



Горбачов Віктор Едуардович

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри прикладної фізики та наноматеріалів

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Україна

Кононенко Олексій Андрійович

студент VI курсу

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Україна

ТЕРМОСТАБІЛЬНИЙ ДАТЧИК МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ ЦИФРОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

***Анотація.** Для підвищення температурної стабільності показань датчика магнітного поля з частотним виходом у роботі застосований метод комбінації кількох чутливих елементів з однаковим знаком магнітної чутливості та протилежним знаком температурної чутливості. Експериментально підтверджено, що внесення до схеми релаксаційного генератора на одноперехідному транзисторі допоміжного магнітодіода стабілізує показання датчика магнітного поля в широкому діапазоні робочих температур і одночасно збільшує чутливість датчика в 2 рази..*

***Ключові слова:** датчик, магнітне поле, температурна стабільність.*

Вступ. Інститут інженерів електротехніки та електроніки IEEE як пріоритет світового розвитку інформаційних мереж поставив подальший розвиток концепції IoT, яка передбачає наявність повсюдної сенсорної мережі та виконавчих пристроїв на інтелектуальних об'єктах [1].

Магніточутливі прилади знайшли широке застосування як в мережах виконавчих пристроїв в якості безконтактних перемикачів, безколекторних електродвигунів постійного струму, так і в сенсорних мережах в якості електронних компасів [2], металошукачів, систем оперативної і довготривалої пам'яті [3], датчиків різних величин (тиску, переміщення, частоти обертів валу тощо).

До цього часу найпоширенішими магнітоприборами є датчики Холла, через їх наявність у будь-якому сучасному автомобілі чи смартфоні. Однак вони споживають значну енергію, а чутливість цих елементів невелика: близько $100 \text{ В}/(\text{А}\cdot\text{Тл})$, що потребує застосування додаткових підсилювачів. Крім того, показники таких приладів залежать від зовнішніх факторів, таких як температура та іонізуюче випромінювання [4]. У сучасних конструкціях високочутливих датчиків магнітного поля використовуються найскладніші передові технології, такі як спеціальні композитні матеріали з сильним п'єзоелектричним зв'язком [5], резонаторна багатошарова мікро консоль [6], ферозондові конструкція з плаваючим затвором на основі гігантського магнітоопору [7] або багатошарові гетеро структури [8]. Тому їх виробництво потребує великих енергетичних та матеріальних витрат.

Основна перевага сенсорних мереж – це можливість проводити моніторинг у важкодоступних місцях та в екстремальних умовах, при цьому показання датчика повинні не залежати від пори року або теплових режимів роботи об'єкта, тому вирішення проблеми температурної стабільності показань датчиків для таких систем є актуальним завданням в даний час [9].

Переважно усі датчики магнітного поля мають аналоговий вихід (струм чи напруга), тобто для їх поєднання з цифровими сенсорними мережами потрібен аналогово-цифровий перетворювач, який неминуче вносить спотворення в показники датчика, а сама його наявність вимагає додаткових витрат ресурсів і енергії. Тому особливий інтерес для цифрових бездротових сенсорних мереж представляють датчики з частотним виходом [10]. Ці пристрої мають ряд переваг у порівнянні з перетворювачами з аналоговим виходом, таких як можливість прямого з'єднання з цифровими системами без АЦП, відносно низька вартість, висока чутливість, можливість роботи в умовах підвищеного рівня електромагнітних перешкод, внаслідок завадо захищеності частотно модульованого сигналу.

Мета роботи. Метою цієї роботи є підвищення чутливості і стійкості до зовнішніх впливів напівпровідникового сенсора магнітного поля з частотним виходом за рахунок комбінації в одній електричній схемі декількох

магніточутливих елементів, які мають різну чутливість до різних зовнішніх впливів. Такий метод комбінації чутливих елементів у роботі застосовується до сенсора з частотним виходом на основі магніточутливого одноперехідного транзистора з додатковим магнітодіодом.

