

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЕЛЕМЕНТОМ ХОЛЛА ТА ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Вінницький національний технічний університет

## *Анотація.*

*Розроблено пристрій для вимірювання індукції магнітного поля, який складається з елемента Холла та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів. На основі математичного моделювання електричних характеристик розробки, отримано аналітичний вираз для функції перетворення та значення чутливості в трьох піддіапазонах.*

**Ключові слова:** пристрій для вимірювання індукції магнітного поля, частотний перетворювач, елемент Холла, функція перетворення.

## *Abstract.*

A device for measuring magnetic field induction was developed, which consists of a Hall element and a frequency converter based on two bipolar and field-effect transistors. Based on the mathematical modeling of the electrical characteristics of the development, an analytical expression for the transformation function and the sensitivity value in three sub-ranges was obtained.

**Keywords:** device for measuring magnetic field induction, frequency converter, Hall sensor, conversion function.

## **Вступ**

Вимірювання індукції магнітного поля є важливим з багатьох причин. Наведемо кілька з них. Вимірювання індукції магнітного поля є важливим для забезпечення безпеки працівників, які працюють з електричними пристроями, трансформаторами, електродвигунами та іншими пристроями, що створюють магнітне поле. Вимірювання індукції магнітного поля важливе для виробництва електротехнічних виробів, де рівень магнітного поля може впливати на ефективність та надійність роботи пристроїв. В сфері науки, вимірювання індукції магнітного поля допомагає дослідникам вивчати магнітні властивості різних матеріалів та встановлювати закономірності їх роботи. Також вимірювання індукції магнітного поля як характеристики магнітного поля є важливим для задач в області створення і забезпечення функціонування систем навігації, орієнтації і стабілізації; екранування квантових комп'ютерів та інших сферах діяльності.

Одним із основних складових вимірювальних пристроїв є сенсор, який може складатися з двох ключових елементів: чутливий елемент і спеціальна схема обробки вихідного сигналу чутливого елемента (перетворювач, буферний каскад), що залежить від специфіки застосування пристрою.

Виходячи з вище сказаного, перспективним науковим напрямком є розробка та створення пристроїв вимірювання індукції магнітного поля в яких використовуються напівпровідникові сенсори з автогенераторними частотними перетворювачами, що дозволяють підвищити чутливість сенсору.

## **Теоретичні та експериментальні дослідження**

Відомо, що чутливість пристроїв для вимірювання індукції магнітного поля залежить насамперед від чутливих елементів, конструктивного рішення, принципу дії та технології виготовлення [1, 2].

Метою дослідження є розробка пристрою з частотним виходом для вимірювання індукції магнітного поля на основі напівпровідникових структур з диференційним опором (рис. 1).

Схема складається з магніточутливого елемента Холла, польового двозатворного транзистора і двох біполярних транзисторів. Разом ці всі активні елементи з допоміжними резисторами та конденсаторами, створюють автогенераторний прилад, частота генерації на виході якого змінюється

в залежності від напруги на затворі транзистора VT1. Транзистор VT3, конденсатор C1 та резистор R8 утворюють активну індуктивність частотно перетворювача. Реалізація активної індуктивності може бути виконана в інтегральному виконанні, що відповідає сучасному технологічному процесі виготовлення інтегральних мікросхем [3].

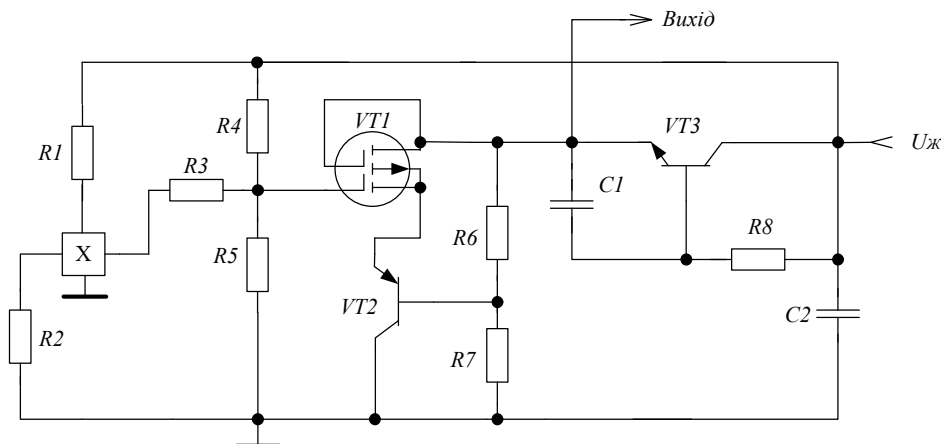


Рис. 1. Електрична схема пристрою для вимірювання індукції магнітного поля

Отримана функція перетворення пристрою має такий вигляд

$$F(B) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1^2 + R_B(B)A_1C_{DS2} - L_{EKV}C_{DS2} + A_2}{2L_{EKV}C_{DS2}A_1^2}},$$

де  $A_1 = C_B(B)R_B(B)$ ;

$$A_2 = \sqrt{A_1^2 + R_B(B)A_1C_{DS2} - L_{EKV}C_{DS2}}^2 + 4L_{EKV}C_{DS2}A_1^2;$$

$L_{EKV}$  – еквівалентна індуктивність транзисторного аналога індуктивності;

$C_B(B)$  – еквівалентна ємність елемента Холла;

$R_B(B)$  – еквівалентний опір елемента Холла;

$C_{DS2}$  – ємність переходу (стік-витік) двозатворного транзистора.

