



KAPITEL 2 / CHAPTER 2²

HIGHLY SENSITIVE RADIO MEASUREMENT TRANSDUCER OF MAGNETIC FIELD INDUCTION

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-35-00-008

Вступ

XXI століття збільшило кількість обчислювальної та вимірювальної техніки в житті кожної людини, що негативно відбивається на природі та людині. Таким чином, враховуючи надзвичайну важливість природних та техногенних впливів магнітного поля, розробка високочутливих приладів вимірювання індукції магнітних полів є однією з пріоритетних задач науки [1– 4].

Загальна стратегія в розробці вимірювальної техніки, в тому числі і для параметрів магнітних полів, передбачає збільшення вимог до чутливості приладів при одночасному вдосконаленні експлуатаційних умов. Таким чином, все це створює передумови для розробки та впровадження нових методів обробки та вимірювання, які б дозволили вирішити задачі вимірювання магнітної фізичної величини з підвищеною чутливістю.

Провідне місце у вимірювальній індустрії займають прилади вимірювання індукції магнітного поля, для яких постійно підвищуються вимоги щодо чутливості. Паралельно з вимогою до чутливості, підвищуються вимоги до ергономічності проєктованих приладів а також до їх економічних та фінансових складових реалізації [5 – 8].

На сьогоднішній день ведуться широкомасштабні наукові дослідження по використанню нових ідей, нових матеріалів, фізичних явищ для створення приладів вимірювання індукції магнітних полів [9 – 11]. Основними науковими закладами України, які працюють над розробками в області вимірювання параметрів та характеристик магнітних полів є Національний технічний університет "Львівська політехніка" (м. Львів), Київський національний університет імені Тараса Шевченка (м. Київ), НТУУ "Київський політехнічний

²*Authors: Osadchuk Oleksandr Volodumurovich, Osadchuk Iaroslav Oleksandrovich,
Pritula Maksum Oleksandrovich*

Number of characters: 30072

Author's sheets: 0,75



інститут імені Ігоря Сікорського" (м. Київ), Інститут фізики напівпровідників НАН України (м. Київ), Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова (м. Одеса), Інститут Кібернетики НАН України (м. Київ), Інститут теплофізики НАН України (м. Київ), Інститут метрології (м. Харків), Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" (м. Харків), Вінницький національний технічний університет (м. Вінниця) та інші [12 – 19].

Вимірювання індукції магнітного поля як характеристики магнітного поля є однією з найважливіших задач в області створення і забезпечення функціонування систем навігації, орієнтації і стабілізації; екранування квантових комп'ютерів, магнітної томографії, дефектоскопії і неруйнівного контролю виробів, а також реалізації систем безпеки і охорони різних об'єктів. Засоби вимірювання магнітного поля високої точності використовуються також для пошуку і виявлення магнітних аномалій в космосі, в повітряному, підводному, надводному та підземному середовищах, при геофізичному і геологічному моніторингах, вимірюванні великих струмів *та ін.* Магнітні поля зазвичай поділяють на надсильні (понад 100 Тл), сильні (від 4 до 100 Тл), середні (від 0,05 до 4 Тл), і слабкі (менше 0,05 Тл). Залежно від області застосування магнітометра і значення вимірюваного магнітного поля виникає проблема вибору того чи іншого первинного вимірювального перетворювача магнітного поля. Розвиток сучасних мобільних робототехнічних комплексів як наземного, так підводного і космічного призначення вимагає випереджаючої розробки магнітометрів з високою чутливістю для вимірювання слабких магнітних полів і використання в складі систем навігації, орієнтації і стабілізації. Дуже часто вимірювання індукції магнітного поля повинно проводитись в умовах впливу зовнішніх завад магнітного поля Землі.

В даний час розроблено дуже багато приладів для вимірювання параметрів магнітного поля. Серед них є і дуже чутливі – СКВІДи. Але практичного застосування, наприклад, в системах навігації, у військовій розвідці для визначення локації занурених підводних човнів, в геології, вони не отримали, оскільки дані прилади вимагають криогенної устаткування, що обмежує область



їх використання. Таким чином, виникає необхідність розробки приладів, які будуть відповідати вимогам енергоспоживання, чутливості, геометричних розмірів та маси, що дозволять вирішувати вище наведені задачі більш точно і якісніше.

Сенсор магнітного поля є чутливим елементом будь-якого магнітометра і призначений для перетворення вимірювальної величини магнітного поля в електричний сигнал, найчастіше в напругу [20, 21].

Одним із основних складових вимірювальних приладів 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 приладу. Схема обробки сигналу необхідна для перетворення аналогового сигналу чутливого елемента в відповідну для узгодження з контрольно-вимірювальними блоками форму. Найчастіше основними елементами схем обробки є підсилювачі і аналогово-цифрові перетворювачі, однак існують і інші підходи. Зокрема, використання частотного перетворення в сенсору магнітного поля дозволяє підвищити чутливість сенсора [21].

Виходячи з вище сказаного, перспективним науковим напрямком є розробка та створення приладів вимірювання індукції магнітного поля в яких використовуються напівпровідникові сенсори з автогенераторними частотними перетворювачами. Застосування автогенераторного частотного перетворювача з напівпровідниковим магніточутливим елементом в якості сенсора радіовимірювального приладу, дозволяє компенсувати активні втрати в приладі та підвищити коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача. Таким чином, вдосконалення високочутливих вимірювальних приладів індукції магнітного поля, які містять у своєму складі частотний перетворювач з магніточутливим елементом, є актуальним напрямком наукових досліджень. Необхідно зазначити, що не менш важливим з точки зору реалізації високочутливого радіовимірювального приладу є розробка схемотехнічних рішень та конструкцій приладу в цілому, а також оцінювання його метрологічних характеристик.



2.1. Розробка структурної та електричної схем радіовимірювального приладу індукції магнітного поля

Електронна техніка стрімко увійшла в повсякденне життя та діяльність людини в вигляді офісних, промислових комп'ютерів, потужних електронно-обчислювальних машин та в вигляді мікропроцесорів, які вбудовані на сьогодні практично у всі побутові прилади та промислові установки і виконують функції управління, контролю, захисту та діагностики. Мікропроцесори (МП) докорінно змінили технології створення електронної техніки, підвищили рівень знань розробників нової техніки та користувачів. Така ситуація позначилась і на самих мікропроцесорних системах, які сьогодні базуються на напівпровідникових мікросхемах, що створюються на основі нанотехнологій. На сьогодні електронна промисловість освоїла 25÷35 нанометрові процеси, при яких товщина ізоляційного прошарку в транзисторах знаходиться на рівні 1нм, що складає по товщині близько п'яти атомів водню. Сучасні електронні вимірювальні прилади потребують елементної бази, яка відповідає таким вимогам як: висока швидкість обробки даних, компактність і низьке енергоспоживання. Об'єднати ці вимоги дозволяє методологія Soc (System-on-Crystal, система на кристалі) [22]. З комерційної точки зору, ринок Soc-мікросхем можна розділити на два сегменти. Один утворюють ті програмовані мікросхеми, що практично замінили класичні ASIC (application-specific integrated circuit, "інтегральна схема для специфічного використання") з жорстко детермінованою логікою у великих OEM-проектах. Другий утворюють комерційні процесори, що поєднують у своїй конструкції ядра на основі відкритих процесорних архітектур або архітектур, що стали стандартами, а також набір апаратних прискорювачів або спеціалізованих співпроцесорів і схемотехніку стандартних базових інтерфейсів для обміну даними і підключення стандартних периферійних пристроїв. Такі процесори дозволяють здійснювати розробку як вбудованих систем для промислових застосувань, так і електроніки в інтересах масового споживчого ринку. При цьому важливою перевагою процесорів Cots-класу в промислових розробках є



забезпечення сучасних характеристик у частині масогабаритних параметрів і енергоспоживання, а при розробках електроніки споживчого класу — можливість прискорення виводу кінцевих виробів на ринок за рахунок економії часу на створення апаратної платформи. Величезну допомогу розробникам сучасних систем автоматизації створює також "масована" програмна підтримка виробниками своєї мікропроцесорної бази [22 – 24].