Матеріали та методи. Одноперехідний транзистор (ОПТ) має вольт-амперну характеристику S-типу (Рис. 1), через це у нього є унікальні властивості, які дозволяють створювати на його основі пристрої простіші, надійніші та ефективніші, ніж аналогічні пристрої на звичайних діодах та транзисторах. Це підтверджується наявністю виробництва одноперехідних транзисторів провідними виробниками, такими як Motorola та Philips [11].

ОПТ може знаходитися у двох стійких станах: у вимкненому і включеному. Перехід між цими станами відбувається стрибкоподібно, оскільки стан при напрузі перемикавання U_1 є нестійким (Рис. 1). Включений стан характеризується залишковою напругою U_2 (Рис. 1), яка залежить від опору бази поблизу емітерного переходу.

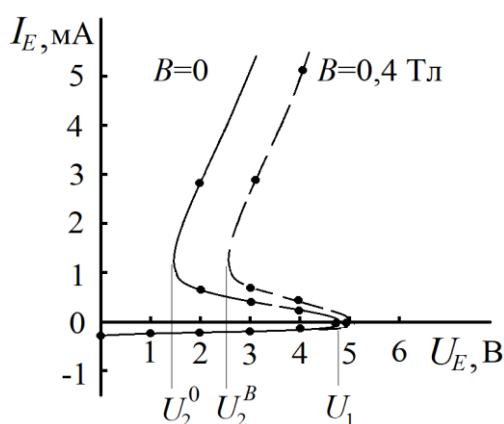


Рис. 1. Вольт-амперна характеристика ОПТ

Поки транзистор закритий магнітне поле не впливатиме на його параметри через відсутність струму, тому напруга увімкнення U_1 практично не залежить від наявності магнітного поля. У відкритому стані за наявності магнітного поля носії заряду, що інжектуються з емітера будуть відхилятися силою Лоренца від базового контакту до поверхні, де вони інтенсивно рекомбінують. При цьому опір бази поблизу емітера, а отже, і напруга U_2

збільшиться (рис. 1). Таким чином ОПТ можна використовувати в якості магніточутливого елемента навіть без зміни його конструкції, однак такий датчик має аналоговий вихід.

Датчик магнітного поля з частотним виходом може бути зібраний на одному ОПТ транзисторі (Рис. 2, а), якщо в коло емітера включити конденсатор C , що задає частоту коливань напруги генератора, і резистор R , який задає струм зарядки цього конденсатора. Резистор R_1 є навантажувальним, а R_2 обмежує струм між базами Б1 та Б2.

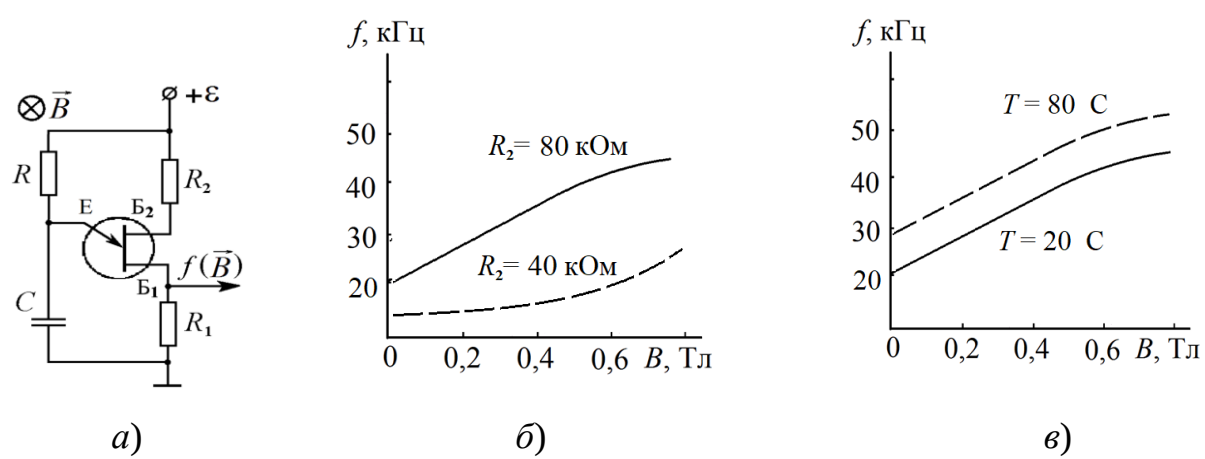


Рис. 2. Схема датчика магнітного поля на ОПТ (а) та його вихідна характеристика при різних значеннях обмежуючого резистору (б) та температури (в)

