta T_{4cd}(3\tau) - \Delta T_{1ab}(3\tau) - \Delta T_{2cd}(3\tau))/4 = \\ &= \varepsilon^2 I T (g_{24ab}(2\tau) + g_{13ab}(2\tau))/2.\end{aligned}$$

Таким образом, четырехтактный алгоритм позволяет скомпенсировать погрешность, обусловленную квадратичным по току процессом. Линейный

по току процесс, связанный с эффектом Пельтье, не может быть скомпенсирован четырехтактным алгоритмом. Он приводит к смещению порядка 20 мкТл значения измеряемой индукции магнитного поля, которое зависит от температуры. Для компенсации этого эффекта был разработан новый алгоритм коммутации токов, включающий в себя такты с нулевым значением тока через преобразователь. При этом учитывалось то, что добавление тактов с нулевым током существенно изменяет динамику температурного поля чувствительной пленки.

### Двадцатитактный алгоритм компенсации погрешностей

Схема разработанного алгоритма показана на рис. 3. Он состоит из двадцати тактов, разделенных на четыре аналогичных блока, каждый из которых кроме обычных тактов четырехтактного алгоритма содержит один такт с нулевым значением тока через преобразователь. При помощи полученных по аналогии с формулами (3) выражений для всех тактов имеем для  $l$ -ого блока напряжение Холла:

$$U_{Hl} = (U_{1l} + U_{2l} - U_{3l} - U_{4l}) / 4 = K_H BI + U_{THl}. \quad (4)$$

Здесь ошибка  $U_{THl}$  для разных  $l$  имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{TH1} &= U_{TH} - \varepsilon(\Delta T_{4ab}(2\tau) + \Delta T_{4cd}(3\tau)) / 4; \\ U_{TH2} &= U_{TH} - \varepsilon(\Delta T_{1cd}(2\tau) - \Delta T_{1ab}(3\tau)) / 4; \\ U_{TH3} &= U_{TH} + \varepsilon(\Delta T_{2ab}(2\tau) - \Delta T_{2cd}(3\tau)) / 4; \\ U_{TH4} &= U_{TH} + \varepsilon(\Delta T_{3cd}(2\tau) + \Delta T_{3ab}(3\tau)) / 4. \end{aligned} \quad (5)$$

Для тактов с нулевым током строим комбинацию, аналогичную напряжению Холла:

$$\begin{aligned} U_{TH0} &= (U_{10} + U_{20} - U_{30} - U_{40}) / 4 = \\ &= \varepsilon(F_{4ab}(2\tau) + F_{3ab}(3\tau) + F_{1cd}(2\tau) + F_{4cd}(3\tau) \\ &\quad - F_{2ab}(2\tau) - F_{1ab}(3\tau) - F_{3cd}(2\tau) - F_{2cd}(3\tau)) / 4 = \\ &= \varepsilon^2 IT(g_{24ab}(2\tau) + g_{13ab}(2\tau)) / 2. \end{aligned} \quad (6)$$

Температурная погрешность  $\langle U_{TH} \rangle$  среднего напряжения Холла  $\langle U_H \rangle = (U_{H1} + U_{H2} + U_{H3} + U_{H4}) / 4$ , построенного из (4), с учетом (5) составляет

$$\begin{aligned} \langle U_{TH} \rangle &= (U_{TH1} + U_{TH2} + U_{TH3} + U_{TH4}) / 4 = \\ &= 3\varepsilon^2 IT(g_{24ab}(2\tau) + g_{13ab}(2\tau)) / 8. \end{aligned} \quad (7)$$

Следовательно, величина скомпенсированного напряжения Холла

$$U_{Hc} = \langle U_H \rangle - \gamma \langle U_{TH0} \rangle = K_H BI, \quad \text{где } \gamma = 3/4 \quad (8)$$

не имеет аддитивной зависимости от температуры. В связи с тем, что вычисления приведены приближенно и влияние полученной в такте тепловой энергии может быть существенно длительнее  $3\tau$ , то коэффициент  $\gamma$  необходимо подбирать экспериментально.

Экспериментальная проверка работы алгоритма производилась на установке, аналогичной описанной в [12], дополненной измерителем температуры. Измерения производились при остывании преобразователей, помещенных в алюминиевый корпус в температурном диапазоне от 20 до 60 °С при индукции магнитного поля менее 0,1 мкТл. Температура в эксперименте контролировалась термопарой К-типа, подключенной к схеме, аналогичной измерителю напряжения Холла. Для преобразователя Холла ПХЭ602117А температурную зависимость аддитивной части напряжения удалось снизить с 33 нВ/°С для четырехтактного алгоритма до 1 нВ /°С.

Описанный в работе алгоритм позволяет повысить метрологические характеристики магнитометров, градиометров и дефектоскопов [1, 14] на преобразователях Холла без существенной доработки измерительной схемы. При этом быстродействие приборов снизится только на 20 %, так как новое значение напряжения Холла можно вычислить в 16 тактах алгоритма из 20. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-48-343002).

