

УДК 621.315.592

Д. т. н. З. Ю. ГОТРА, д. т. н. Р. Л. ГОЛЯКА,  
В. Ю. ИЛЬКАНИЧ, Т. А. МАРУСЕНКОВА, к. т. н. О. В. БОЙКО

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»  
E-mail: holyaka@yahoo.com

## ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА СЕНСОРАХ ХОЛЛА

*Рассмотрена эффективность подавления электромагнитной помехи в гальваномагнитных устройствах измерения магнитного поля на сенсорах Холла. Представлен микропроцессорный сигнальный преобразователь с высокой помехоустойчивостью, которая обеспечивается двухтактным измерением сигнала при противоположных направлениях тока питания сенсоров Холла. Показано, что при наличии значительной электромагнитной помехи использование двухтактного режима обеспечивает повышение воспроизводимости результата измерения сигнала до 8 раз.*

*Ключевые слова:* сенсор Холла, сигнальный преобразователь, помехоустойчивость.

Электромагнитные помехи силовых электросетей частотой 50 Гц (или 60 Гц — в зависимости от стандарта электросети) являются причиной ухудшения точности измерения во многих сенсорных устройствах. Проблема подавления электромагнитных помех является актуальной в задачах разработки устройств измерения биопотенциалов [1], емкостных сенсоров [2, 3], сенсоров измерения температуры [4], магнитного поля [5] и т. д.

В данной работе исследуется эффективность подавления электромагнитных помех силовых электросетей, а следовательно, повышение отношения сигнал/шум в устройствах измерения магнитного поля на основе сенсоров Холла. Актуальность такой задачи имеет место, в частности, в двух областях применения сенсоров Холла.

Первой областью являются сенсорные сети с автономными маломощными источниками питания [6]. С целью минимизации энергопотребления в таких устройствах используют импульсные режимы питания и измерения. Обычно измерения проводят в коротких интервалах времени (единицы — десятки миллисекунд), за которыми следуют длительные паузы с минимальным энергопотреблением. При этом используют Wake-up-режимы циклического перехода от состояния ожидания к импульсам измерения. Актуальность задачи подавления электромагнитной помехи в таких сенсорах определяется необходимостью обеспечения заданной точности измерения при минимально возможной длительности импульса питания.

Другой областью, в которой необходимо обеспечить подавление электромагнитных помех, является картографирование магнитных полей ускорителей заряженных частиц и магнитная

диагностика реакторов термоядерного синтеза [7, 8]. Проблемой здесь является довольно низкая чувствительность сенсоров Холла и значительная длина (несколько десятков метров) сигнальных линий между сенсорами и сигнальным преобразователем. Причиной низкой чувствительности сенсоров Холла является необходимость обеспечения высокой радиационной и температурной стабильности, что реализуется специальными технологиями легирования полупроводниковых материалов [9]. Как правило, такие радиационно стойкие сенсоры Холла характеризуются магнитной чувствительностью не более 200 мВ/Тл. Значительная длина сигнальных линий обусловлена невозможностью размещения сигнальных преобразователей (драйверов тока питания, усилителей, аналого-цифровых преобразователей) вблизи сенсоров, которые находятся в магнитных системах ускорителей и реакторов. Длина сигнальных линий, соединяющих сенсоры Холла с сигнальными преобразователями, может составлять несколько десятков метров. Это приводит к возникновению в сигнальных линиях электромагнитных помех, которые с целью повышения отношения сигнал/шум необходимо минимизировать с помощью соответствующих режимов работы сигнального преобразователя.

