

# МАГНІТОМЕТР З ПАРАМЕТРИЧНИМ ДАТЧИКОМ МАГНІТНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ

*Юрій Хомяк, к.т.н., доц., Іван Корнєв, аспірант*  
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків,*  
*Україна*  
e-mail: [Yurii.Khomiak@khpi.edu.ua](mailto:Yurii.Khomiak@khpi.edu.ua), [Ivan.Korniev@infiz.khpi.edu.ua](mailto:Ivan.Korniev@infiz.khpi.edu.ua)

## Анотація

У роботі описано розробку та експериментальне дослідження магнітометра, що базується на параметричному сенсорі магнітної індуктивності, вбудованому в автоколивальний LC-контур. Чутливим елементом слугує одношарова котушка з осердям із м'якого феромагнетика, індуктивність якого варіюється під впливом зовнішнього магнітного поля. Така зміна індуктивності призводить до зміщення частоти генерації, що забезпечує можливість вимірювання магнітного поля шляхом фіксації частотних змін. Запропонована сенсорна система характеризується компактністю, низьким енергоспоживанням та демонструє стабільні, повторювані й монотонні характеристики в широкому діапазоні індукцій. Проведені експериментальні дослідження із застосуванням каліброваного соленоїда підтверджують високу чутливість пристрою та мінімальні прояви гістерезису. Запропонований підхід є економічно доцільною та цифрово сумісною альтернативою традиційним ферозондовим магнітометрам, що відкриває перспективи для його використання в промислових вимірювальних системах, польовій діагностиці та електромагнітних вимірюваннях.

## Ключові слова

Магнітометр, LC-генератор, магнітна проникність, параметричний індуктивний датчик, м'який магнітний матеріал, вимірювання магнітного поля, електромагнітний неруйнівний контроль, флюксгейт.

## 1. Вступ

Вимірювання магнітного поля відіграють ключову роль у багатьох наукових і технічних галузях, зокрема в неруйнівному контролі (НДК), біомедичній діагностиці, авіаційно-космічних технологіях, навігаційних системах, енергетичних мережах і промисловій автоматизації [1–3]. Протягом останніх років спостерігається зростання попиту на магнітні датчики, здатні забезпечувати високу чутливість і стабільність у статичних або повільно змінних полях. Така тенденція пов'язана з прогресом у галузі мікроелектроніки, розвитком компактних вбудованих систем та необхідністю здійснювати моніторинг електромагнітного середовища в реальному часі.

Одними з найпоширеніших і найнадійніших сенсорів для низькопольних застосувань є ферозондові магнітометри. Принцип їхньої роботи базується на використанні нелінійних властивостей намагнічування м'яких феромагнітних матеріалів під дією змінних і постійних магнітних полів. Класичні схеми таких магнітометрів містять дві котушки: збуджувальну, яка періодично насичує магнітне осердя, і вимірювальну, що реєструє гармоніки індукованої напруги. Зокрема, друга гармоніка сигналу використовується для визначення величини зовнішнього постійного магнітного поля [2], [4].

Флюксгейтові (флюксенові) магнітометри вирізняються високою чутливістю та спрямованою селективністю, що робить їх незамінними в геофізичних дослідженнях, інерціальних навігаційних системах і космічних місіях [5]. Проте їх реалізація потребує складних схем збудження та демодуляції сигналів, а також точного вирівнювання елементів, що може ускладнювати конструкцію, підвищувати енергоспоживання й вартість системи.

У цій роботі представлено спрощену конструкцію магнітометра з однією котушкою, розроблену за аналогією з принципом феромагнітного затвора. Запропонований пристрій зберігає основний принцип вимірювання — зміни магнітної проникності м'якого феромагнітного осердя під впливом зовнішнього поля — але усуває складність двокотушкових систем. Датчик функціонує як параметричний індуктивний елемент, вбудований у автогенераторний LC-контур. При дії зовнішнього магнітного поля змінюється проникність осердя, що викликає варіацію індуктивності котушки. Ця зміна зумовлює зсув власної частоти генератора, що дозволяє оцінювати величину магнітного поля за зміною частоти [3], [6].