За допомогою мікропроцесорів ми можемо забезпечити підвищення продуктивності процесу вимірювання, збільшити чутливість, спростити обробку та корекцію експериментальних даних, виконати виведення інформаційного повідомлення на дисплей для комфортного сприйняття людиною.

Мікропроцесори стали частиною сучасних вимірювальних систем та приладів для вимірювання параметрів електричних сигналів, а також неелектричних фізичних величин. Використання мікропроцесорів в вимірювальній техніці у багато разів підвищило точність приладів (оскільки спростила реалізація математичної обробки сигналів, їх кореляція та перетворення), значно розширило їх функціональні можливості, в десятки разів зменшило вартість приладів троїв та їх габаритних розмірів, спростило керування їх роботою, підвищило надійність, швидкодію, призвело до створення програмованих, повністю автоматизованих приладів.

Мікропроцесор може бути охарактеризований наступними параметрами: ступенем інтеграції (розмірами кристала і кількістю транзисторів на ньому), типом корпусу, числом виводів, кількістю і величинами живлячих напруг, потужністю що розсіюється, робочим температурним діапазоном, надійністю, навантажувальною здатністю і т.п.

Найбільше практично важливими для кінцевого користувача конструктивними і функціональними характеристиками є:

- розрядність мікропроцесора. Іноді цей параметр називають внутрішньою розрядністю МП або розрядністю внутрішньої шини даних.
- розрядність шини даних МП. Іноді цей параметр називають зовнішньою розрядністю МП. Це кількість зовнішніх виводів МП для передачі даних.



- розрядність шини адреси. Це кількість зовнішніх виводів МП для передачі адресної інформації. Розрядність адреси прямо визначає максимальний обсяг фізично адресованої пам'яті в байтах.

- максимальний обсяг фізично адресованої пам'яті.
- швидкодія.

Мікропроцесор, введений до складу засобу вимірювання, перетворює його в програмно-керований вимірювальний прилад. Функціональні можливості такого вимірювального приладу визначаються алгоритмом який прописаний в програмному коді мікропроцесора, що зберігається в постійному запам'ятовуючому пристрої.

Використання мікропроцесорів у вимірювальних приладах дозволяє підвищити точність вимірювань за рахунок автоматичної компенсації (виключення) систематичної похибки, зокрема автоматичної установки нуля перед початком вимірювань, автоматичного виконання градуювальної операції (самокалібровки), здійснення самоконтролю, зменшення впливу випадкових похибок шляхом проведення багатократних вимірювань з подальшим усередненням їх результатів.

При виконанні непрямих вимірювань мікропроцесор відповідно до заданого алгоритму автоматично обробляє режими вимірювань, запам'ятовує результати прямих вимірювань, проводить необхідні обчислення і виводить знайдене значення вимірюваної фізичної величини на дисплей.

Функціональні можливості вбудованих у прилади обчислювальних засобів безперервно розширюються з розвитком елементної бази цифрової техніки, особливо мікропроцесорів. Окремо слід відмітити вбудовані інтерфейси в мікропроцесори, що дозволяє розробнику і реалізатору зменшити витрати часу на розробку та реалізацію приладу в цілому. Більшість сучасних мікропроцесорів легко реалізують USB-інтерфейс, що дозволяє передавати дані з приладу на ПК.

Використання мікропроцесора з високою тактовою частотою, дозволяє зменшити похибку квантування. Але, з практичної точки зору, потрібно вибирати оптимальний варіант. Мікропроцесори з високою тактовою частотою,



наприклад 600 МГц, є набагато дорожчими ніж мікропроцесори з тактовою частотою 64 МГц. Для нашого випадку приймаємо, що оптимальним буде мікропроцесор STM64F205RGT6W з тактовою частотою 64 МГц.

Було розроблено радіовимірювальний прилад магнітного поля з підвищеною чутливістю, структурна схема якого подана на рис. 1.

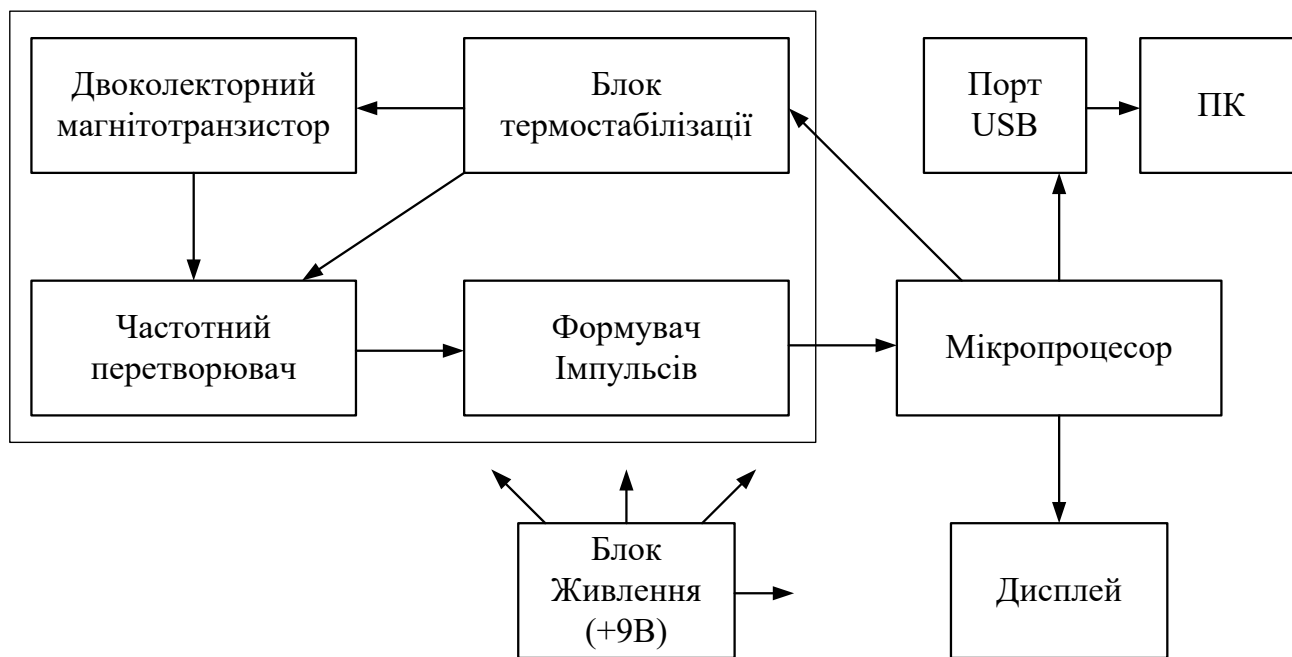


Рисунок 1 – Структурна схема високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля

Радіовимірювальний прилад працює наступним чином: магнітне поле впливаючи на двоколекторний магнітотранзистор створює на його колекторів змінну напругу. Дана змінна напруга впливаючи на частотний перетворювач на біполярних транзисторах змінює його еквівалентну ємність, що в свою чергу змінює частоту генерації на виході частотного перетворювача. Далі формувач імпульсів формує необхідні фронти генерованого коливання. Частота отриманого коливання вимірюється мікропроцесором та перетворюється за функцією перетворення в одиниці індукції магнітного поля та виводить інформацію на дисплей.