На рис. 1 упрощенно показаны сенсор Холла (HG — Hall Generator) и соединительные сигнальные линии (TL — Transmission Line). При токе питания  $I_H$  под действием индукции магнитного поля  $B$  на потенциальных выводах сенсора Холла формируется полезный сигнал — холловское напряжение  $V_H$ . Изменение магнитного потока  $F$  через площадь паразитного контура (как сенсора  $S_H$ , так и сигнальной линии  $S_L$ ) обуславливает наведение электромагнитной

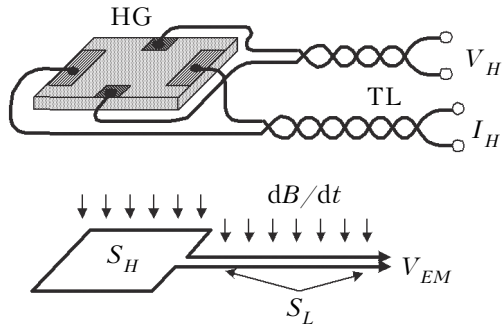


Рис. 1. Наведение электромагнитной помехи в контуре сенсора Холла

помехи — паразитного напряжения  $V_{EM}$ , которое в первом приближении определяется выражением [10]

$$V_{EM} = -\frac{d\Phi}{dt} = -(S_H + S_L) \frac{dB}{dt}.$$

С целью минимизации электромагнитной помехи выводы сенсоров Холла укладывают с минимальной площадью паразитного контура, а сигнальные линии формируют в виде витой пары. Более эффективный способ уменьшения помехи базируется на двухтактном измерении сигнала при противоположном токе питания сенсора. Изменение знака (направления) тока обуславливает соответствующее изменение знака (полярности) выходного холловского напряжения. В противоположность этому, напряжение электромагнитной помехи не зависит от тока питания. Таким образом, можно записать

$$V_{I+} = V_H + V_{EM}, \quad V_{I-} = -V_H + V_{EM},$$

где  $V_{I+}$ ,  $V_{I-}$  — напряжение на выходе измерительной цепи при противоположных направлениях тока питания;  
 $V_H$ ,  $V_{EM}$  — холловская (полезная) и электромагнитная (паразитная) составляющие выходного напряжения.

Результатом двухтактного измерения является половина разностного значения:

$$V_{COR} = (V_{I+} - V_{I-}) / 2,$$

которое в первом приближении равно холловскому напряжению:

$$V_{COR} = (V_{H+} + V_{EM} + V_{H-} - V_{EM}) / 2 = V_H$$

и не зависит от электромагнитной помехи. Эффективность двухтактного измерения обеспечивается минимальной временной задержкой  $dt$  между импульсами с противоположным направлением тока.

На практике используют разновидность двухтактного измерения — одновременно с переключением направления тока сенсора Холла переключают коммутатор полярности выходного напряжения. Преимущественно такое преобразование реализуют схемой синхронного детектора, в котором полярность полезной составляющей сигнала остается неизменной, а полярность электромагнитной помехи попеременно переключается. Тогда, учитывая временную задержку  $dt$  между импульсами, сигнал двухтактного измерения определяется выражением