Метод вимірювання, заснований на частотному принципі, має низку переваг. По-перше, він менш чутливий до амплітудного шуму та коливань зовнішнього середовища, які зазвичай впливають на аналогові вимірювальні системи. По-друге, така схема забезпечує просту інтеграцію з цифровими лічильниками або мікроконтролерними платформами без потреби у складній обробці сигналу. Крім того, використання лише однієї котушки зменшує кількість компонентів, спрощує конструкцію та знижує енергоспоживання, що робить

прилад придатним для портативних або вбудованих застосувань [6].

174

*Рис. 1. Концептуальний ланцюг перетворень у запропонованому датчику: напруженість магнітного поля модулює проникність осердя, що впливає на індуктивність та зміщує частоту генератора*

Попередні дослідження авторів охоплювали багатокомпонентні ферозондові системи, зокрема фазово-імпульсний магнітний датчик [7], який показав перспективні результати. У цьому ж дослідженні реалізовано концепцію спрощеного підходу — як у схемотехнічному виконанні, так і у способі залежності параметрів пристрою від магнітного поля.

На відміну від складних систем, описаних у [8–13], запропонована конструкція не потребує окремих вузлів збудження та детектування, а базується на використанні нелінійних властивостей магнітного гістерезису матеріалу осердя. Саме характеристики кривої В–Н визначають робочий режим сенсора та його реакцію на зовнішнє магнітне поле.

Основу роботи пристрою становить ланцюг перетворення.

Таке перетворення реалізує переваги простої та надійної обробки сигналів у частотній області, що робить його більш стабільним порівняно з амплітудними методами вимірювання. У результаті запропонований датчик забезпечує ефективне й компактне виявлення змін магнітного середовища, усуваючи складність, притаманну традиційним ферозондовим схемам.

## 2. Недоліки

Аналіз існуючих підходів до вимірювання магнітного поля показує, що традиційні ферозондові магнітometri, попри високу чутливість і надійність, мають низку суттєвих недоліків, які обмежують їх застосування:

1. Класичні ферозондові магнітometri потребують двох котушок — збуджувальної та вимірювальної, що ускладнює конструкцію, збільшує габарити та кількість з'єднань.
2. Ферозондові магнітometri вимагають спеціальних схем збудження, демодуляції та синхронного детектування сигналів, що підвищує складність і вартість електронної частини приладу.
3. Для забезпечення стабільності вимірювань і мінімізації паразитних сигналів потрібно ретельне вирівнювання котушок та елементів осердя, що ускладнює виробництво й калібрування.
4. Амплітудні методи вимірювання схильні до впливу шумів, температурних коливань і нестабільності джерела живлення, що знижує точність результатів.
5. Через складність електроніки та багатокомпонентність конструкцій зростає собівартість приладів і обмежується можливість масового виробництва.

## 3. Цілі

Метою даної роботи є розробка, побудова та експериментальна перевірка магнітметра, що використовує параметричний сенсор магнітної індуктивності, інтегрований в автоколивальний LC-контур, для вимірювання зовнішнього магнітного поля за частотним принципом.

## 4. Конструкція сенсора

Чутливим елементом розробленого магнітметра є параметричний датчик магнітної індуктивності, виконаний у формі циліндричної котушки з осердям із м'якого феромагнітного матеріалу. Конструкція датчика зображена на рис. 2.



*Рис.2. Внутрішня структура параметричного датчика магнітної індуктивності: одношарова котушка, намотана на циліндричний феромагнітний сердечник*

Котушка намотана у два шари на пластиковому каркасі діаметром 2,5 мм. Її довжина становить 25 мм, а обмотка виконана з емальованого мідного дроту діаметром 0,2 мм. У центральну частину котушки вставлена феромагнітна стрічка розміром  $43,7 \times 1,4 \times 0,1$  мм, яка виконує роль активного магнітного осердя.

Для забезпечення точного центрування та механічної стабільності під час калібрування вся збірка розміщена в циліндричному пластиковому корпусі, який щільно входить у стандартний соленоїд з внутрішнім діаметром 13 мм (рис. 3).



