

А.А. Марусенков

Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ЛЦ ІКД НАН та ДКА України), Львів, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ І ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОДОКЕРОВАНОГО ДЖЕРЕЛА СТРУМУ ДЛЯ ФЕРОЗОНДОВИХ МАГНІТОМЕТРІВ

The possibilities to improve the temperature and noise parameters of the digitally controlled current source are considered. It is experimentally showed, that one of the best voltage references LTZ1000 exhibits considerable non-linearity of the temperature dependence in the uncontrolled temperature mode. The curvature-compensating circuitry is proposed. The source of the extra noise in the digital-to-analog converter AD5791 is revealed and the appropriate configuration of its inner structure is selected. Application of the obtained results and recommendations will make possible to create flux-gate magnetometers with outstanding temperature and noise parameters.

Ключевые слова: опорна напруга, ферозондовий магнітометр, температурний дрейф, шум.

Вступ

Ферозондові магнітометри (ФЗМ) широко застосовують для вимірювань слабких магнітних полів у геофізичних та космічних дослідженнях, дефектоскопії, у медичній діагностиці тощо. Однак, деякі сфери застосування, зокрема магнітокардіографія, вимагають суттєво вищої роздільної здатності вимірювань магнітної індукції. Отже, зменшення рівня власних шумів ФЗМ є вельми актуальним. Підвищення температурної стабільності зміщення нуля та коефіцієнта перетворення також дуже важливе, особливо для магнітометрів космічного призначення, а також для геофізичних приладів, які працюють у польових умовах. Нові підходи до створення ферозондового чутливого елемента, такі як застосування феродіелектричних матеріалів [1] та спеціальних режимів збудження [1, 2, 3, 4, 5], дозволяють значно зменшити рівень власних шумів ферозондових давачів (ФЗД), зокрема до 0,1 пТл/Гц^{1/2} на частоті 1 Гц [2] і з перспективою подальшого зменшення до декількох десятків фТл/Гц^{1/2} [1, 6].

У найкращих зразках ФЗД космічного призначення, поряд з низьким рівнем шуму, зміщення нуля майже не залежить від температури — в межах 1 нТл в діапазоні температур –40...+65 °С [7, 8]. Використовуючи нові аморфні магнітні матеріали [9], які пройшли оптимальну термомагнітну обробку, в ЛЦ ІКД НАН та ДКА України розроблені ферозондові давачі з рівнем власних шумів 1 та 10 пТл/Гц^{1/2} на частотах 1 та 0,01 Гц, які мають короткочасну стабільність зміщення нуля в межах 40 пТл протягом декількох годин і його температурний дрейф в межах ±1 нТл в діапазоні температур 5...40 °С.

Крім вдосконалення характеристик давача, важливо забезпечити високу температурну стабіль-

ність та малий рівень флуктуацій поля компенсації, яке усуває основну складову магнітного поля Землі в осерді перетворювача. Поле компенсації створюється шляхом пропускання електричного струму через обмотку компенсації, яку намотують на каркасі з матеріалу з малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення. У роботі розглянуті можливості побудови кодокерованого джерела струму з такими температурними і шумовими характеристиками, які б відповідали параметрам найкращих сучасних ФЗД.

Результати

Отже, метою було досягнути такі шумові характеристики поля компенсації: 0,5; 1,5 та 5 пТл/Гц^{1/2} на частотах 1; 0,1 та 0,01 Гц відповідно, що, враховуючи діапазон компенсації ±70000 нТл, становить 7,1; 22 та 71·10⁻⁹/Гц^{1/2} у відносних одиницях. Нестабільність поля компенсації не повинна перевищувати 1 нТл, або 14·10⁻⁶ у відносних одиницях, в діапазоні температур –40...+65 °С. За умови лінійної залежності температурний дрейф має бути < 0,14·10⁻⁶ 1/°С. Розглянута структура кодокерованого джерела струму, яке складається з джерела опорної напруги (ДОН), цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і перетворювача «напруга-струм». Спираючись на огляд характеристик напівпровідникових інтегральних джерел опорної напруги [10], виявлено, що лише декілька моделей мають допустимий рівень власних шумів, температурний та часовий дрейф і можуть бути застосовані у ФЗМ високого класу. Безумовний лідер за всіма вказаними параметрами — це ДОН LTZ1000, яке базується на підповерхневому стабілітроні, для термокомпенсації якого використовують напругу база-емітер