### Литература

1. Бардин А.А., Перченко С.В. Холловский градиометр // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2693](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2693).
2. Pascal J., Hébrard L., Frick V., Blondé J.-P. 3D Hall probe integrated in 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS technology for magnetic field pulses measurements // 6th IEEE NEWCAS and TAISA Conference (NEWCAS 2007), Montréal (Canada), June 22-25, 2008, pp. 97-100.
3. Grosz A. et al. Planar Hall Effect Sensors With Subnanotesla Resolution // IEEE Magn. Lett., 2013, vol. 4, Art. no. 6500104.
4. Manic D., Petr J., Popovic R.S. Temperature cross-sensitivity of Hall plate in submicron CMOS technology // Sensors and Actuators, 2000, vol. 85, pp. 244–248.
5. Madec M., Schell J.-B., Kammer J.-B., Lallement C., Hebrard L., Compact modeling of vertical hall-effect devices: Electrical behavior // Analog Integr Circ Sig Process, 2013, vol. 77, pp. 183–195.
6. Bardin A., Ignatjev V., Orlov A., Perchenko S. Reciprocal relations for nonlinear multipole in inhomogeneous magnetic field // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, vol. 441, pp. 276-282.
7. Mosser V., Matringe N., and Haddab Y. A Spinning Current Circuit for Hall Measurements Down to the Nanotesla Range // IEEE Transaction on instrumentation and measurement, 2017, Vol. 66, №4, pp. 637- 650.
8. Paun M.-A., Sallese J.-M. and Kayal M. Geometrical Parameters Influence on the Hall Effect Sensors Offset and Drift // U.P.B. Sci. Bull., Series A, 2010, vol. 72, №4, pp. 257-271.
9. Jiang J., Kindt W.J., Makinwa, K.A. A Continuous-time ripple reduction technique for spinning-current hall sensors // IEEE Journal of solid-state circuits, 2014, vol. 49, №7, pp. 1525-1534.

10. Ripka P. and Janosek M. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors Journal, 2010, vol. 10, № 6, pp. 1108-1116.
11. Игнатъев В.К., Никитин А.В., Перченко С.В., Станкевич Д.А. Динамическая компенсация дополнительной погрешности прецизионного АЦП // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/771.
12. Bardin A., Ignatjev V., Orlov A., Perchenko S. Voltage transients in thin-film InSb Hall sensor // Results in Physics, 2017, vol. 7, pp. 3344-3345.
13. Самойлович А. Г., Коренблит Л. Л. Современное состояние теории термоэлектрических и термомагнитных явлений в полупроводниках // УФН, т. 49, 1953, С. 337–383.
14. Bardin A.A., Ignatjev V.K., Orlov A.A. Hall Magnetic Scanner // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings, 2017, pp. 165-172.

### References

1. Bardin A. A., Perchenko S. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2693.
  2. Pascal L. et al. 6th IEEE NEWCAS and TAISA Conference (NEWCAS 2007), Montréal (Canada), June 22-25, 2008, pp. 97-100. doi: 10.1109/NEWCAS.2008.4606330.
  3. Grosz A. et al. IEEE Magn. Lett., 2013, vol. 4, Art. no. 6500104 doi: 10.1109/LMAG.2013.2276551
  4. Manic D., Petr J., Popovic R.S. Sensors and Actuators, 2000, vol. 85, pp. 244-248. doi: 10.1016/S0924-4247(00)00399-X.
  5. Madec M. et al. Analog Integr Circ Sig Process, 2013, vol. 77, pp. 183-195. doi: 10.1007/s10470-013-0112-0.
-



6. Bardin A., et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, vol. 441. pp. 276-282. doi: 10.1016/j.jmmm.2017.05.079.
7. Mosser V., Matringe N., and Haddab Y. IEEE Transaction on instrumentation and measurement, 2017, vol. 66, №4. pp. 637- 650. doi: 10.1109/TIM.2017.2649858.
8. Paun M.-A., Sallese J.-M. and Kayal M. U.P.B. Sci. Bull., Series A, 2010, vol. 72, №4, pp. 257-271.
9. Jiang J., Kindt W.J., Makinwa, K.A. IEEE Journal of solid-state circuits, 2014, vol. 49, №7, pp. 1525-1534. doi: 10.1109/JSSC.2014.2319252.
10. Ripka P. and Janosek M. IEEE Sensors Journal, 2010, vol. 10, №6. pp. 1108-1116. doi: 10.1109/JSEN.2010.2043429.
11. Ignat'ev V.K. et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/771](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/771).
12. Bardin A. et al. Results in Physics, 2017, vol. 7, pp. 3344-3345. doi: 10.1016/j.rinp.2017.08.050.
13. Samojlovich A. G., Korenblit L. L. UFN, 1953, vol. 49, pp. 337-383.
14. Bardin A.A., Ignatjev V.K., Orlov A.A. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 17, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Conference Proceedings, 2017, pp. 165-172.