Рис.3. Параметричний датчик магнітної індуктивності, укладений у пластиковий корпус для вирівнювання всередині калібрувального соленоїда

Матеріал осердя було досліджено за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізатора SciAps X-200. Елементний склад представлено в таблиці I. Високий вміст нікелю та заліза, доповнений домішками молібдену й кремнію, свідчить про належність матеріалу до класу пермалоїв або супермалоїв, які характеризуються високою магнітною проникністю та малою коерцитивною силою. Такі властивості є критично важливими для забезпечення високої чутливості індуктивних магнітних датчиків..

Таблиця 1. Елементний склад феромагнітного осердя

| <i>Element</i>  | <i>Content (wt. %)</i> | <i>± Δ</i> |
|-----------------|------------------------|------------|
| Ni (Nickel)     | 73.659%                | ±0.209     |
| Fe (Iron)       | 14.869%                | ±0.082     |
| Mg (Magnesium)  | 4.121%                 | ±0.795     |
| Mo (Molybdenum) | 3.490%                 | ±0.022     |
| Si (Silicon)    | 2.873%                 | ±0.085     |
| Mn (Manganese)  | 0.494%                 | ±0.022     |
| Cu (Copper)     | 0.234%                 | ±0.028     |
| Ti (Titanium)   | 0.100%                 | ±0.040     |
| Co (Cobalt)     | 0.085%                 | ±0.035     |
| Y (Yttrium)     | 0.074%                 | ±0.006     |

На відміну від звичайних ферозондових магнітометрів, які потребують окремих обмоток збудження та вимірювання, цей датчик використовує одну котушку. Індуктивність котушки змінюється залежно від напруженості зовнішнього магнітного поля через зміни проникності осердя. Ця зміна індуктивності зміщує частоту LC-генератора, в який вбудована котушка, що дозволяє вимірювати магнітне поле за допомогою відстеження частоти.

## 5. Схема генератора

Параметричний датчик магнітної індуктивності інтегровано до самозбуджуваного LC-генератора [14,15], структурна схема якого наведена на рис. 4. Котушка датчика  $L_f$  разом із паралельно підключеним конденсатором  $C_f$  утворює резонансний контур генератора. Зміна магнітної проникності феромагнітного осердя під дією зовнішнього магнітного поля спричиняє варіацію індуктивності  $L_f$ , що, у свою чергу, зумовлює зсув вихідної частоти генератора. Вимірювана частота слугує інформативним параметром, за яким визначається напруженість магнітного поля.

Генератор реалізовано на основі п'яти біполярних транзисторів (BJT), виконаних у дискретній конфігурації. Транзистори VT1 і VT2 формують коливальний каскад із регенеративним підсиленням, тоді як елементи VT4 та VT5 виконують функції буферного та вихідного підсилювачів відповідно.

Стабілізацію амплітуди коливальних забезпечує нелінійна петля зворотного зв'язку, до складу якої входять резистор R8, конденсатор C4, діоди VD1 і VD2, а також транзистор VT3. Такий механізм обмежує амплітуду напруги на LC-контурі до приблизно 100 мВ, запобігаючи насиченню магнітного осердя.

Запропонована схема характеризується широким робочим діапазоном параметрів індуктивності та ємності. Стабільне функціонування підтверджено для значень  $L_f$  у межах від 50 мкГн до 100 мГн та  $C_f$  від 50 пФ до 5 мкФ. Така варіативність параметрів забезпечує високу адаптивність генератора до різних типів сенсорів і рівнів зовнішнього магнітного поля.