$$V_{COR} = \frac{-V_{I-}(t) + V_{I+}(t + \Delta t)}{2}.$$

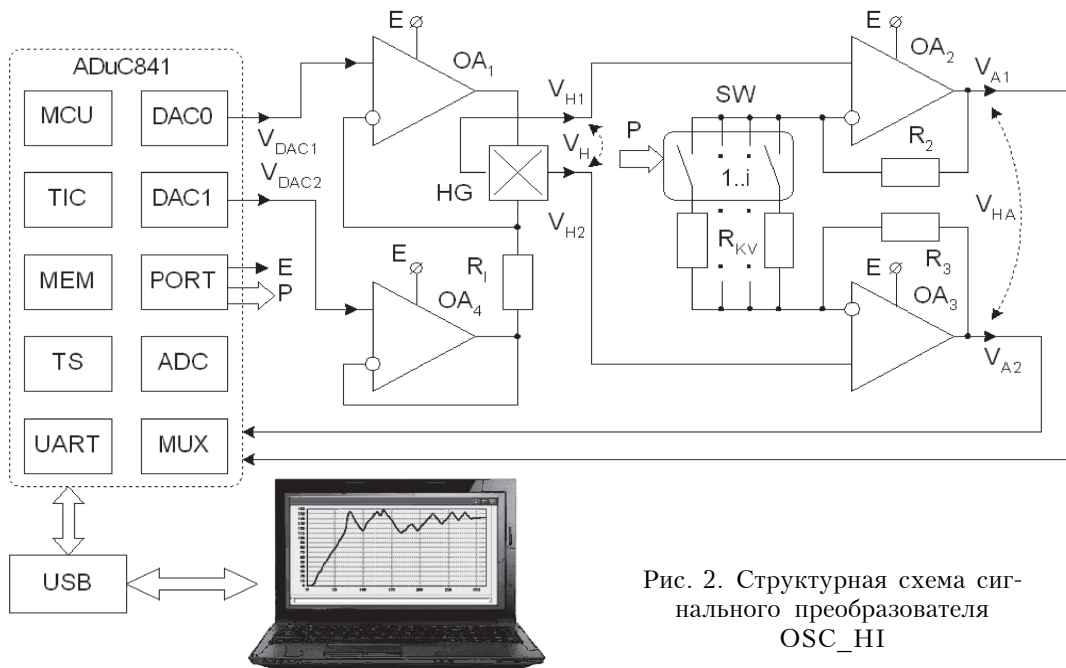


Рис. 2. Структурная схема сигнального преобразователя OSC\_HI

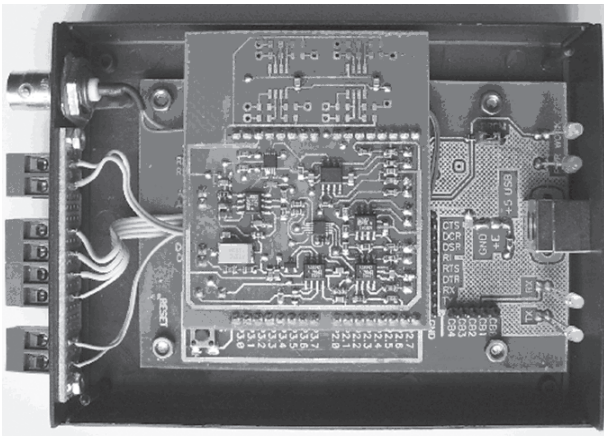


Рис. 3. Фотография сигнального преобразователя OSC\_HI

С целью экспериментального исследования эффективности двухтактного измерения сигнала сенсоров Холла в условиях значительных электромагнитных помех был разработан и изготовлен опытный образец аппаратно-программного устройства OSC\_HI. Структурная схема сигнального преобразователя OSC\_HI приведена на рис. 2, а его фотография — на рис. 3.

Цифровой тракт устройства реализован на микроконвертере ADuC841 (Analog Devices), основными узлами которого являются: ADC — аналого-цифровой преобразователь; MUX — аналоговый мультиплексор входных напряжений ADC; MCU — ядро микроконвертера; TIC — цифровой порт, выводы которого формируют импульсы напряжения питания операционных усилителей, а также управляют мультиплексором цепи отрицательной обратной связи дифференциального усилителя сигнала; DAC0, DAC1 — два цифро-аналоговых преобразователя; TS — встроенный сенсор температуры, информация с которого используется для компенсации температурного дрейфа сенсора; UART — универсальный последовательный порт управления и передачи данных (в данном устройстве используется USB-контроллер FT232R).