При включенні конденсатор поступово заряджається через резистор R до напруги U_1 , транзистор включається і конденсатор розряджається через емітер E до напруги U_2 , потім період повторюється. Частота коливань генератора f визначається як

$$f \approx \frac{I}{C(U_1 - U_2)} \tag{1}$$

де I – струм зарядки конденсатора, U_1 – напруга включення, а U_2 – залишкова напруга транзистора во включеному стані.

При включенні магнітного поля інжектівані з емітера в базу ОПТ носії заряду відхилятимуться силою Лоренца до поверхні і рекомбінуватимуть там

на поверхневих станах, через що опір бази ОПТ зростатиме, а отже, збільшуватиметься залишкова напруга U_2 на ОПТ (на рис. 1 $U_2^B > U_2^0$), що відповідно до (1) призводить до зростання частоти коливань генератора f .

Експериментальна перевірка роботи одно транзисторного датчика здійснювалася з використанням ОПТ типу КТ117. На рис. 2, б показана залежність вихідної частоти від магнітної індукції для датчика при напрузі живлення $\varepsilon = 20$ В з конденсатором $C = 0,01$ мкФ при різних значеннях обмежуючого резистору R_2 . Видно, що підбором значення R_2 можна досягти лінійності вихідної характеристики датчика. Справа в тому, що резистор R_2 обмежує струм між базами транзистора I_B , якій визначає напругу включення ОПТ U_1 :

$$U_1 \approx I_B \cdot r_B, \quad (2)$$

де r_B – внутрішній опір області напівпровідника між базами ОПТ.

Тому, збільшення міжбазового струму I_B за рахунок зменшення опору R_2 , як це показано на рис. 2, б, приведе до зростання напруги включення U_1 , а значить, згідно з (1), і до зменшення вихідної частоти генератора f .

Магнітна чутливість такого сенсора становить 34 Гц/Тл. Однак, експериментально встановлено, що показники датчика залежать від температури. З ростом температури опір бази транзистора r_B зменшується, що, згідно з (2), призводить до зменшення значення напруги включення U_1 , а згідно з (1) це призводить до збільшення вихідний частоти генератора f . На рис. 2, в показана експериментальна вихідна характеристика датчика магнітного поля при різних температурах. Видно, що частота генератора збільшується у разі підвищення температури. Таким чином, для температурної стабілізації показань датчика на одному ОПТ потрібні додаткові схеми температурної стабілізації, тобто додаткові витрати ресурсів та енергії.

Однак, той факт, що частота генератора залежить від величини опору резистора R_2 , який обмежує міжбазовий струм, можна використовувати для збільшення чутливості та одночасного підвищення температурної стабілізації вихідного сигналу датчика. Для цього необхідно, щоб опір R_2 у магнітному

полі збільшувався, а при підвищенні температури зменшувався.

У даній роботі для збільшення чутливості датчика і температурної стабільності його показань був використаний метод комбінації кількох чутливих елементів, які змінюють свої електричні властивості при зміні різних фізичних впливів. Для цього в коло бази ОПТ замість резистора R_2 , який обмежує міжбазовий струм було підключено магніточутливий діод (МД), який був описаний в нашій попередній роботі [12]. Магнітодіод є полярним приладом. При включенні такого МД інжектовані з p - n -переходу дірки розділяються на два потоки: один до поверхні, де дірки рекомбінують з електронами, а другий до омічному контакту n -бази. В магнітному полі струм через МД визначається напругою U та повним опором бази

$$I = \frac{U}{R_0 \pm \Delta R}, \quad (3)$$

де R_0 – опір МД при відсутності індукції магнітного поля $B = 0$, а ΔR – зміна опору в зовнішньому магнітному полі перпендикулярному до напрямку струму.

