

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ І ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОДОКЕРОВАНОВОГО 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.*

**Ключові 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 є вельми актуальним. Підвищення температурної стабільності зміщення нуля та коефіцієнту перетворення також дуже важливе, особливо для магнітометрів космічного призначення, а також для геофізичних приладів, що працюють у польових умовах. Нові підходи щодо створення ферозондового чутливого елемента, такі як застосування феродіелектричних матеріалів [1], спеціальних режимів збудження [1, 2, 3, 4] дозволяють значно зменшити рівень власних шумів ферозондових сенсорів, зокрема, до  $0,1 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$  на частоті 1 Гц [2] і з перспективою подальшого зменшення до декількох десятків  $\text{фТл/Гц}^{1/2}$  [1, 6].

У найкращих зразках ферозондових давачів космічного призначення, поряд із низьким рівнем шуму, зміщення нуля майже не залежить від температури — в межах 1 нТл в діапазоні температур  $-40...+65 \text{ }^\circ\text{C}$  [7, 8]. Використовуючи нові аморфні магнітні матеріали [9], що пройшли оптимальну термомагнітну обробку, в ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ розроблено ферозондові давачі з рівнем власних шумів 1 та  $10 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$  на частотах 1 та  $0,01 \text{ Гц}$ , які, одночасно, мають короточасну стабільність зміщення нуля в межах 40 пТл протягом декількох годин і його температурний

дрейф в межах  $\pm 1 \text{ нТл}$  в діапазоні температур  $5...40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Крім вдосконалення характеристик сенсора, важливо забезпечити високу температурну стабільність 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 із матеріалу з малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення. У роботі розглянуто можливості побудови кодокерованого джерела струму із такими температурними і шумовими характеристиками, які б відповідали параметрам найкращих сучасних ферозондових давачів.

### Результати

Отже, поставлено за мету досягнути такі шумові характеристики поля компенсації:  $0,5; 1,5$  та  $5 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$  на частотах  $1; 0,1$  та  $0,01 \text{ Гц}$  відповідно, що, враховуючи діапазон компенсації  $\pm 70000 \text{ нТл}$ , становить  $7,1; 22$  та  $71 \cdot 10^{-9} / \text{Гц}^{1/2}$  у відносних одиницях. Нестабільність поля компенсації не повинна перевищувати  $1 \text{ нТл}$ , або  $14 \cdot 10^{-6}$  у відносних одиницях, в діапазоні температур  $-40...+65 \text{ }^\circ\text{C}$ . За умови лінійної залежності температурний дрейф має бути  $< 0,14 \cdot 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$ . Розглянуто структуру 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], знайдено, що лише декілька моделей мають допустимий рівень власних

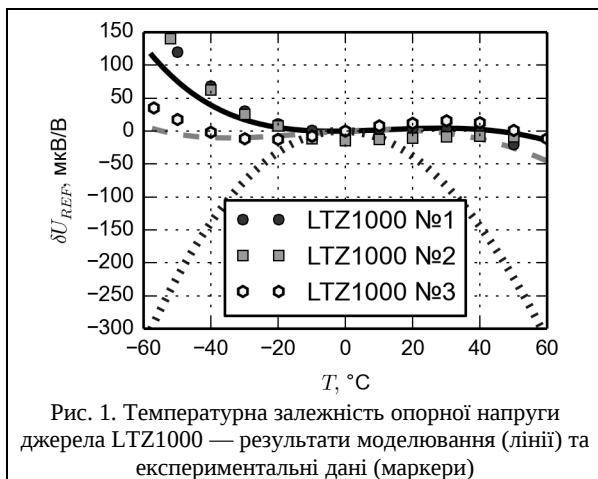


Рис. 1. Температурна залежність опорної напруги джерела LTZ1000 — результати моделювання (лінії) та експериментальні дані (маркери)

шумів, температурний та часовий дрейф і можуть бути застосовані у ФЗМ високого класу. Безумовний лідер за всіма вказаними параметрами — це джерело опорної напруги LTZ1000, що базується на підповерхневому стабілітроні, для термокомпенсації якого використовують напругу база-емітер транзистора, що розміщено на тому ж кристалі. Це джерело опорної напруги також має досить слабку залежність вихідної напруги від дози радіоактивного опромінення [11], що може бути важливим при застосуванні у космічній апаратурі. Досягнення рекордно малого температурного дрейфу ( $0,05 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ) відбувається за рахунок регульованого підігріву кристалу і підтриманні його температури в дуже вузьких межах. З огляду на значну споживану потужність, такий шлях не завжди прийнятний у ФЗМ і може виявитись недоцільним, внаслідок температурної нестабільності інших вузлів джерела опорної напруги. 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. 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  $U_{be}$  (VT1) і, відповідно,  $U_{REF}$  має вигляд пунктирної кривої на рис. 1, що не узгоджується із результатами вимірювань вихідної напруги зразків LTZ1000. Краще узгодження модельної кривої (рис. 1 суцільна лінія) із результатами експерименту вдалось отримати, додавши у схему LTZ1000, що приведена у технічній документації [13], резистор  $r_6=15$  кОм (рис. 2, а).