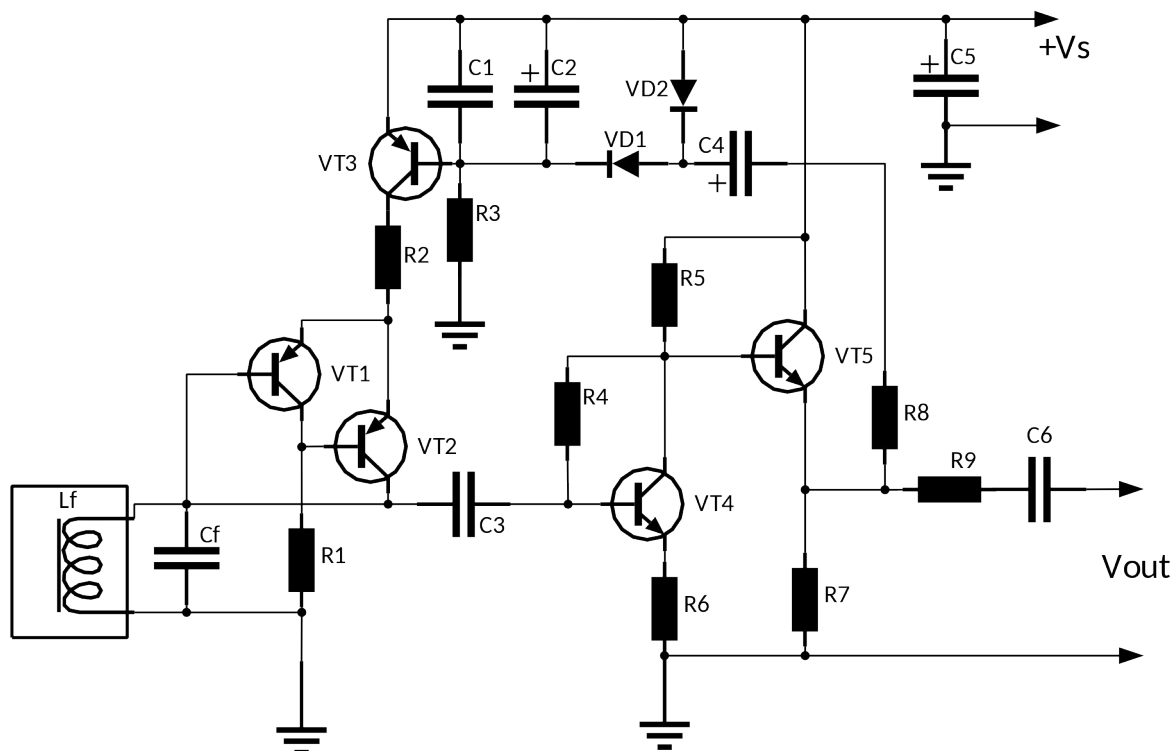


Рис. 4. Принципова схема LC-генератора з інтегрованим параметричним датчиком магнітної індуктивності

Живлення пристрою здійснюється від джерела постійного струму з напругою 6–12 В. Вимірне споживання не перевищує 20 мА за звичайних робочих умов, що робить систему придатною для роботи від батарей та використання у портативних пристроях.

Повний перелік компонентів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Специфікація матеріалів для схеми генератора

| Component | Specification             | Quantity |
|-----------|---------------------------|----------|
| R1        | 10 $\Omega$ , SMD-0805    | 1        |
| R2, R7    | 1 k $\Omega$ , SMD-0805   | 2        |
| R3        | 47 k $\Omega$ , SMD-0805  | 1        |
| R4        | 1 M $\Omega$ , SMD-0805   | 1        |
| R5        | 3.3 k $\Omega$ , SMD-0805 | 1        |
| R6        | 330 $\Omega$ , SMD-0805   | 1        |
| R8, R9    | 270 $\Omega$ , SMD-0805   | 2        |
| C1, C2    | 10 nF, SMD-0805           | 2        |
| C3        | 100 nF, SMD-0805          | 1        |
| C4, C6    | 47 $\mu$ F, 16 V, ECAP-RD | 2        |
| C5        | 10 $\mu$ F, 16 V, ECAP-RD | 1        |
| C7        | 0.47 $\mu$ F, SMD-0805    | 1        |
| VD1, VD2  | Diode LL4148              | 2        |
| VT1–VT2   | BC857.215, PNP BJT        | 2        |
| VT3–VT5   | BC847.215, NPN BJT        | 3        |

## 5. Експериментальна установка

Параметричний магнітний індуктивний датчик розташований всередині циліндричного калібрувального соленоїда, який виступає джерелом керованого магнітного поля (рис. 5). Відповідна блок-схема експериментальної установки подана на рис. 6.