При прямому напрямку магнітного поля на інжектовані дірки діє сила Лоренца, що відхиляє їх в сторону поверхні МД, де вони рекомбінують на поверхневих станах. Відповідно, концентрація дірок в базі МД зменшується, а її опір збільшується, що відповідає знаку «плюс» в (3). При зворотній полярності магнітного поля потік дірок буде відхилятися від поверхні до омічному контакту n -бази, швидкість рекомбінації знизиться, опір бази зменшується, а у формулі (3) знак «плюс» змінюється на «мінус».

Результати та обговорення. В роботі експериментально підтверджено, що якщо в коло бази ОПТ замість опору R_2 , який обмежує міжбазовий струм включити МД при прямій полярності магнітного поля, як це показано на рис. 3, а, то при зазначеному напрямку магнітного поля інжектовані в базу МД носії заряду відхилятимуться силою Лоренца до поверхні МД де вони рекомбінують на поверхневих станах, тому струм через МД буде зменшуватися. Цей струм є міжбазовим струмом для ОПТ I_b , і його зменшення призведе до зменшення напруги включення U_1 (2), що згідно (1) буде

збільшувати вихідну частоту генератора f . Таким чином, магніточутливість сенсора збільшиться.

При експериментальних вимірах використовувалися полярні МД типу КД301. На рис. 3, б показано вихідну характеристику сенсора з МД при $C = 0,01$ мкФ, $\varepsilon = 20$ В. Додавання до схеми генератора на ОПТ додаткового МД збільшує чутливість датчика магнітного поля до 81 Гц/Тл.

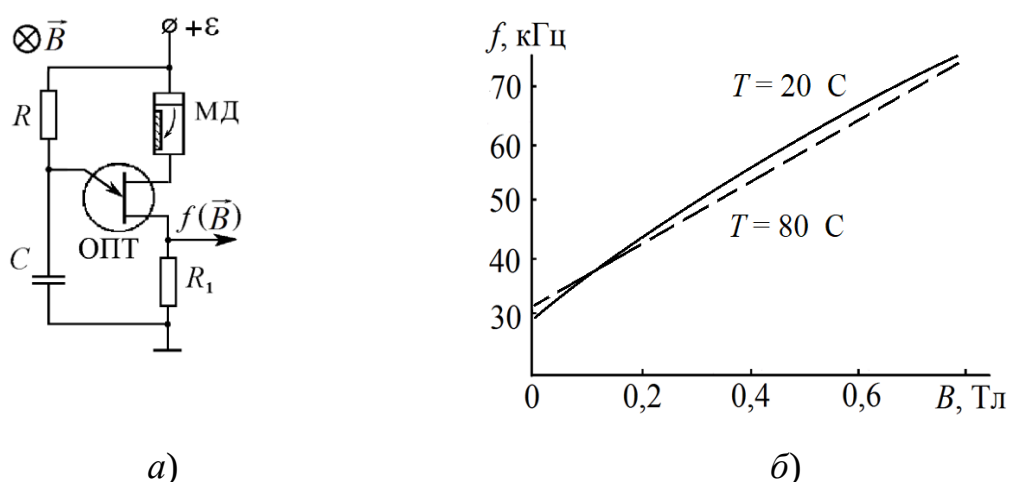


Рис. 3. Схема комбінованого датчика магнітного поля (а) та його вихідна характеристика при різних значеннях температури (б)

Разом з цим, при підвищенні робочої температури датчика струм через МД, як у будь-якого діода, збільшуватиметься, а цей струм є міжбазовим струмом для ОПТ I_b , і його збільшення призведе до збільшення напруги включення U_1 (2), що згідно (1) буде зменшувати вихідну частоту генератора f . Це компенсуватиме збільшення частоти генератора при підвищенні робочої температури ОПТ, яке показано на рис. 2, в. На рис. 3, б показана вихідна характеристика датчика магнітного поля на ОПТ з додатковим МД при різних температурах. Експерименти показали, що вихідна частота генератора в діапазоні від -20 C до $+80$ C змінюється не більше ніж на 2,1 %.