транзистора, розміщеного на тому ж кристалі. Це ДОН також має досить слабку залежність вихідної напруги від дози радіоактивного опромінення [11], що може бути важливим при застосуванні в космічній апаратурі. Досягнення рекордно малого температурного дрейфу ($0,05 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$) відбувається за рахунок регульованого підігрівання кристала і підтримання його температури в дуже вузьких межах. Через значну споживану потужність такий шлях не завжди прийнятний у ФЗМ і може виявитись недоцільним внаслідок температурної нестабільності інших вузлів ДОН. Проведені експериментальні дослідження трьох зразків ДОН показали значну нелінійність температурної залежності вихідної напруги U_{REF} в режимі термокомпенсації без стабілізації температури (рис. 1), особливо на краях температурного діапазону.

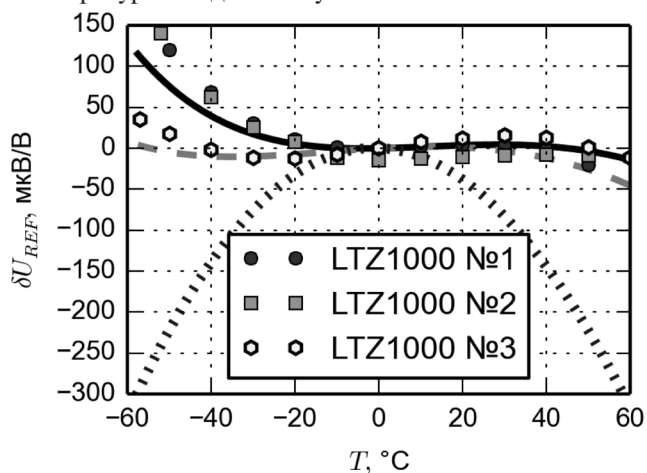


Рис. 1. Температурна залежність опорної напруги джерела LTZ1000 — результати моделювання (лінії) та експериментальні дані (маркери)

Згідно з [12] та проведеним у пакеті LTSpiceIV комп'ютерним моделюванням схеми ДОН (рис. 2, а, $r_6=0$ Ом, $R_2=18,6$ Ом, $R_3=120$ Ом, $R_4=68,1$ кОм, R_5 відсутній), очікувана нелінійність температурної залежності $U_{ге}$ (VT1) і, відповідно, U_{REF} має вигляд пунктирної кривої на рис. 1, що не узгоджується з результатами вимірювань вихідної напруги зразків LTZ1000. Краще узгодження модельної кривої (рис. 1, суцільна лінія) з результатами експерименту вдалось отримати, додавши в схему LTZ1000, наведену в технічній документації [13], резистор $r_6=15$ кОм (рис. 2, а).

Ймовірно, збільшення напруги U_{REF} при низьких температурах обумовлюється зменшенням коефіцієнта передачі струму транзистора VT1 і, оскільки струм колектора незначно залежить від температури ($\approx 0,03\%$ / $^{\circ}\text{C}$), відповідним збільшенням струму бази і спадом напруги на r_6 , R_2 та динамічному опорі VZ1. Компенсувати ефект температурної залежності струму бази, а також дещо лінеаризувати температурну залежність $U_{ге}$ (VT1) можна, задавши в колекторі VT1 струм, пропорційний до абсолютної температури кристала (так званий PTAT — proportional to

absolute temperature). В схемі на рис. 2, а це реалізоване введенням резистора R_5 . Результат моделювання модифікованої схеми (рис. 2, а, $r_6=15$ кОм, $R_2=14,5$ Ом, $R_3=120$ Ом, $R_4=30,1$ кОм, $R_5=6,2$ кОм) показані штриховою лінією на рис. 1.