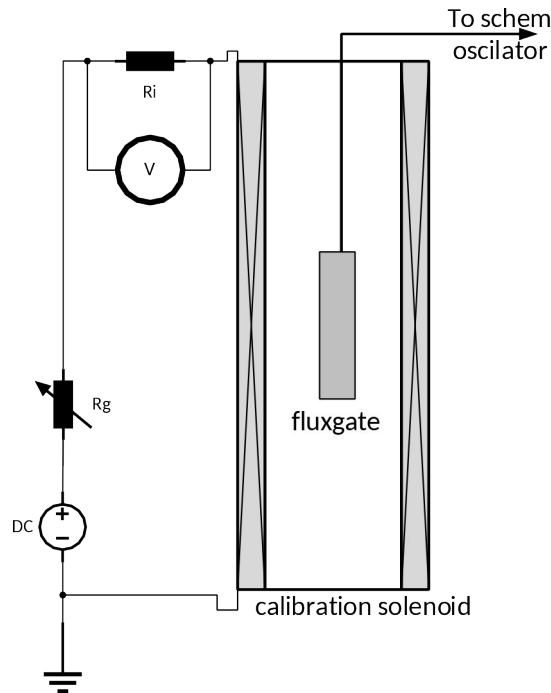


Рис. 5. Схема установки калібрування магнітного поля з соленоїдом, що живиться від постійного струму, та вбудованим параметричним датчиком магнітної індуктивності

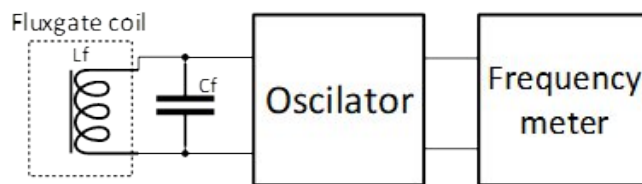


Рис. 6. Блок-схема експериментальної установки: параметричний датчик магнітної індуктивності, підключений до LC-генератора та частотоміра

Соленоїд мав такі параметри:

Довжина обмотки: 110 мм

Внутрішній діаметр: 13 мм

Постійна поля:  $KH = 3400 \text{ (A/m)/A}$

Напруженість магнітного поля  $H$  регулювалася шляхом керування постійним струмом через соленоїд, що подавався від стабілізованого джерела напруги. Для встановлення струму використовувався змінний резистор  $R_g$ , а прецизійний вольтметр вимірював падіння напруги на каліброваному шунтуючому резисторі  $R_i = 2,2 \text{ Ом}$  (допуск:  $\pm 1\%$ ). Розрахунок результуючого магнітного поля здійснювався на основі струму та відомої константи соленоїда.

Вихід генератора LC підключали до цифрового частотоміра зі семисегментним дисплеєм, який відображав частоту в герцах (рис. 7).

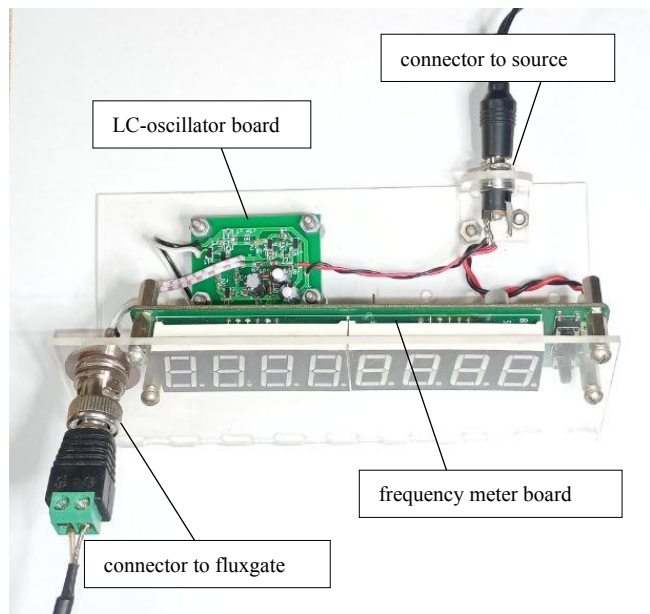


Рис.7. Фотографія зібраного прототипу магнітометра з параметричним датчиком магнітної індуктивності та частотоміром