Аналоговый тракт реализован на операционных усилителях  $OA_1 - OA_4$  (AD8554) и аналоговых ключах SW (ADG704), с помощью которых обеспечивается программное управление коэффициентом усиления сигнала. Управление амплитудой и полярностью тока питания сенсора Холла  $I_H$  обеспечивается напряжениями  $V_{DAC1}$ ,  $V_{DAC2}$  цифро-аналоговых преобразователей микроконвертера:

$$I_H = \frac{V_{DAC1} - V_{DAC2}}{R_I}.$$

Ток стабилизируется цепью обратной связи операционного усилителя  $OA_1$ . Операционный усилитель  $OA_2$  используется в режиме повтори-

теля напряжений, что необходимо с точки зрения минимизации влияния токовой цепи сенсора HG на выход цифро-аналогового преобразователя. Усиление выходного напряжения сенсора Холла производится дифференциальным усилителем на  $OA_3$ ,  $OA_4$ , SW и матрице резисторов  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_{KV}$ . Результат двухтактного измерения определяется выражением

$$V_S = (V_{A1} - V_{A2})_{T1} - (V_{A1} - V_{A2})_{T2},$$

где  $(V_{A1} - V_{A2})_{T1}$  и  $(V_{A1} - V_{A2})_{T2}$  — разность напряжений на выходах дифференциального усилителя в первом ( $T_1$ ) и во втором ( $T_2$ ) тактах соответственно.

Значение напряжения  $V_{DAC1}$  в обоих тактах определяется оптимальным значением синфазной составляющей сигнала, методика определения которого приведена в [11]. Значение напряжения  $V_{DAC2}$  в первом такте выбирается минимально возможным, а во втором такте — максимально возможным с точки зрения гарантированного диапазона выходных напряжений цифро-аналоговых преобразователей и нормального функционирования операционного усилителя  $OA_4$ . В первом приближении  $V_{DAC2} = 0$  в первом такте измерения сигнала и  $V_{DAC2} = V(E)$  — во втором.

Вид окон программного обеспечения OSC\_HI приведен на рис. 4.

Экспериментальные исследования проводились с использованием радиационно стойкого тонкопленочного InSb-сенсора Холла, магнитная чувствительность которого при номинальном токе питания  $I_H = 10$  мА составляла  $S = 194$  мВ/Тл. Магнитное поле формировалось постоянным магнитом с индукцией поля  $B = 0,132$  Тл, а электромагнитная помеха частотой 50 Гц — размещенным рядом с магнитом силовым трансформатором.

Пример типичных результатов измерения воспроизводимости сигнального аналого-цифрово-

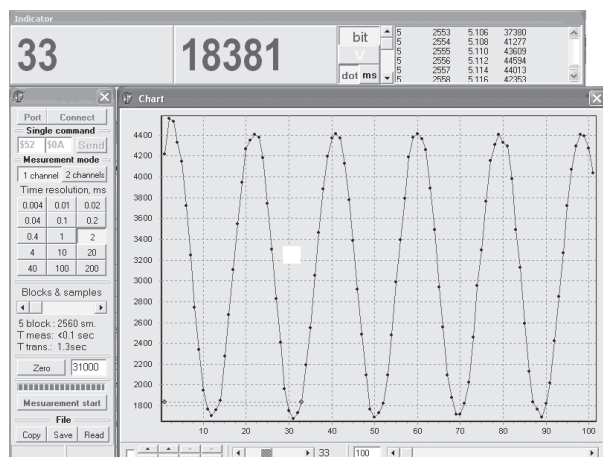


Рис. 4. Вид окон программного обеспечения OSC\_HI

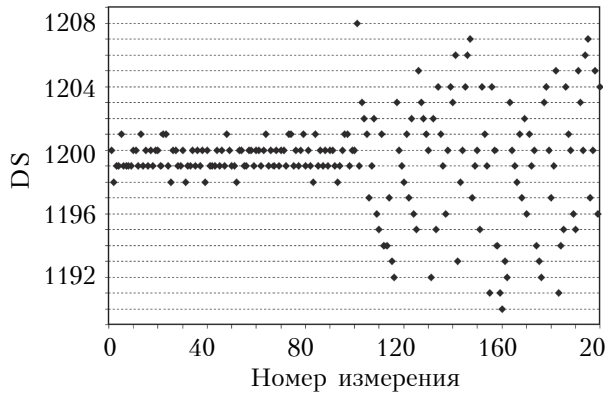


Рис. 5. Пример типичных результатов сигнального преобразования без ЭМ-помехи (измерения от 1 до 100) и с ЭМ-помехой (от 101 до 200)