Слід також зазначити, що на схемні рішення окремих блоків даної структурної схеми, а також на магнітометр за даною структурною схемою були отримані патенти України [25, 26].



За допомогою даного радіовимірювального приладу магнітного поля можна також досліджувати екрануючі властивості матеріалів. Слід зазначити, що радіовимірювальний перетворювач магнітного поля, який використовується в розробленому приладі, може бути реалізований в системі повітряної навігації [24]

Електрична схема приладу (рис. 1) показана на рис. 2 складається з 64-розрядного ARM-мікропроцесора з USB інтерфейсом STM64F205RGT6W [95], кварцового генератора, блоку живлення, LCD-дисплея WC0802C-STBLWNC-06, також містить систему термостабілізації. Система термостабілізації складається з термосенсора DS18B20, який встановлюється разом з радіовимірювальним перетворювачем і контролює значення температури радіовимірювального перетворювача в межах $53^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Якщо температура стає меншою за $52,5^{\circ}\text{C}$, то вмикається нагрівальний елемент і радіовимірювальний перетворювач нагріваються до $53,5^{\circ}\text{C}$.

Також розроблений радіовимірювальний прилад магнітного поля з підвищеною чутливістю має можливість для виставлення кількості проведених вимірювань з подальшим усередненням результату, що в свою чергу зменшить похибку вимірювань.

Кінцевий результат або результати вимірювань можуть бути відображені за допомогою LCD-дисплея WH1602C-YGH-CTK або на екрані монітора ПК. Даний прилад дозволяє не лише вимірювання в реальному часі, але і зберігання значень індукції магнітного поля протягом певного часу.

На рис. 3 зображено кілька фотографій високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля. Як видно з фотографій, прилад MV-1 (Test version) має USB-порт для передачі даних на ПК; сенсор (магнітотранзистор двоколекторний) на кінці "антени"; роз'єм для підключення блоку живлення від мережі 220 В (це для випадку довготривалої роботи приладу в умовах шкідливих для здоров'я людини). Також ми бачимо кнопки: ввімкнення приладу, "Sel" - для вибору одиниць вимірювання, дві інші кнопки – для зміни одиниць вимірювання.

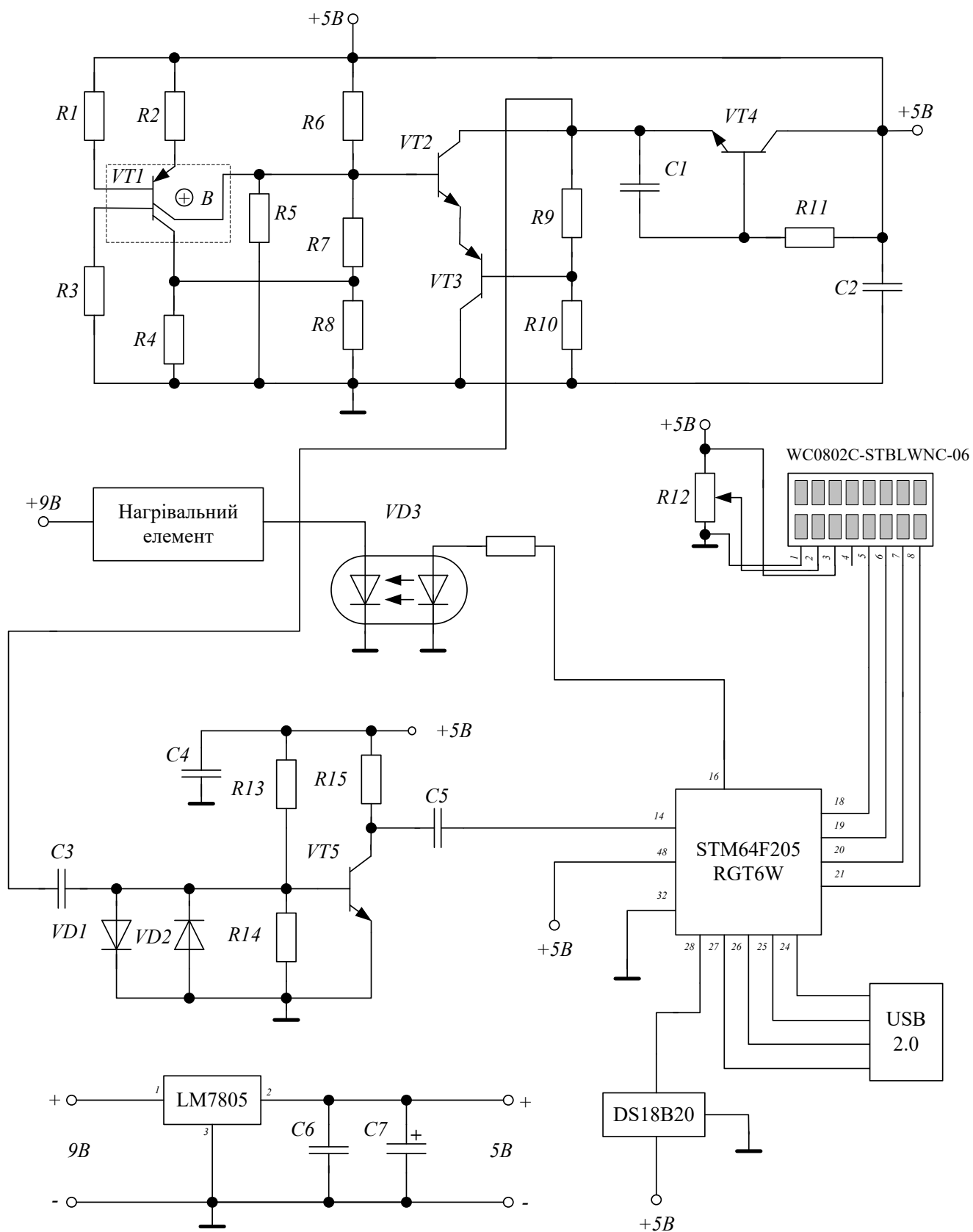


Рисунок 2 – Електрична принципова схема радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур



Рисунок 3 – Фотографії готового радіовимірювального приладу

Додатково слід відмітити, що в даний час, прилад доопрацьовується для випадку контролю порогового значення індукції магнітного поля. Таке доопрацювання може мати місце при використанні даного приладу особами, які тяжко реагують на магнітні бурі. Тоді при спрацюванні “сигналізації” (перевищення порогового рівня), що індукція магнітного поля перевищує норму, людина може прийняти рішення про обмеження певних фізичних навантажень на свій організм.