Ймовірно, збільшення напруги  $U_{REF}$  при низьких температурах обумовлюється зменшенням коефіцієнту передачі по струму транзистора VT1 і, оскільки струм колектора незначно залежить від температури ( $\approx 0,03 \%/^\circ\text{C}$ ), відповідним

збільшенням струму бази і спадком напруги на  $r_6$ ,  $R_2$  та динамічному опорі VZ1. Компенсувати ефект температурної залежності струму бази, а також дещо лінеаризувати температурну залежність  $U_{be}$ (VT1) можна, задавши в колекторі VT1 струм, що пропорційний до абсолютної температури кристалу (так званий PTAT — proportional to absolute temperature). В схемі на рис. 2,а це реалізовано 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) представлено штриховою лінією на рис. 1. Експериментальні дослідження зразка LTZ1000 №3, включеного за модифікованою схемою, показали значне зменшення нелінійності температурної залежності вихідної напруги  $U_{REF}$  у діапазоні температур 25...65  $^\circ\text{C}$  (рис. 2,б). У подальшому планується провести зняття температурної характеристики модифікованої схеми у ширшому діапазоні, а також уточнити параметри елементів LTZ1000 для отримання більш достовірних результатів комп'ютерного моделювання.

В якості цифро-аналогового перетворювача було обрано одну з найкращих моделей у інтегральному виконанні — 20-бітний ЦАП AD5791, температурний дрейф якого складає  $0,05 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$

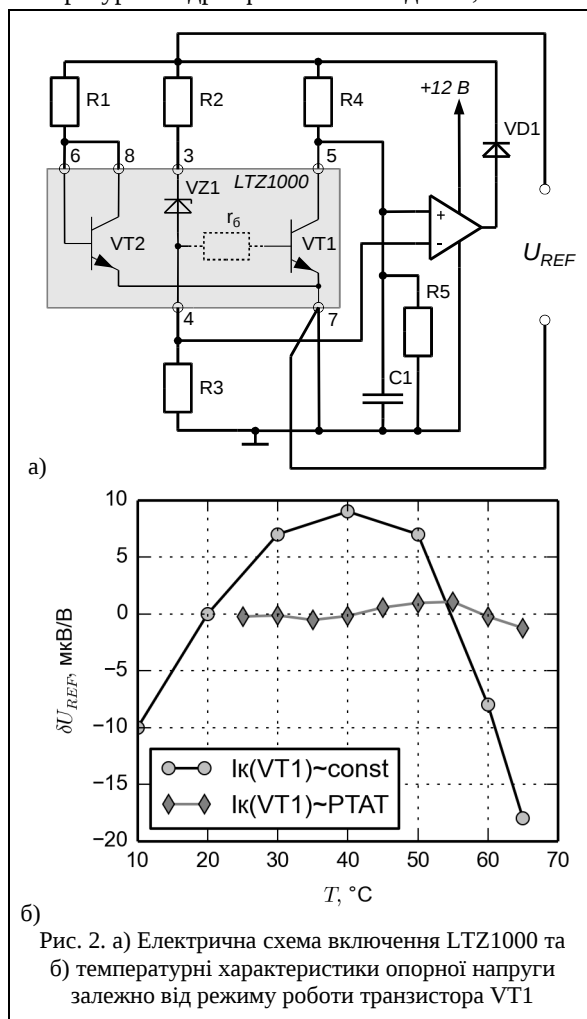


Рис. 2. а) Електрична схема включення LTZ1000 та б) температурні характеристики опорної напруги залежно від режиму роботи транзистора VT1