го преобразования в режиме одноактного измерения без электромагнитной (ЭМ) помехи (измерения от 1 до 100) и с ЭМ-помехой (измерения от 101 до 200) приведен на рис. 5. Параметр DS обозначает результат аналого-цифрового преобразования в десятичной системе исчисления DEC. Как видно, разброс результатов измерения при отсутствии помехи не превышает плюс-минус две единицы, а при наличии помехи увеличивается в 3–5 раз.

Целью экспериментальных исследований был анализ эффективности двухтактного измерения

при разных отношениях сигнал/шум, что обеспечивалось изменением тока питания сенсора Холла от номинального  $I_H = 10$  мА до минимально возможного с точки зрения дальнейшего сигнального преобразования —  $I_H = 0,1$  мА. Уменьшение полезной составляющей сигнала (напряжения Холла при фиксированной индукции магнитного поля) при уменьшении тока питания сенсора Холла компенсировалось соответствующим увеличением коэффициента усиления  $K_V$  сигнального преобразователя. Коэффициент усиления дискретно изменялся путем переключения резисторов цепи обратной связи  $R_{KV}$  дифференциального усилителя, что осуществлялось соответствующими логическими сигналами  $P$  управления коммутатора-мультиплексора SW.

В проводимых исследованиях коэффициент усиления сигнала  $K_V$  дискретно изменялся в зависимости от тока питания сенсора Холла:  $K_V \approx 35$  для  $I_H = 10$  мА;  $K_V \approx 350$  для  $I_H = 1$  мА;  $K_V \approx 3500$  для  $I_H = 0,1$  мА. Таким образом, во всех режимах измерения при фиксированном магнитном поле  $B = 0,132$  Тл и разных значениях тока питания 10, 1 и 0,1 мА (чувствительность — 194, 19,4 и 1,94 мВ/Тл соответственно) разность выходных напряжений дифференциального усилителя составляла  $V_{AH} \approx 0,88$  В. В режиме двухтактного измерения задержка между тактами с противополож-