В схемотехнічному рішенні можна доопрацювати блок по ефективній



передачі частотного сигнал з виходу радіовимірювального перетворювача магнітного поля на відстань по безпроводному каналу. Це може бути корисним при проведенні досліджень в умовах, де довготривале перебування людини може призвести до негативного впливу на її здоров'я.

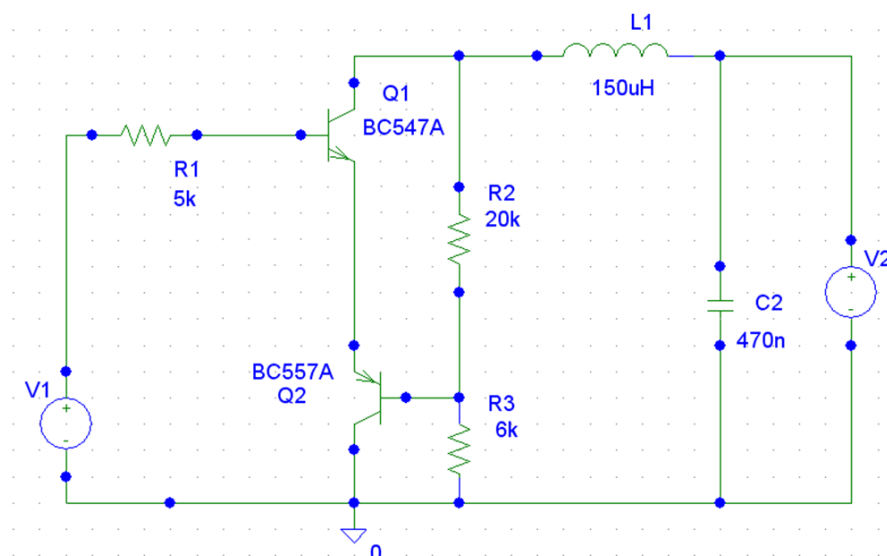
Ще одним доопрацюванням розробленого приладу може бути збільшення кількості каналів вимірювання до трьох. Це дозволить додатково визначати орієнтацію об'єкту в просторі, що може бути використане в системі навігації, або системі просторового розміщення об'єкту.

2.2. Комп'ютерне моделювання радіовимірювального частотного перетворювача приладу

Всі сучасні системи комп'ютерного моделювання не в змозі ідеально промодельовати динамічні властивості транзистора, що ускладнює моделювання реальних характеристик приладів та їх моделей. Також необхідно враховувати, що моделюючі пакети не можуть взагалі відтворити модель активної індуктивності на транзисторові. Тому, в даному випадку, ми її замінимо на звичайну котушку індуктивності.

Проведемо моделювання статичних характеристик радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля на основі структури з біполярних транзисторів в середовищі Micro-Cap 12. Схема електрична принципова частотного перетворювача на основі біполярної структури наведена на рис.4.

Параметри транзисторів BC547A та BC557A наведені в datasheet. Промодельуємо ВАХ даного частотного перетворювача. Результат зображений на рисунку 5.