Експериментальні дослідження зразка LTZ1000 № 3, увімкненого за модифікованою схемою, показали значне зменшення нелінійності температурної залежності вихідної напруги U_{REF} в діапазоні температур $25...65$ $^{\circ}\text{C}$ (рис. 2, б). Надалі планується знімати температурні характеристики модифікованої схеми у ширшому діапазоні, а також уточнити параметри елементів LTZ1000 для отримання достовірніших результатів комп'ютерного моделювання.

Як цифро-аналоговий перетворювач була обрана одна з найкращих моделей в інтегральному виконанні — 20-бітний ЦАП AD5791, температурний дрейф якого складає $0,05 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ [14]. Оскільки опис цієї мікросхеми містить суперечливі дані про рівень її власних шумів, були перевірені шумові характеристики в двох режимах увімкнення:

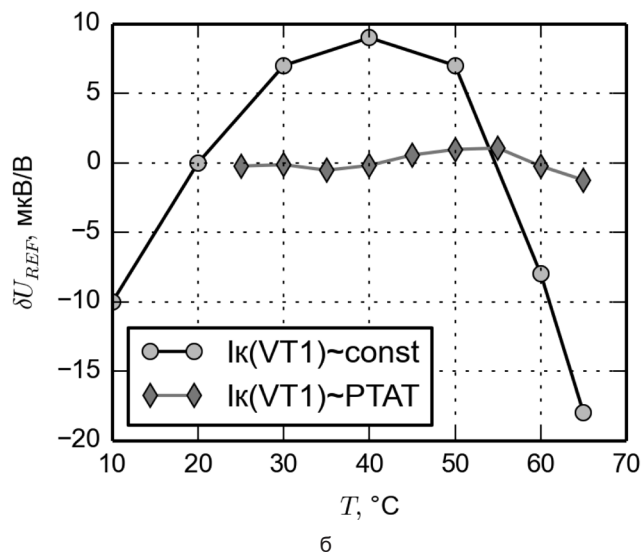
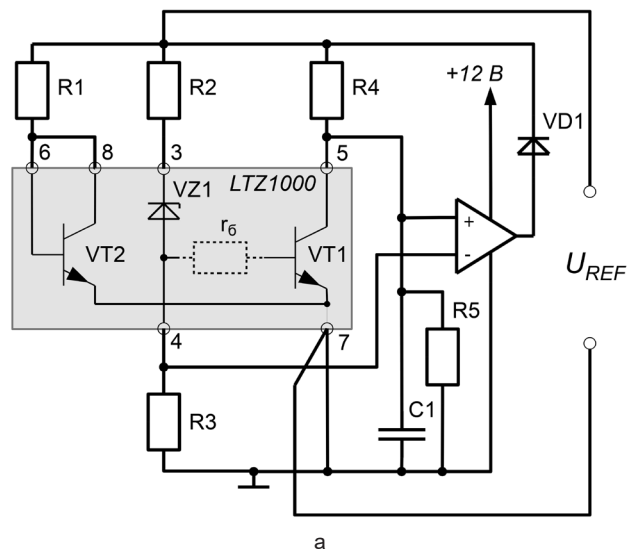


Рис. 2. а) Електрична схема увімкнення LTZ1000 та б) температурні характеристики опорної напруги залежно від режиму роботи транзистора VT1