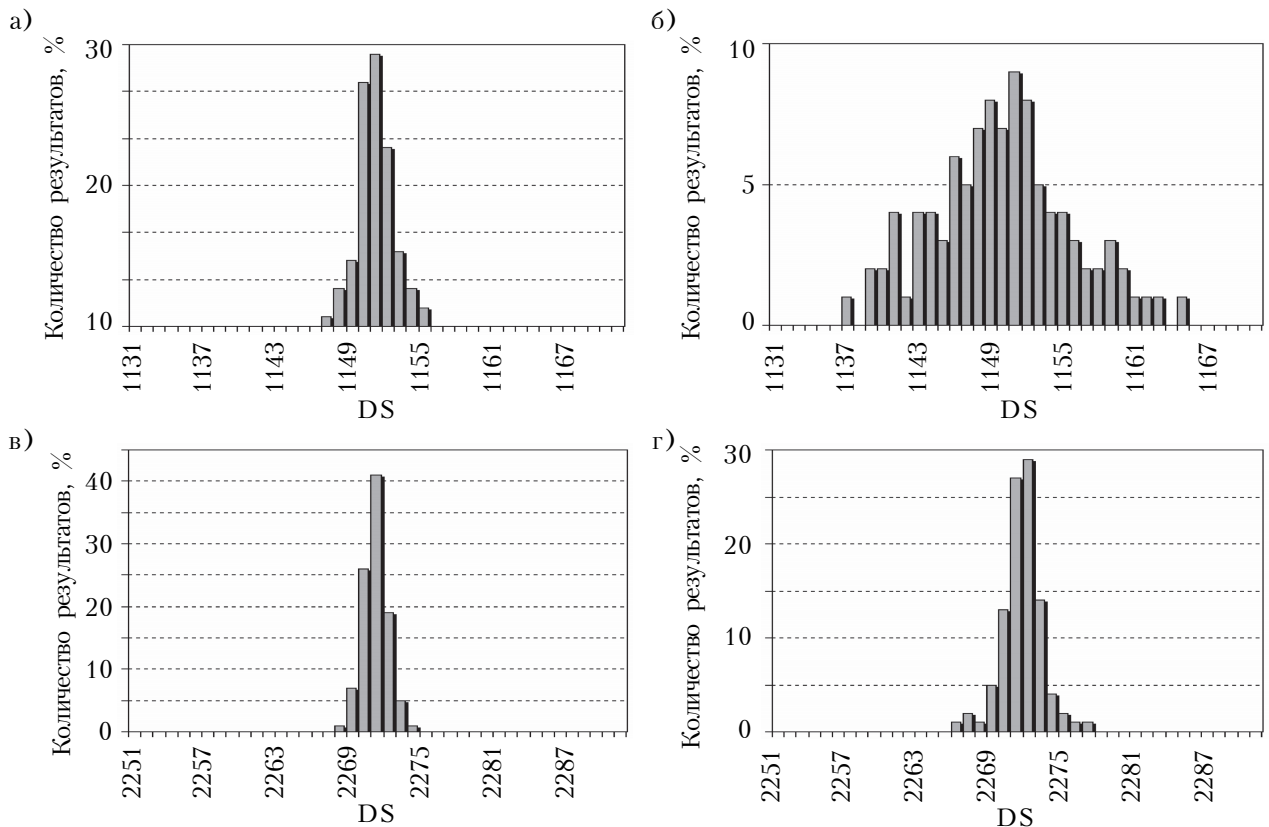


Рис. 6. Гистограммы распределения результатов аналого-цифрового преобразования сигналов от сенсора Холла при  $I_H = 1$  мА без помехи (а, в) и с ЭМ-помехой (б, г) в режиме Direct (а, б) и в режиме Bidirect (в, г)

ными направлениями тока сенсора Холла составляла  $\Delta t = 0,5$  мс.

Примеры гистограмм экспериментальных исследований распределения аналого-цифрового преобразования с одноктактным (режим Digest) и с двухтактным (режим Bidirect) измерением приведены на **рис. 6**. Измерения проводились без помехи и с ЭМ-помехой частотой 50 Гц.

Количественную оценку результатов выполнен с использованием правила “трех сигм”, согласно которому при нормальном законе распределения практически все измерения, а точнее 99,7%, лежат в интервале  $[m_x - 3\sigma; m_x + 3\sigma]$ . Тогда относительную ошибку  $\delta$  сигнального преобразования можно записать в виде

$$\delta = \left( \frac{m_x \pm 3\sigma}{m_x} - 1 \right) \cdot 100\% = \pm \frac{3\sigma}{m_x} 100\%,$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение,

$$\sigma = \sqrt{D_x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2};$$

$m_x$  — математическое ожидание,  $m_x = \sum_{i=1}^k x_i p_i$ ;

$D_x$  — дисперсия;

$n$  — количество результатов в массиве;