**Рисунок 4 – Модель частотного перетворювача
на основі біполярних транзисторів**

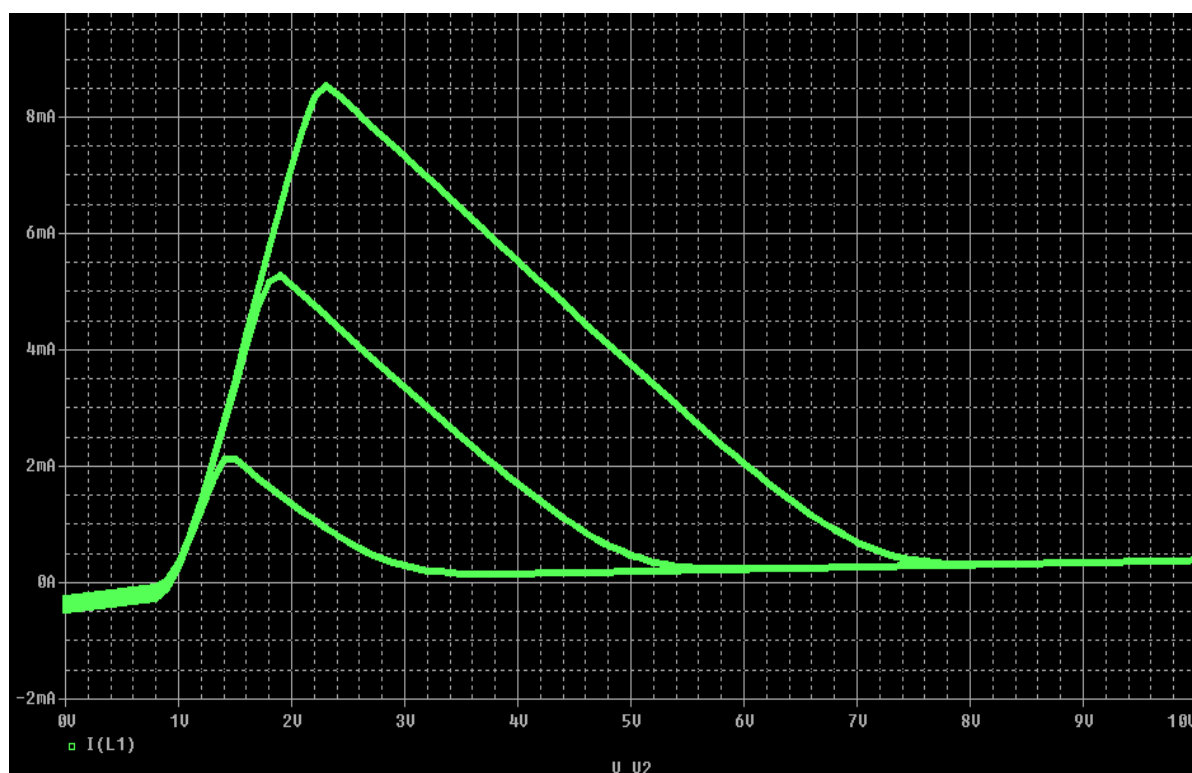


Рисунок 5 – ВАХ частотного перетворювача при трьох напругах керування

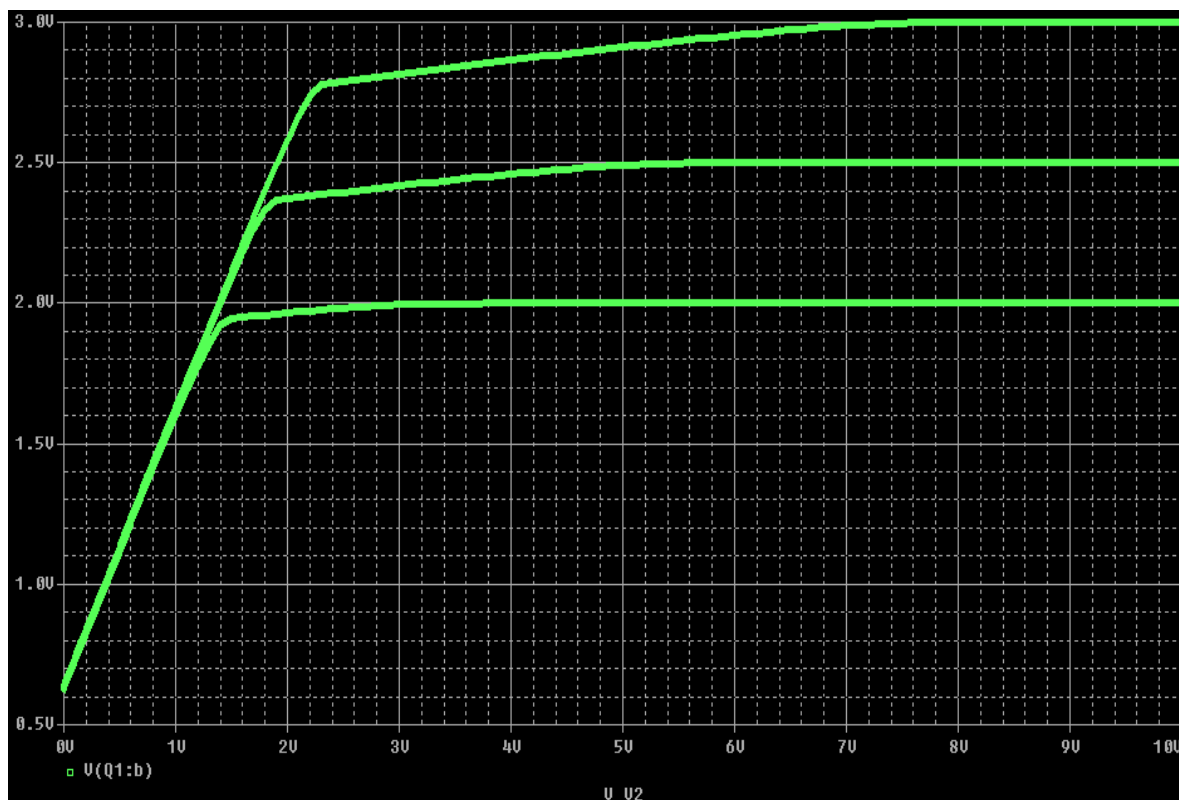


Рисунок 6 – Залежність напруги керування від напруги живлення

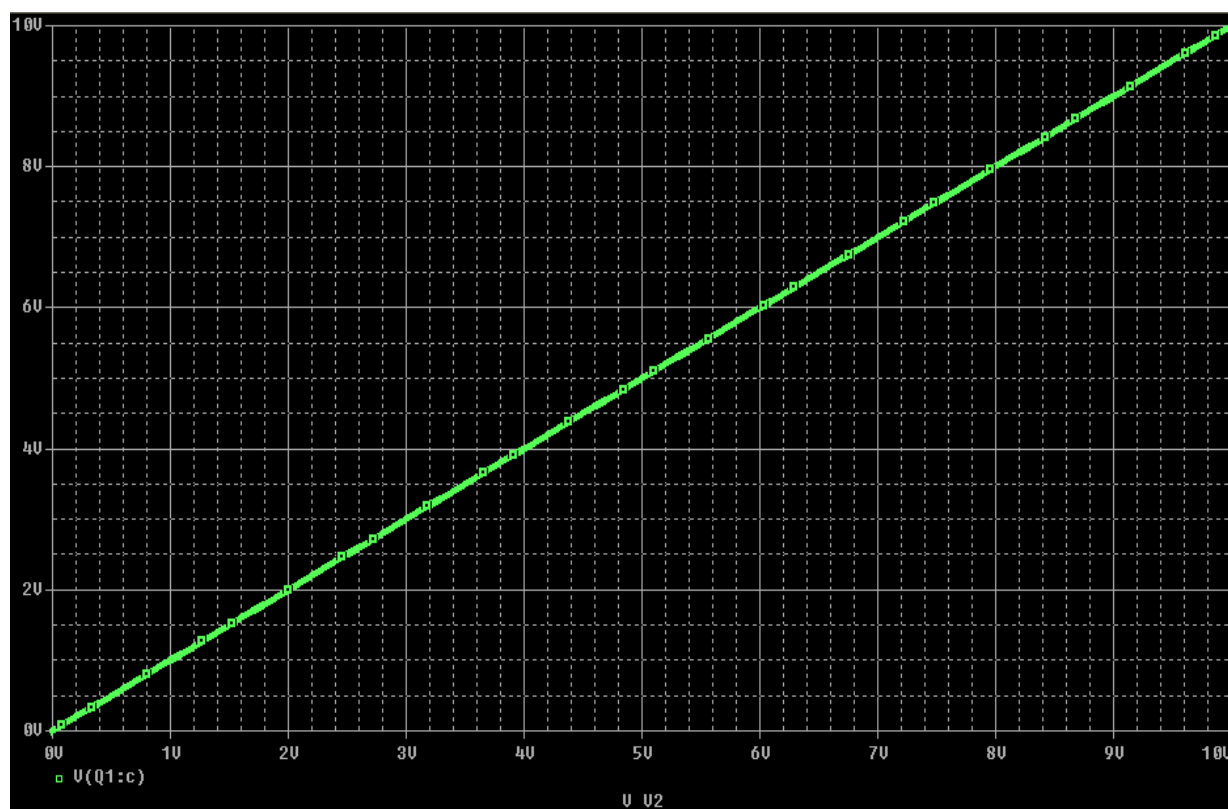
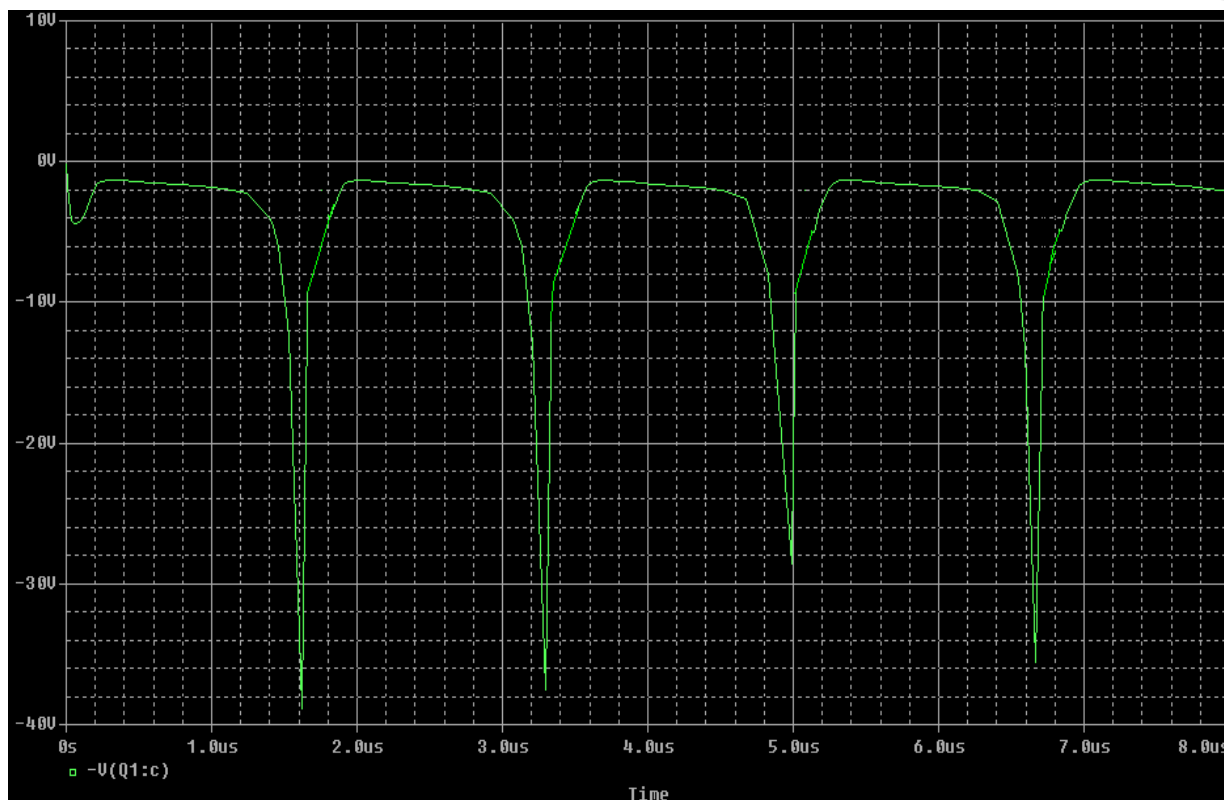
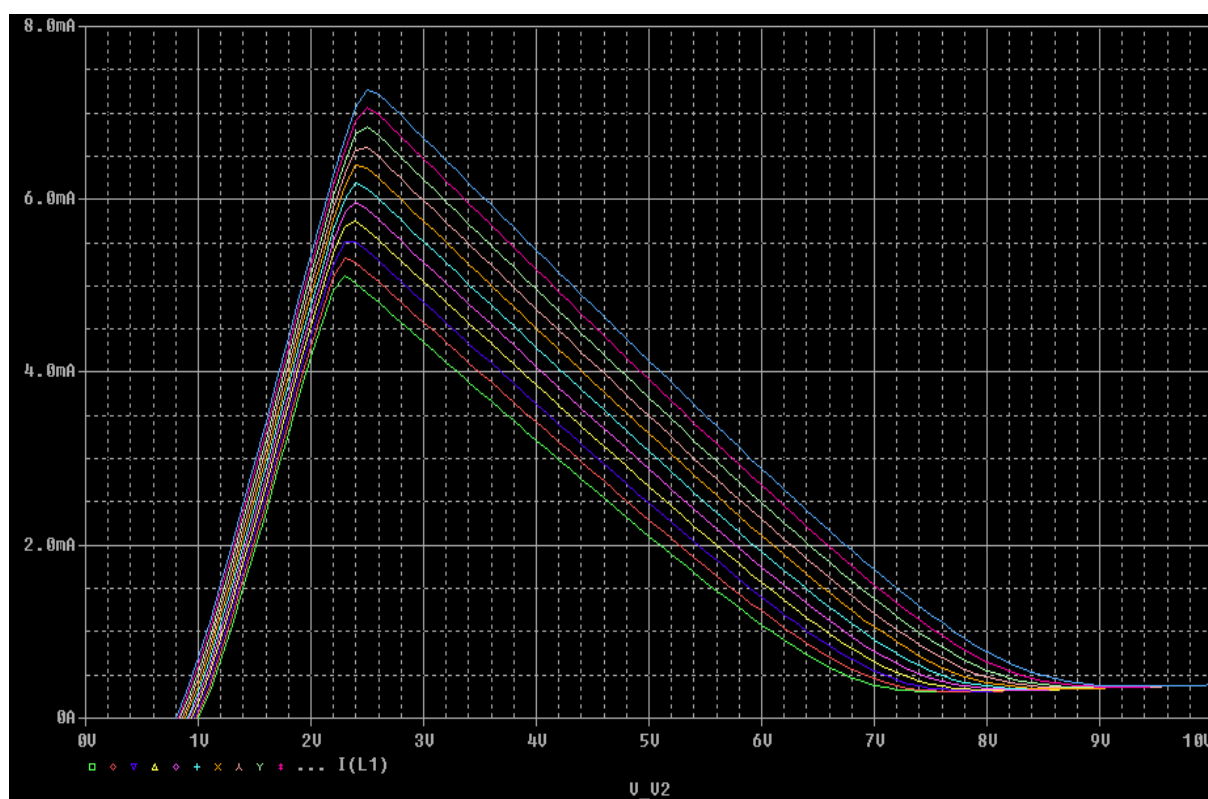