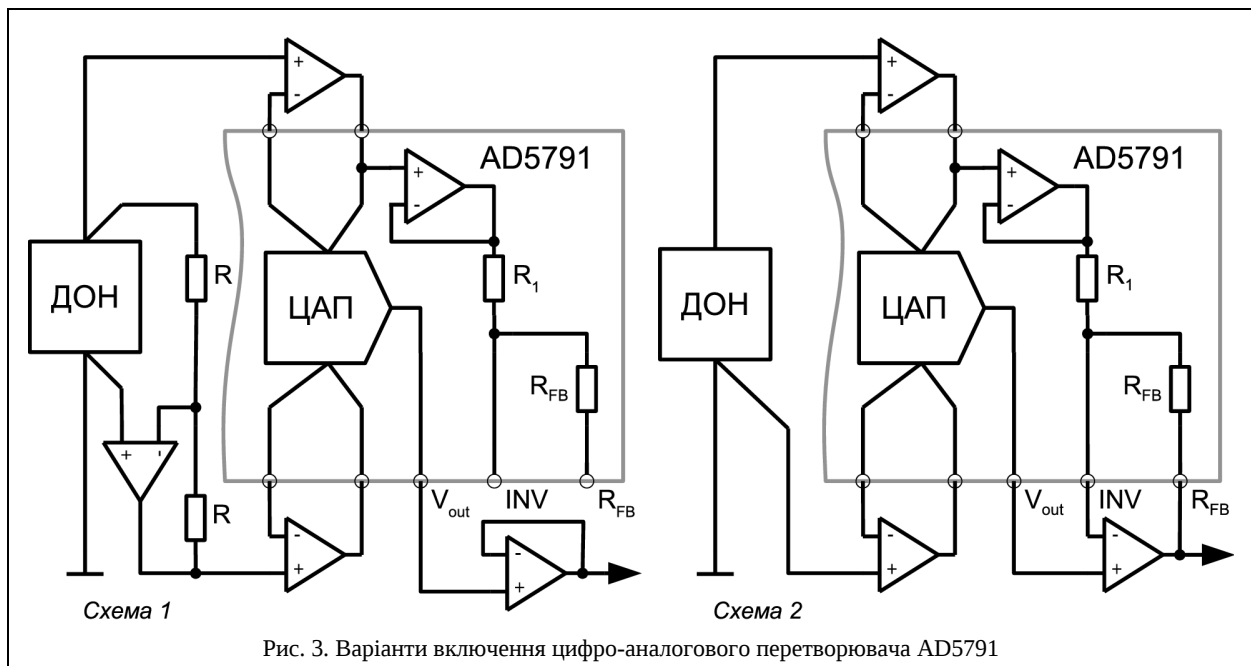


Рис. 3. Варіанти включення цифро-аналогового перетворювача AD5791

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						
			“0”		“MIN”		“MAX”		
	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2	
1	<b>9</b>	<b>9</b>	4	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>16</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	$\leq 7,1$
0,1	22	22	7	14	22	<b>39</b>	22	22	$\leq 22$
0,01	70	70	15	42	70	<b>150</b>	70	70	$\leq 71$

[14]. Оскільки опис цієї мікросхеми містить суперечливі дані щодо рівня її власних шумів, було перевірено шумові характеристики у двох режимах включення: з двополярним (рис. 3, схема 1) та однополярним (рис. 3, схема 2) джерелом опорної напруги.

В обох випадках вихід ЦАП підключався до ідентичних перетворювачів напруга-струм з незаземленим навантаженням, що склались 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 подано відносну спектральну 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, позначено напівжирним шрифтом. Перевищення вимог на частоті 1 Гц при граничних значеннях струму для обох випадків

пов’язано із підвищеним рівнем шуму джерела опорної напруги. Для зменшення шуму на високих частотах в подальшому планується встановити фільтр низьких частот після ДОН. Шум джерела струму, що відповідає схемі 2, більше ніж в джерела за схемою 1, і перевищує граничні значення при нульовому і мінімальному значеннях вихідного струму. Це пов’язано із додатковим шумом в резисторах  $R_1$ ,  $R_{FB}$  при протіканні через них струму. Отже, для отримання кращих шумових характеристик AD5791 слід підключати у режимі двополярного джерела опорної напруги.

## Висновки

В роботі розглянуто можливості вдосконалити температурні і шумові характеристики 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. Запропоновано метод схемотехнічної лінеаризації температурної характеристики. Виявлено джерело надлишкового

шуму в інтегральному цифро-аналоговому перетворювачі AD5791 та обрано схему його підключення, що усуває цей недолік. Застосування отриманих результатів і рекомендацій дозволить створити ФЗМ із рекордними шумовими і 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*, vol 106, pp 270–273, 2003.
- [2] Koch R. H., Rozen J. R., «Low-noise flux-gate magnetic-field sensors using ring- and rod-core geometries», *Applied physics letters*, vol 73, no 13, pp 1897–1899, 2001.
- [3] Ioan C., Tibu M, Chiriac H., «Magnetic noise measurement for Vacquier type fluxgate sensor with double excitation», *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol 6, no 2, pp 705–708, 2004.
- [4] Sasada I., Kashima H., «Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental Mode», *J. of the Magnetism Society of Japan*, vol 33, no 2, pp 43–45, 2009.
- [5] Paperno E., «Suppression of magnetic noise in the fundamental-mode orthogonal fluxgate», *Sensors and Actuators A: Physical*, vol 116, no 3, pp 405–409, 2004.
- [6] Koch R. H., Deak J. G., Grinstein G., «Fundamental limits to magnetic field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors», *Applied Physics Letters*, vol 75, no 24, pp 3862–3864, 1999.
- [7] Merayo J.M.G., P. Brauer, and F. Primdahl, «Triaxial fluxgate gradiometer of high stability and linearity», *Sensors and Actuators A: Physical*, vol 120, no 1, pp 71–77, 2005.
- [8] Nielsen O.V., J. R. Petersen, F. Primdahl, P. Brauer, B. Hernando, A. Fernandez, J. M. G. Merayo, and P. Ripka, «Development, construction and analysis of the 'Oersted' fluxgate magnetometer», *Measurement Science and Technology*, vol 6, no 8, p 1099, 1995.
- [9] Носенко В. К., «Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоефективних технологій», *Вісник НАН України*, vol 4, pp 68–79, 2015.
- [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», *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol 15, no 6, pp 1076–1084, 1980.
- [12] Rax B. G., C.I. Lee, A.H. Johnston, «Degradation of precision reference devices in space environments», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol 44, no 6, pp 1939–1944, 1997.
- [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.