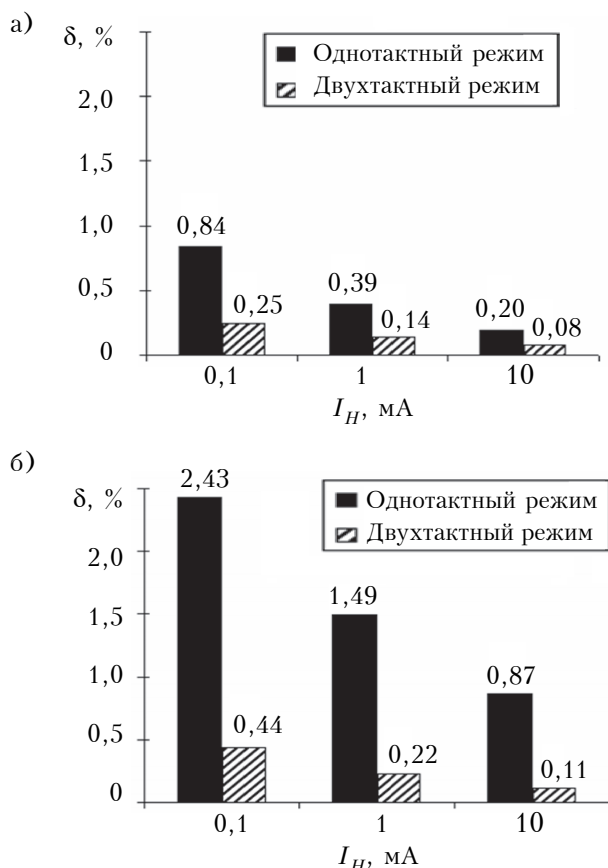


Рис. 7. Относительная ошибка сигнального преобразования без помехи (а) и с ЭМ-помехой (б) при разных режимах измерения

$x_i$  —  $i$ -й результат измерения;

$p_i$  — вероятность получения результата измерения;

$k$  — количество различных результатов измерений в серии, каждый из которых встречается с вероятностью  $p_i$ .

Поскольку анализ проводился на основе массива данных в серии из 100 измерений, вероятность  $p_i$ ; значения  $x_i$  определялась соотношением  $p_i = N(x_i)/100$ , где  $N(x_i)$  — количество полученных значений  $x_i$ . Результаты анализа приведены на **рис. 7**.

\* \* \*

Полученные результаты экспериментальных исследований показывают, что минимальное значение относительной ошибки измерения сигнала в гальваномагнитных устройствах измерения магнитного поля при отсутствии электромагнитной помехи имеет место при токе сенсора Холла  $I_H = 10$  мА и находится на уровне  $\delta \approx 0,2\%$  в режиме одноктактного измерения и  $\delta \approx 0,08\%$  в режиме двухтактного измерения. В целом, эти значения соответствуют минимально возможному разбросу сигнала DS на уровне одного-двух квантов аналого-цифрового преобразования. При уменьшении тока питания сенсора Холла относительная ошибка возрастает, что обусловлено увеличением коэффициента усиления сигнала, а следовательно — увеличением уровня шумов на выходе усилителя. Электромагнитные помехи, отрицательно влияющие на качество измерения, можно существенно уменьшать, используя метод двухтактного измерения сигнала при противоположных направлениях тока сенсоров Холла. Реализация метода обеспечивается разработанным микропроцессорным сигнальным преобразователем на основе микроконвертора ADuC841 и программно-управляемого аналогового тракта. Режим двухтактного измерения при наличии электромагнитной помехи обеспечивает повышение точности до 8 раз.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Spinelli E. M., Mayosky M. A. Two-electrode biopotential measurements: power line interference analysis // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2005. — Vol. 52, N. 8. — P. 1436–1442.
2. Akinori Ueno, Yasunao Akabane, Tsuyoshi Kato et al. Capacitive sensing of electrocardiographic potential through cloth from the dorsal surface of the body in a supine position: a preliminary study // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2007. — Vol. 54, N. 4. — P. 759–766.
3. Hotra Z., Holyaka R., Marusenkova T., Potencki J. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors // Elektronika. Poland. — 2010. — N 8. — P. 129–132.
4. Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Павлов С. В. и др. Дифференциальный термометр с высокой разрешающей способностью // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 6. — С. 19–23. [Hotra Z., Holyaka R.,

Pavlov S. et al. Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature. 2009. N 6. P. 19]

5. Lenz J., Edelstein A. S. Magnetic sensors and their applications // IEEE Sensors journal. — 2006. — Vol. 6, N. 3. — P. 631–649.