Рисунок 7 – Залежність постійної напруги на базі першого транзистора від напруги живлення



**Рисунок 8 – Залежність вихідного змінного сигналу
без постійної складової від часу**



**Рисунок 9 – Залежність ВАХ частотного перетворювача
при одній керуючій напрузі 3 В від температури**



Отже, як бачимо моделювання підтверджує теоретичні та експериментальні дані, але воно є дуже наближеним. В порівнянні з моделюванням підсилювача, моделювання частотного перетворювача є досить складним та дуже невідповідним експериментальним даним. Візьмемо, наприклад, вихідний сигнал, який на практиці є майже прямокутним оскільки відбувається зрізання верхньої на нижньої половини сигналу складної форми. Після моделювання ми бачимо, що сигнал не зрізається ні зверху на знизу і є досить складним та незрозумілим. Таким чином моделювання частотних перетворювачів та автогенераторів на транзисторних структурах з диференційним опором є досить складним.

2.3. Розрахунок похибок високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля

Метрологія має важливе значення для науково-технічного прогресу, оскільки без точних вимірювань неможливий розвиток науки. З іншого боку, часто сам розвиток науки і техніки стимулює розвиток вимірювальної техніки і поява нових способів визначення різних фізичних величин. Оскільки метрологія глибоко пов'язана з науково-технічним прогресом, то розвиток метрології як науки в тому числі і законодавчої необхідно для створення нових глобальних працюючих технологій і методів, а також удосконалення методів технічного контролю. Зокрема, в радіовимірювальних системах дуже важливим є точність, тобто врахування похибок в даних випадках і взагалі є дуже важливою задачею метрології. Сучасна наука ставить перед метрологією ряд важливих завдань.

Є два основних поняття в метрології: виміряне значення та істинне значення вимірювальної величини. Які б точні не були засоби та методи вимірювання ми не використовували б, між істинним та виміряним значеннями завжди буде присутня похибка вимірювань. Причиною появи похибок є неідеальність методів та засобів вимірювання, зміна умов навколишнього



середовища. На практиці, правильно проведене вимірювання включає не лише результат вимірювання, а й визначення відхилення отриманого результату від істинного значення вимірюваної величини.

Для визначення похибки вимірювання радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля необхідно врахувати наступні похибки:

- похибки, що виникають при перетворенні неелектричної величини (індукції магнітного поля) в електричну (змінну ємність магніточутливого елементу);
- похибки, що виникають при перетворенні електричного сигналу в частотно модульований сигнал, що виникають у частотному перетворювачі;
- похибки, що виникають при перетворенні частотно-модульованого сигналу в цифровий код, які виникають із застосуванням мікропроцесорів.