Відхилення частоти було зареєстровано для різних значень магнітного поля в діапазоні від 0 до приблизно 1700 А/м. Цей діапазон охоплює типові рівні намагніченості звичайних промислових ферромагнітних матеріалів і значно перевищує природне геомагнітне поле Землі (20–60 А/м).

Щоб зменшити вплив земного магнітного поля, вісь соленоїда та датчика була орієнтована вздовж напрямку схід–захід, перпендикулярно геомагнітному вектору. Така орієнтація дозволила мінімізувати зміщення фоновой напруженості під час калібрування. Водночас попередні випробування показали, що датчик достатньо чутливий для виявлення локальних спотворень геомагнітного поля, спричинених близькими ферромагнітними об'єктами, що додатково підтверджує його ефективність у детектуванні магнітних збурень.

Повноцінна експериментальна установка включала котушку датчика  $L_f$ , конденсатор  $C_f$ , плату LC-генератора та частотомір. Компоненти генератора та частотоміра були змонтовані на спеціальній друкованій платі, а повна схема експерименту представлена на рис. 8.

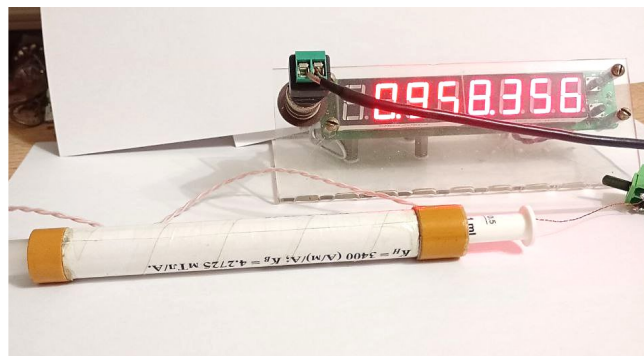


Рис.8. Експериментальна установка: датчик, вставлений у калібрувальний соленоїд, підключений до LC-генератора та частотоміра

## 5. Результати та обговорення

Частотну характеристику LC-генераторної схеми з параметричним датчиком магнітної індуктивності було досліджено експериментально в діапазоні зовнішнього магнітного поля від 0 до 1700 А/м.

Магнітне поле створювалося каліброваним соленоїдом, описаним у розділі IV, тоді як зміна вихідної частоти контролювалася цифровим частотоміром.

Вимірювання виконувалися для чотирьох значень ємності  $C_f$ : 1000 пФ, 2630 пФ, 4060 пФ і 10,2 нФ.

Отримані результати (рис. 8) демонструють стабільне, майже лінійне зростання частоти коливань зі збільшенням інтенсивності прикладеного магнітного поля. Така поведінка пояснюється зменшенням індуктивності  $L_f$  внаслідок зміни магнітної проникності осердя, що, у свою чергу, призводить до зсуву резонансної частоти генератора згідно з відомою залежністю:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (1)$$

A representative calibration curve is shown in Fig. 9.