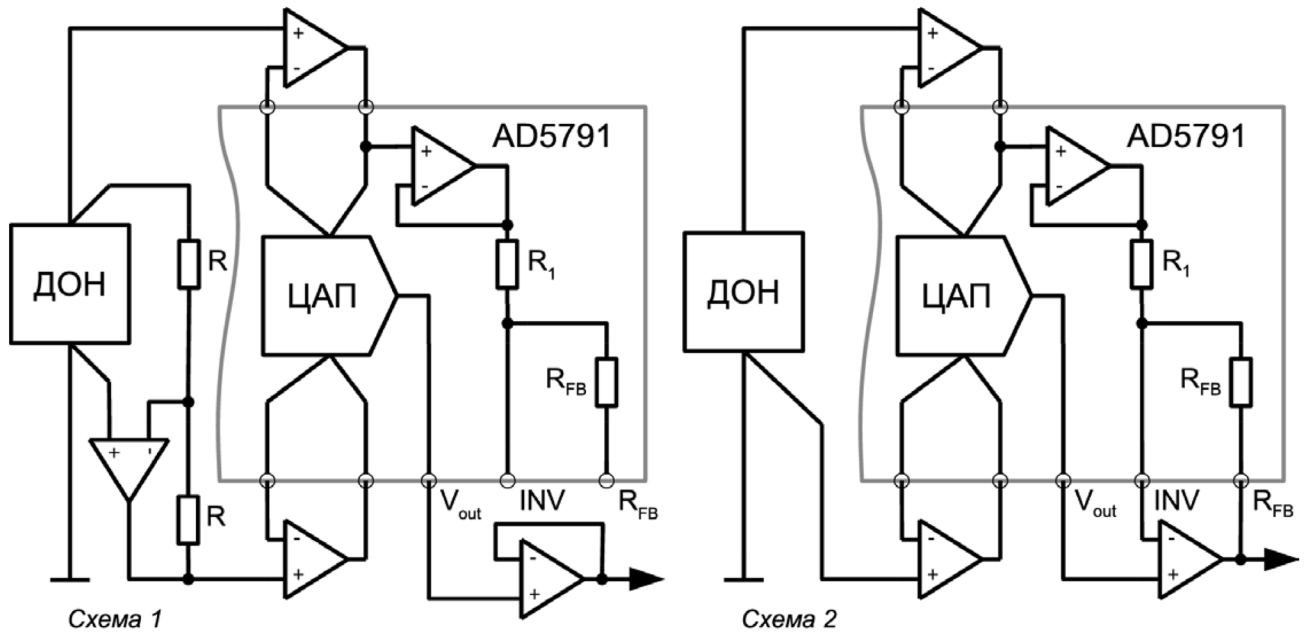


Рис. 3. Варіанти увімкнення ЦАП AD5791

Таблиця 1. Рівень власних шумів кодованого джерела струму

Частота, Гц	Відносна спектральна густина шуму, $10^{-9}/\text{Гц}^{1/2}$								Вимоги
	Опорна напруга		Вихідний струм						
	схема 1	схема 2	“0”		“MIN”		“MAX”		
1	9	9	4	8	9	16	9	9	$\leq 7,1$
0,1	22	22	7	14	22	39	22	22	≤ 22
0,01	70	70	15	42	70	150	70	70	≤ 71

з двополярним (рис. 3, схема 1) та однополярним (рис. 3, схема 2) ДОН.

В обох випадках вихід ЦАП під’єднувався до ідентичних перетворювачів «напруга-струм» з незаземленим навантаженням, які склалися з операційного підсилювача ОРА2188 [15] з малим рівнем низькочастотних шумів і високостабільних металофольгових резисторів VSMP0805 [16], які мають майже лінійний характер температурної залежності опору. Для кожного зразка у таблиці 1 подана відносна спектральна густина шуму опорної напруги ДОН, а також вихідних струмів у різних точках діапазону: в нулі (стовпчик “0”), мінімальному (стовпчик “MIN”) і максимальному значеннях (стовпчик “MAX”). Значення спектральної густини шуму, які перевищують встановлені межі, позначені напівжирним шрифтом. Перевищення вимог на частоті 1 Гц при граничних значеннях струму для обох випадків пов’язане з підвищеним рівнем шуму ДОН. Для зменшення шуму на високих частотах ндалі планується встановити фільтр низьких частот після ДОН. Шум джерела струму, який відповідає схемі 2, більший, ніж у джерела за схемою 1, і перевищує граничні значення при нульовому і мінімальному значеннях вихідного струму. Це пов’язане з додатковим шумом в резисторах R_1 , R_{FB} при протіканні через них струму. Отже, для отримання кращих

шумових характеристик AD5791 слід під’єднувати в режимі двополярного ДОН.

Висновки

В роботі розглянуті можливості вдосконалення температурних і шумових характеристик кодованого джерела струму. Експериментально показано, що вихідний сигнал одного з найкращих джерел опорної напруги LTZ1000 має суттєво нелінійну температурну залежність у режимі без стабілізації температури. Запропонований метод схемотехнічної лінеаризації температурної характеристики. Виявлене джерело надлишкового шуму в інтегральному цифро-аналоговому перетворювачі AD5791 та обрана схема його під’єднання, що усуває цей недолік. Застосування отриманих результатів і рекомендацій дозволить створити ФЗМ з рекордними шумовими й температурними характеристиками.