При використанні магніточутливого елементу, а саме двоколекторного магнітотранзистора, в результаті перетворення неелектричної величини (індукції магнітного поля) в електричну (ємність) виникає похибка внаслідок зміни температури оточуючого середовища $\delta_{ТКЄ}$, яка показує зміну величини ємності у відсотках при зміні температури на 1°C .

$$\delta_{ТКЄ} = \frac{\Delta T' \cdot \Delta C}{C \cdot \Delta T} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де ΔT - зміна температури, $^{\circ}\text{C}$; ΔC - зміна ємності магніточутливого елементу (ДБМТ) при ΔT , Ф; C - початкова ємність магніточутливого елементу, Ф; $\Delta T'$ - можливе відхилення температури в системі, $^{\circ}\text{C}$.

Так для магніточутливого сенсора ємність при $T = 10^{\circ}\text{C}$ складає 1,48 пФ, а при $T = 100^{\circ}\text{C}$ - 1,54 пФ. Звідси випливає, що

$$\delta_{ТКЄ} = \frac{5 \cdot (1,54 - 1,48) \cdot 10^{-12}}{1,48 \cdot 10^{-12} \cdot (100 - 10)} \cdot 100\% = 0,225\%$$

При перетворенні електричного сигналу з магніточутливого елементу в частотно модульований сигнал існують похибки пов'язані з нестабільністю



частоти генератора δ_1 і з коливанням напруги живлення δ_U та температури навколишнього середовища δ_T .

Для визначення похибки зміни частоти генерації з коливанням напруги живлення δ_U нам необхідно знати величину на скільки змінюється частота генерації радіовимірювального перетворювача магнітного поля при зміні напруги живлення на 1%. В нашому випадку напруга живлення складає $U_1=U_2=5$ В, тоді 1% зміна напруги буде рівна 0,05 В, що відповідно до експериментальних даних відповідає зміні частоти генерації на 2,8 кГц. З врахуванням зазначених даних, похибка коливання напруги живлення становить

$$\delta_U = \frac{f_1}{f_H} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де f_1 - частота генерації при 1%-ій зміні напруги живлення, Гц, f_H - несуча частота, Гц.

$$\delta_U = \frac{2800 \cdot 100\%}{3000000} = 0,1\%.$$

Для стабілізації напруги живлення використано стабілізатор напруги LM7805. Лінійна стабілізація LM 7805 становить 5 мВ, їй відповідає зміна частоти генерації 290 Гц.

$$\delta_U = \frac{290 \cdot 100\%}{3000000} = 0,01 \ %.$$

Виходячи з вищенаведених розрахунків, є очевидним, що використання стабілізатора напруги зменшить похибку коливання напруги живлення з 0,1% до 0,01%.

Визначимо похибку коливання температури навколишнього середовища δ_T .

$$\delta_T = \frac{f_T}{f_H} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де f_T - частота генерації при зміні температури навколишнього середовища на 1 °С, Гц.



В даному випадку зміні температури навколишнього середовища на 1°C при несучій частоті 3 МГц відповідає частота 6800 Гц.

$$\delta_T = \frac{6800}{3000000} \cdot 100\% = 0,23\%$$

Так як в радіовимірному приладі індукції магнітного поля ми використовуємо схему термостабілізації (рис. 2), то ми можемо досягнути зміну температури навколишнього середовища в межах $0,1^{\circ}\text{C}$, при цьому частота вихідного сигналу буде змінюватись на 1350 Гц. Тоді δ_T набуває значення

$$\delta_T = \frac{1350}{3000000} \cdot 100\% = 0,045\%$$

Виходячи з вищенаведених розрахунків, є очевидним, що використання термостабілізації значно зменшить вплив температури навколишнього середовища на роботу радіовимірального перетворювача і відповідно зменшиться похибка колювання температури навколишнього середовища з 0,23 % до 0,045 %.

Оцінка похибки вимірювання, яка виникає у результаті нестабільності частоти генератора δ_1 визначається згідно виразу:

$$\delta_1 = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\rho^2 A_0}{(R'_g)^2} \left[\frac{\frac{1}{3} Q a_1 a_2 + \frac{A_0^2}{192} (27 Q a_1 a_2 - 32 a_2^2) + \frac{A_0^2}{20} (8 Q a_1 a_4 + 5 a_2 a_3)}{\omega_0} + \frac{\frac{A_0^2}{24} (5 Q a_1 a_5 - 8 a_2 a_4)}{\omega_0} \right], \quad (4)$$

де C - еквівалентна ємність транзисторної структури; ρ - характеристичний опір контуру, $\rho = \sqrt{L/C}$; L - зовнішня індуктивність; A_0 - відносне значення амплітуди колювань у нульовому наближенні:



$$A_0 = \sqrt{\frac{-3a_3 + \sqrt{9a_3^2 - 40 \cdot Q \cdot a_5 \left(a_1 + \frac{R'_g}{R_H} + \frac{R_L R'_g}{\rho^2} \right)}}{5a_5}}; \quad (5)$$

$R'_g / R_H = 2$, R_L - опір індуктивного елементу; R'_g - диференційний опір, $R'_g = U_{\min} / I_{\max}$; Q - добротність контуру, ($Q=150$); a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 - коефіцієнти апроксимації, які визначаються з системи рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 = -2S_1(1-\gamma) - 4S_2(1-\gamma)^3 - 6S_3(1-\gamma)^5; \\ a_2 = S_1 + 6S_2(1-\gamma)^2 + 15S_3(1-\gamma)^4; \\ a_3 = 4S_2(1-\gamma) - 20S_3(1-\gamma)^3; \\ a_4 = S_2 + 15S_3(1-\gamma)^2; \\ a_5 = -6S_3(1-\gamma), a_6 = S_3; \\ S_1 = \frac{\alpha(2-3\beta^2) - \beta^6(1-\alpha)}{\beta^2(1-\beta^2)^2}; \\ S_2 = \frac{2\beta^6(1-\alpha) - \alpha(1-3\beta^4)}{\beta^4(1-\beta^2)^2}; \\ S_3 = \frac{\alpha(1-\beta^2)^2 - \beta^4}{\beta^4(1-\beta^2)^2}; \end{cases} \quad (6)$$

де

$$\alpha = (I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max}; \quad \beta = (U_{\min} - U_{\max}) / U_{\min}; \\ \gamma = U_0 / U_{\min};$$

$U_{\max}$ - напруга, що відповідає максимальному значенню струму $I_{\max}$ на спадаючій ділянці статичної ВАХ частотного перетворювача; $U_{\min}$ - напруга, що відповідає мініимальному значенню струму $I_{\min}$ на спадаючій ділянці статичної ВАХ частотного перетворювача; $I_{\max}$ - максимальне значення струму на спадаючій ділянці статичної ВАХ частотного перетворювача; $I_{\min}$ - максимальне та мінімальне значення струму на спадаючій ділянці статичної ВАХ частотного перетворювача; U_0 - напруга зміщення, яка відраховується від



початку координат; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - циклічна частота.

Згідно виразів (5) та (6) отримано числові значення коефіцієнтів апроксимації та інших значень параметрів:

$$a_1 = -3,185; \quad a_2 = -2,023; \quad a_3 = 23,098; \quad a_4 = -5,585; \quad a_5 = -30,471;$$

$$a_6 = S_3 = 17,716; \quad S_1 = 9,704; \quad S_2 = -27,423; \quad A_0 = 0,634;$$

$$\alpha = 0,9969; \quad \beta = 0,476; \quad \gamma = 0,713; \quad R_g' = 6461 \text{ Ом};$$

$$\rho = 276 \text{ Ом}; \quad R_L = 13,7 \text{ Ом}; \quad \omega_0 = 17251630 \text{ Гц}.$$

Враховуючи вищенаведені числові значення, які були розраховані на основі виразів (5), (6), визначено похибку вимірювання (4), яка виникає в результаті нестабільності частоти генератора, і вона становить: $\delta_1 = 1,356 \cdot 10^{-5} \%$.