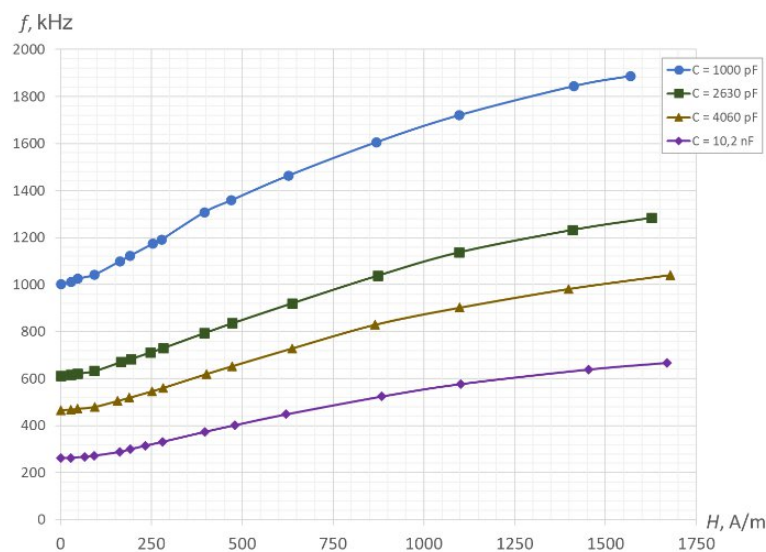


Рис.9. Залежність частоти від напруженості магнітного поля

Отримані експериментальні залежності демонструють високу плавність, добру повторюваність та мінімальний гістерезис. У досліджуваному діапазоні магнітного поля не було виявлено різких стрибків або ознак насичення. Частотна характеристика має нелінійний характер — спостерігається підвищена чутливість у ділянці слабких полів (менше приблизно 500 А/м) із подальшим поступовим вирівнюванням при збільшенні напруженості поля. Для коректного порівняння роботи датчика за різних значень ємності  $C_f$  експериментальні дані були нормалізовані відносно базової частоти при нульовому полі  $f_0$ . Нормалізовані криві частотного відгуку  $f/f_0$  наведено на рис. 10. Такий підхід дозволяє оцінити відносні зміни частоти незалежно від абсолютного значення і підтверджує, що збільшення ємності конденсатора підвищує нормалізовану чутливість датчика. Нормалізовані характеристики є особливо зручними для порівняльного калібрування та цифрового масштабування сигналу. Оцінена чутливість у найбільш лінійному діапазоні (приблизно від 200 до 800 А/м) становить 10–20 % на 100 А/м, залежно від значення  $C_f$ . Цього рівня достатньо для застосувань, пов'язаних із виявленням градієнтів магнітного поля, локалізацією магнітних аномалій або контролем стану конструкцій за допомогою пасивних магнітних методів.

Таким чином, результати підтверджують, що запропонована архітектура однокотушкового параметричного сенсора, попри свою конструкційну простоту, забезпечує стабільні та відтворювані частотні характеристики в широкому діапазоні магнітних полів. У поєднанні з частотною системою зчитування та компактною апаратною реалізацією, запропонований підхід становить перспективну альтернативу традиційним двокотушковим ферозондовим магнітометрам у застосуваннях середнього рівня чутливості..

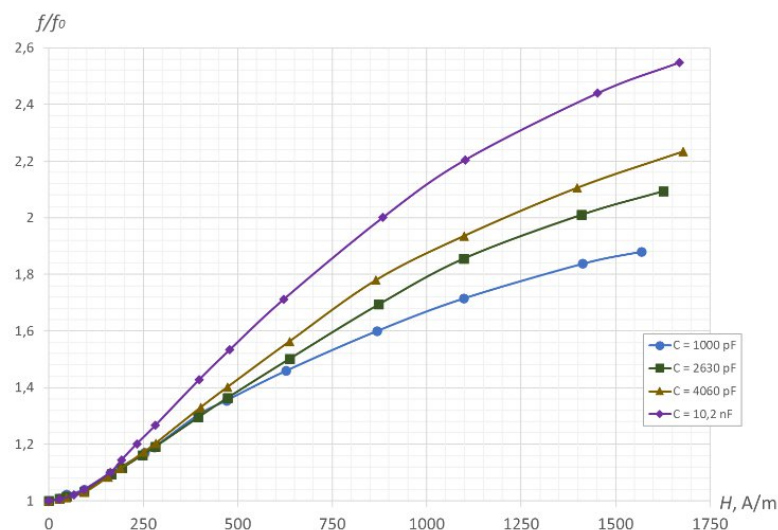


Рис.10. Нормалізована частотна характеристика  $f/f_0$  LC-генератора як функція напруженості магнітного поля для різних значень ємності

## 5. Висновки

У цій роботі представлено проектування, реалізацію та експериментальну перевірку магнітометра, що базується на параметричному датчику магнітної індуктивності, інтегрованому в LC-генераторну схему.