Список літератури

- [1] Vetoshko P.M., Valeiko V.V., Nikitin P.I. Epitaxial yttrium iron garnet film as an active medium of an even-harmonic magnetic field transducer // Sensors and Actuators A: Physical. — 2003. — V. 106. — P. 270–273.

- [2] Koch R. H., Rozen J. R. Low-noise flux-gate magnetic-field sensors using ring- and rod-core geometries // *Applied physics letters*. — 2001. — V. 73. — No 13. — P. 1897–1899.
- [3] Ioan C., Tibu M, Chiriac H. Magnetic noise measurement for Vacquier type fluxgate sensor with double excitation // *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*. — 2004. — V. 6. — No 2. — P. 705–708.
- [4] Sasada I., Kashima H. Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental Mode // *J. of the Magnetics Society of Japan*. — 2009. — V. 33. — No 2. — P. 43–45.
- [5] Paperno E. Suppression of magnetic noise in the fundamental-mode orthogonal fluxgate // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2004. — V. 116. — No 3. — P. 405–409.
- [6] Koch R. H., Deak J. G., Grinstein G. Fundamental limits to magnetic field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors // *Applied Physics Letters* — 1999. — V. 75. — No 24. — P. 3862–3864.
- [7] Merayo J. M. G., P. Brauer, F. Primdahl. Triaxial fluxgate gradiometer of high stability and linearity // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2005. — V. 120. — No 1. — P. 71–77.
- [8] Nielsen O. V., J. R. Petersen, F. Primdahl, P. Brauer, B. Hernando, A. Fernandez, J. M. G. Merayo, P. Ripka. Development, construction and analysis of the ‘Oersted’ fluxgate magnetometer // *Measurement Science and Technology*. — 1995. — V. 6. — No 8. — P. 1099.
- [9] Носенко В. К. Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоєфективних технологій // *Вісник НАН України*. — 2015. — Т. 4. — С. 68–79.
- [10] Harrison L. T. Current sources & voltage references / *Digitaler Nachdr.* — Amsterdam: Newnes, 2009.
- [11] Tsvividis Y. P. Accurate analysis of temperature effects in Ic-Vbe characteristics with application to bandgap reference sources // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. — 1980. — V. 15. — No 6. — P. 1076–1084.
- [12] Rax B. G., C. I. Lee, A. H. Johnston. Degradation of precision reference devices in space environments // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1997. — V. 44. — No 6. — P. 1939–1944.
- [13] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1000afe.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.
- [14] <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5791.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.
- [15] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2188.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.
- [16] <http://www.vishaypg.com/docs/63060/VSMMP.pdf>, ресурс доступний на 2016.06.07.

УДК 621.317.4

С.П. Шаламов

НИПКИ “Молния” НТУ “ХПИ”, Харьков, Украина

ИНДУКЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*A current meter based on the principle of electromagnetic induction. The aim of the article is to describe the design of wide band meter of magnetic field. **Methodology.** Meters based on the principle of electromagnetic induction have several advantages, such as simplicity of construction, reliability, low cost, no need in a power source, relatively high sensitivity. Creation of such a meter is necessary, because in some cases there is no possibility to use other method. Transient properties of a meter are determined by the number of turns and the constant of integration. Sensitivity is determined by measuring the number of turns, the coil sectional area, the core material and the integration constant. A meter has the rise time from 10 ns and the integration constant from 1 ms. Earlier described dependencies were used to select the main parameters of the converter. It was based on generally accepted and widely known equivalent circuit. The experience of created earlier pulse magnetic field meters was considered both for measuring the magnetic fields, and large pulse current. **Practical value.** The results of meter implementation are given. The design peculiarities of the given measuring instruments are shown.*

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, электромагнитная индукция, биэкспоненциальный импульс, калибровка индукционного преобразователя, переходная характеристика.