Висновки. Ефективність методу комбінації кількох чутливих елементів збільшення магнітної чутливості датчика експериментально підтверджена на прикладі датчика магнітного поля на базі ОПТ. Експериментально встановлено, що якщо комбінувати магніточутливі елементи, які мають

однакову магнітну, але протилежну температурну чутливість, то можна конструювати високочутливі та термостабільні датчики магнітного поля без втрат енергоефективності, оскільки при незначному збільшенні споживаної потужності виходить значне збільшення чутливості приладів.

Експериментально досліджено залежність вихідної частоти від магнітної індукції зовнішнього поля для датчика на основі ОПТ у комбінації з МД у схемі релаксаційного генератора. Застосування додаткового МД збільшує магнітну чутливість сенсора з частотним виходом у 2 рази порівняно з датчиком на одному ОПТ та стабілізує вихідну частоту датчика в широкому діапазоні температур від -20 C до $+80\text{ C}$.

Описаний прилад може бути використаний як датчик магнітного поля в цифрових сенсорних мережах, оскільки в його конструкції використовується тільки стандартна недорога елементна база, і через частотний вихід він легко інтегрується в цифрові мережі, дуже енергоефективний і має підвищену термостабільність.

Список джерел:

1. Park B., Nah J., Choi J., Yoon I. Robust Wireless Sensor and Actuator Networks for Networked Control Systems. *Sensors (Basel)*, 2019. Vol. 19. No. 7:1535, P. 1–28. DOI: 10.3390/s19071535.
2. Luong V. S., Lu C. C., Yang J. W., Jeng J. T. A novel CMOS transducer for giant magnetoresistance sensors. *Review of Scientific Instruments*. 2017. Vol. 88. No. 2:025004. DOI: 10.1063/1.4976025.
3. Li Z. R., Mi W. B., Bai H. L. The contribution of distinct response characteristics of Fe atoms to switching of magnetic anisotropy in Fe₄N/MgO heterostructures. *Applied Physics Letters*, 2018. Vol. 113. No. 13:132401. DOI: 10.1063/1.5048317.
4. Zhang Y., Hao Q., Xiao G. Low-Frequency Noise of Magnetic Sensors Based on the Anomalous Hall Effect in Fe-Pt Alloys. *Sensors*, 2019. Vol. 19. No. 16:3537. P. 1–6. DOI: 10.3390/s19163537.
5. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. Magnetoelectric Magnetometers. in: Grosz A., Haji-Sheikh M., Mukhopadhyay S. (eds) *High Sensitivity Magnetometers. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation*. Cham: Springer, 2017. Vol 19. P 127–166. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8>.

6. Ding J., Huang L., Luo G., et al. A resonant microcantilever sensor for in-plane multi-axis magnetic field measurements. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019. Vol. 29. No. 6:065010. DOI: 10.1088/1361-6439/ab18ed.
7. Luong V. S., Tuan N. A., Tue N. A. Exchange Biased Spin Valve-Based Gating Flux Sensor. *Measurement*, 2018. Vol. 115. P. 173-177.
8. Jibiki Y., Goto M., Tsujikawa M., et al. Interface resonance in Fe/Pt/MgO multilayer structure with large voltage controlled magnetic anisotropy change. *Applied Physics Letters*, 2019. Vol. 114. No. 8:082405. DOI: 10.1063/1.5082254.
9. Singh R., Luo Z., Lu Z., et al. Thermal stability of NDR-assisted anomalous Hall effect based magnetic device. *Journal of Applied Physics*, 2019. Vol. 125. No. 20:203901. DOI: 10.1063/1.5088916.
10. He G., Zhang Y., Qian L., et.al. PicoTesla magnetic tunneling junction sensors integrated with double staged magnetic flux concentrators. *Applied Physics Letters*, 2018. Vol. 113. No 24:022402. DOI: 10.1063/1.5052355.
11. Silicon unijunction transistor 2N2646. Philips Semiconductors. Preliminary specification.; 2N2647. Motorola Semiconductor Datasheet Library. Режим доступу: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/2N2646.pdf>.
12. Кононенко О. А., Горбачов В. Е. Методи температурної стабілізації датчиків магнітного поля в цифрових сенсорних мережах. *XI Міжнародна науково-практична конференція «Технічне регулювання, метрологія, інформаційні та транспортні технології», Одеса, 22-23 жовтня. 2021. С. 78-81.*