Для теоретичної функції перетворення радіовимірювального перетворювача індукції магнітного поля при напрузі живлення 5В, проведемо її лінійаризацію [4]. Розіб'ємо діапазон вимірювання на три піддіапазони: перший - 0...0,2 Т; другий - 0,2...0,8 Т; третій 0,8...1 Т.

Графік функції перетворення та апроксимовані прямі в піддіапазонах наведено на рис. 2.

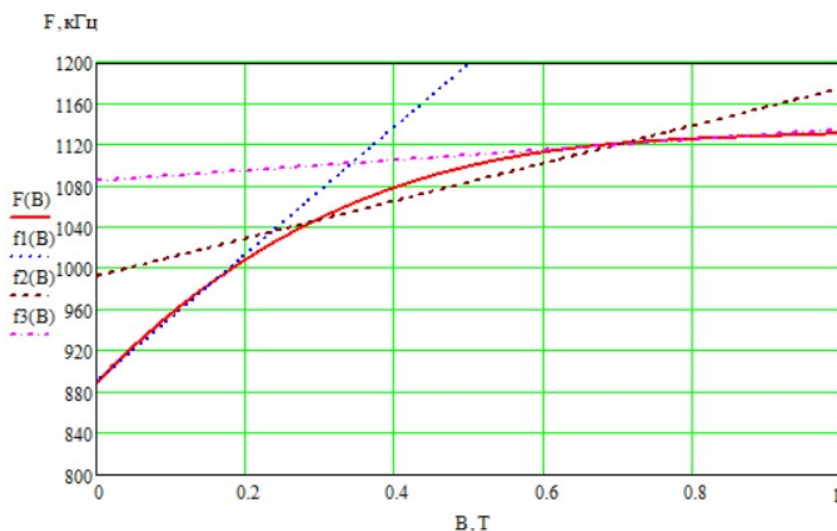


Рис. 2. Графіки теоретичної функції перетворення та прямих її лінійаризації в піддіапазонах.

Використовуючи математичний пакет MathCad отримаємо наступні вирази для функції перетворення в піддіапазонах:

$$f_1(B) = 620B + 889 ;$$

$$f_2(B) = 183B + 992 ;$$

$$f_3(B) = 50B + 1085 .$$

Таким чином, при лінеаризації функції перетворення ми отримуємо наступні значення чутливості в піддіапазонах:

$$0-0,2 \text{ Т: } S_1(B) = 620 \text{ Гц/мТл};$$

$$0,2-0,8 \text{ Т: } S_2(B) = 183 \text{ Гц/мТл};$$

$$0,8-1 \text{ Т: } S_2(B) = 50 \text{ Гц/мТл}.$$

Проведемо розрахунок максимальної похибки нелінійності для кожного піддіапазону за формулою:  $\gamma_H = \Delta_{\max} / |f_B - f_H|$ , де  $\Delta_{\max}$  - максимальне відхилення функції перетворення від статичної характеристики,  $f_B, f_H$  - значення функції перетворення в кінці та на початку піддіапазону. Підставляючи чисельні значення отримаємо для кожного піддіапазону:  $\gamma_{H1} = 0,041$ ;  $\gamma_{H2} = 0,13$ ;  $\gamma_{H3} = 0,05$ .

Зменшити похибку нелінійності ми можемо за рахунок розбиття на більшу кількість піддіапазонів. Але в кожному конкретному випадку потрібно визначати, чи доцільно це робити.

### Висновки

Розроблено пристрій для вимірювання індукції магнітного з елементом Холла та частотним перетворювачем на основі двох біполярних та одного польового транзисторів. Проведено математичне моделювання пристрою, на основі якого визначені аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально встановлено, що при зміні індукції магнітного поля в діапазоні 0 мТл ... 1000 мТл, отримано зміну частоти вихідного сигналу в діапазоні 890 кГц ... 1135 кГц. При розбитті діапазону вимірювання на три піддіапазони та проведення лінеаризації функції перетворення встановлено, що найменша нелінійна похибка є в піддіапазоні 800-1000 мТл і становить 5%.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. P. Ripka, M.M. Arafat. Magnetic Sensors: Principles and Applications, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Vol. 2, 2019. – P. 351-390. <https://doi.org/10.1016/B978-008043152-9.02158-8>
2. Tabbi Wilberforce, Mohammad A. Abdelkareem, Mohamad Ramadan, Abdul-Ghani Olabi, Enas T. Sayed, Khaled Elsaid, Hussein M. Maghrabie. Spintronic Materials and Devices, Encyclopedia of Smart Materials. Vol. 3, 2022. – P. 192-199. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00150-9>
3. Осадчук О. В., Притула М.О., Коваль К. О. Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на транзисторній структурі, Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління». – №2, 2016. – С. 15–19.
4. Dhiren K. Pradhan, Shalini Kumari, Philip D. Rack, Ashok Kumar. Applications of Strain-Coupled Magnetoelectric Composites, Encyclopedia of Smart Materials. Vol. 4, 2022. – P. 229-238. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00048-6>
5. Осадчук О. В., Притула М.О., Коваль К. О., Семенов А.О. Comparative Analysis of Radiomeasuring Frequency Converters of the Magnetic Field. Тези доповіді Міжнародної конференції TCSET'2016 «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science. TCSET'2016», Lviv-Slavske, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – С. 275–278

**Осадчук Олександр Володимирович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [osadchuk.av69@gmail.com](mailto:osadchuk.av69@gmail.com)

**Притула Максим Олександрович** – к.т.н., старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [pritulamo@ukr.net](mailto:pritulamo@ukr.net)

**Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Head of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [osadchuk.av69@gmail.com](mailto:osadchuk.av69@gmail.com)

**Prytula Maksym Oleksandrovych** - Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [pritulamo@ukr.net](mailto:pritulamo@ukr.net)