6. Fuemmeler J. A., Veeravalli V. V. Energy efficient multi-object tracking in sensor networks // IEEE Transactions on Signal Processing. — 2010. — Vol. 58, N. 7. — P. 3742–3750.

7. Bolshakova I., Holyaka R., Erashok V., Kumada M. High precision mapper for cyclotron magnet // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2004. — Vol. 14, N. 2. — P. 1818–1821.

8. Antokhin E., Bolshakova I., Holyaka R. et al. Permanent magnet system for PET cyclotron // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2008. — Vol. 18, N. 2. — P. 965–968.

9. Bolshakova I., Krukovskii S., Holyaka R. et al. Ways of providing radiation resistance of magnetic field semiconductor sensors // Radiation Physics and Chemistry. — 2001. — Vol. 61. — P. 743–745.

10. Bill Drafts. Understanding Hall Effect Devices // <http://archives.sensorsmag.com/>.

11. Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Годинюк І. М. та ін. Універсальний сигнальний перетворювач холлівських сенсорних пристроїв // Автоматика, вимірювання та керування. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». — 2012. — № 741. — С. 3–11. [Hotra Z., Holyaka R., Hodynyuk I. et al. // Avtomatyka, Vymiruvannya ta keruvannya. Visnyk Natsional'nogo universytetu "L'viv's'ka politekhnika". 2012. N. 741. P. 3]

*Дата поступления рукописи  
в редакцию 11.03 2013 г.*

Hotra Z. Yu., Holyaka R. L., Ilkanych V. Yu, Marusenkova T. A., Boyko O. V. **Electromagnetic noise-immunity improving of signal transducers based on Hall sensors.**

*Key words: Hall sensor, signal transducer, noise-immunity.*

The authors consider electromagnetic noise cancellation in galvanomagnetic magnetic field measurement devices based on Hall sensors. The paper presents the advanced microprocessor signal transducer featuring high noise-immunity, provided by two-stage signal measurement at reversed directions of Hall sensor supply current. It is shown that the use of two-stage mode at high electromagnetic interference provides the improvement of signal measurement results reproducibility up to 8 times.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

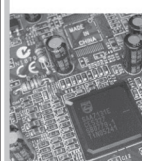
Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Ільканич В. Ю., Марусенкова Т. А., Бойко О. В. **Підвищення електромагнітної завадостійкості сигнальних перетворювачів на сенсорах Холла.**

*Ключові слова: сенсор Холла, сигнальний перетворювач, завадостійкість.*

Розглянуто ефективність заглушення електромагнітної завади в гальваномагнітних пристроях вимірювання магнітного поля на сенсорах Холла. Представлено мікропроцесорний сигнальний перетворювач з високою завадостійкістю, яка забезпечується двотактним вимірюванням сигналу при протилежних напрямках струму живлення сенсорів Холла. Показано, що при наявності значної електромагнітної завади використання двотактного режиму забезпечує підвищення відтворюваності результатів вимірювання сигналу до восьми разів.

Україна, НУ «Львівська політехніка».

**ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ**



**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА  
и ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

XIII международная специализированная промышленная выставка

**30 октября-01 ноября  
2013  
Петербургский СКК**

Организатор выставки: выставочное объединение ФАРЭКСПО

Международная выставка RADEL — специализированная выставка электронных компонентов и комплектующих, материалов, технологий, оборудования, услуг, сертификации, сервиса в радиоэлектронике и приборостроении, проходящая в Петербурге с 2001 года.

Из года в год на выставке RADEL демонстрируются современные достижения отечественных и зарубежных производителей электронных компонентов, печатных плат, приборов, источников питания, поставщиков радиоизмерительного оборудования как широкого использования, так и эксклюзивных товаров.

Выставка RADEL традиционно проходит в международном формате, в ней регулярно принимают участие компании из стран ближнего и дальнего зарубежья, таких как США, Тайвань, Китай, Беларусь, Голландия, Украина.