На відміну від традиційних ферозондових магнітометрів, запропонований пристрій має спрощену однокотушкову конструкцію, у якій індуктивність сенсорної котушки змінюється під дією зовнішнього магнітного поля. Ця зміна призводить до модуляції частоти генератора, що забезпечує точне та завадостійке вимірювання поля шляхом частотного відстеження.

Датчик було експериментально протестовано із застосуванням каліброваного соленоїда як джерела контрольованого магнітного поля. Отримані результати показали стабільну, монотонну частотну характеристику в діапазоні інтенсивності поля від 0 до 1700 А/м.

Аналіз абсолютних і нормалізованих кривих частоти підтвердив придатність системи для вимірювання магнітних полів із середньою роздільною здатністю. Використання частоти як вимірювального параметра підвищує сумісність із цифровими системами, знижує вплив шумів і дрейфу амплітуди та спрощує подальшу обробку сигналу. Запропонований підхід має низку переваг — низьке енергоспоживання, компактну реалізацію та мінімальну кількість компонентів, що робить його придатним для інтеграції у вбудовані системи, портативні вимірювальні пристрої та недорогі промислові сенсори. Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення температурної стабільності, розширення робочого частотного діапазону та впровадження алгоритмів цифрового калібрування для підвищення точності вимірювань за змінних умов навколишнього середовища.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність фінансових чи інших потенційних конфліктів інтересів щодо цієї роботи.

## Посилання

- V. O. Hirka and M. Ye. Koshliakov, *Magnetometry and Magnetic Sensors*. Naukova Dumka, 2013.
- S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House, 2001.
- I. V. Zhuk, M. A. Ivaniuk, and V. Yu. Redko, "Magnetic sensors: operating principles, characteristics, and applications", *Bulletin of NTUU "KPI". Series: Radiotechnics, Radioappliance Engineering*, no. 66, pp. 38–46, 2016.
- P. Martinek and P. Ripka, "Advances in magnetometers and magnetic sensors", *Sensors*, vol. 20, no. 16, pp. 1–23, 2020.
- I. V. Zhezhelenko, "Magnetic field sensors in electrical equipment monitoring systems", *Electrical Engineering and Electromechanics*, no. 3, pp. 38–44, 2021.
- V. R. Krykun, Yu. V. Khomiak, and I. K. Korniev, "Phase-impulse ferroprobe for magnetic field measurement", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies*, no. 3 (21), pp. 32–38, 2024.
- X. Liu, J. Zhang, Y. Wang, "Study of nonlinear excitation circuits for fluxgate magnetometer", *Sensors*, vol. 23, no. 5, 2023.
- I. K. Korniev and Yu. V. Khomiak, "Computerized system for studying a phase-impulse ferroprobe," in *Proc. 18th Int. Sci.-Pract. Conf. of Masters and PhD Students "Theoretical and Practical Research of Young Scientists"*, Kharkiv, Ukraine, 2024, pp. 153.
- R. Farita et al. *Fluxgate Magnetometer Project Report*. Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- T. Dyer, P. F. Griffin, E. Riis, "Single-board low-noise fluxgate magnetometer", *Journal of Applied Physics*, vol. 135, no. 3, 2024.
- T. H. Nguyen, J. T. Jeng, L. V. Bui, "Development of a tri-axis concentric fluxgate magnetometer with high orthogonality and high linearity", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025.
- P. Priftis, S. Angelopoulos, A. Ktena, "Development of a high-sensitivity orthogonal fluxgate sensor", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2024.
- P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*. 3rd ed. Cambridge University Press, 2015. 1225 p.
- U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm *Electronic Circuits: Handbook for Design and Application*. 2nd ed. Springer, 2008. 1543 p.

ISSN: 2617-846X (online)

Хомяк Юрій Валентинович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6998-8393>

Корнєв Іван Костянтинович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8106-1757>

Дата отримання статті -19.10.25.

Дата фінального варіанту – 27.11.25.

Дата публікації- 30.12.25.