Проведемо розрахунок похибок, які виникають при перетворенні частотно модульованого сигналу в цифровий код: похибка квантування $\delta_{кч}$, похибка малозначущого розряду $\delta_{мзр}$ та похибка нестабільності кварцевого генератора $\delta_{нкг}$.

Так як мікропроцесор використовується в режимі роботи частотоміра миттєвих значень (вимірює частоту сигналу на виході радіовимірювального перетворювача магнітного поля), тому визначимо похибку квантування частотоміра $\delta_{кч}$ для часу вимірювання $t_{вим} = 0,1$ с.

Похибка квантування визначається виразом

$$\delta_{кч} = \frac{1}{f_{\chi} \cdot t_{вим}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де f_{χ} - вимірювана частота, що відповідає верхній межі 5,2 МГц для схеми на основі структури з трьох біполярних транзисторів та двоколекторного магнітотранзистора.

Згідно виразу (7), розраховане значення похибки квантування частотоміра набуває значення $\delta_{кч} = 1,92 \cdot 10^{-6} \%$.



Похибка малозначущого розряду $\delta_{МЗР}$ виникає при виконанні обчислювальних операцій через обмеженість розрядності мікропроцесора [99].

$$\delta_{МЗР} = 2^{-n} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де n - розрядність мікропроцесора, якщо $n = 64$, тоді похибка малозначущого розряду $\delta_{МЗР}$ становить

$$\delta_{МЗР} = 2^{-64} \cdot 100\% \approx 0\%.$$

Похибка нестабільності кварцевого генератора для даного приладу складає $\delta_{НКГ} = 3 \cdot 10^{-3}\%$.

Результативна похибка визначається виразом

$$\delta_{\Sigma} = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_{ТКС}^2 + \delta_U^2 + \delta_T^2 + \delta_1^2 + \delta_{МЗР}^2 + \delta_{НКГ}^2 + \delta_{КЧ}^2}, \quad (9)$$

На основі вищенаведених розрахунків, заповнюємо таблицю 1 для двох випадків: статичні похибки для стабілізованого та нестабілізованого варіантів реалізації радіовимірювального приладу індукції магнітного поля.

Таблиця 1. Похибки розробленого радіовимірювального приладу

Вид похибки	Значення похибки для кожної з схем	
	не стабілізована схема	стабілізована схема
1. Температурна нестабільність ємності КЦС $\delta_{ТКС}$	0,225 %	0,225 %
2. Девіація параметрів джерела живлення δ_U	0,1 %	0,01 %
3. Температурна залежність δ_T	0,23 %	0,045 %
4. Власна нестабільність δ_1	$1,356 \cdot 10^{-5} \%$	$1,356 \cdot 10^{-5} \%$
5. Похибка міри частотоміра $\delta_{НКГ}$	$3 \cdot 10^{-3} \%$	$3 \cdot 10^{-3} \%$
6. Похибка квантування $\delta_{КЧ}$	$1,92 \cdot 10^{-6} \%$	$1,92 \cdot 10^{-6} \%$
7. Похибка розрядності $\delta_{МЗР}$	0 %	0 %
Результуюча похибка δ_{Σ}	0,37 %	0,25 %



Таким чином, згідно виразу (9) розрахована систематична складова основної похибки становить $\delta_{\Sigma} = 0,25\%$. Граничне значення систематичної складової основної похибки набуває значення: $\pm 3\delta_{\Sigma} = \pm 0,75\%$.

Внаслідок інерційності засобів вимірювання та інших причин виникає також динамічна похибка засобів вимірювання, яка є складовою загальної похибки. Для розробленого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля час включення складає близько 20 нс, тому динамічна похибка, що виникає в результаті зміни індукції магнітного поля на п'ять порядків менша, ніж статична похибка самого приладу. В даному випадку, динамічними похибками ми можемо знехтувати так як вони не вносять суттєвого впливу на результативну похибку радіовимірювального приладу індукції магнітного поля, тому в роботі вони не розглядаються.

Для розробленого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля було також розраховано значення мультиплікативної та адитивної похибок на основі рівнянь

$$\Delta_m = \alpha W(k - k_n); \quad (10)$$

$$\Delta_a = \beta(k - k_n) + \dot{\beta}(k - k_n)^2, \quad (11)$$

де Δ_m - мультиплікативна похибка; Δ_a - адитивна похибка; α , β - коефіцієнти; $\dot{\beta}$ - коефіцієнт впливу впливових величин на вихідний параметр.

Розраховані мультиплікативна та адитивна похибки представлені на рис.10 та рис.11

З рис. 11 та рис. 12 видно, що мультиплікативна похибка в діапазоні вимірювань до 60 мТ не перевищує значення $\Delta_m = 0,22\%$, і адитивна похибка в діапазоні вимірювань до 60 мТ не перевищує значення $\Delta_a = 0,185\%$.

Проведемо розрахунок значення виграшу завадостійкості частотної модуляції в порівнянні з амплітудною.

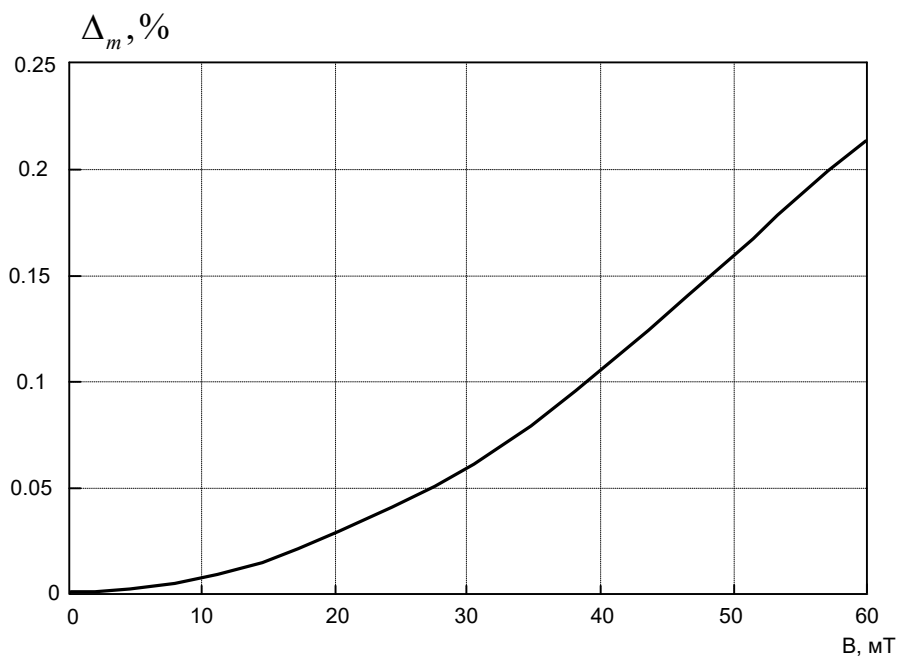


Рисунок 10 – Мультиплікативна похибка

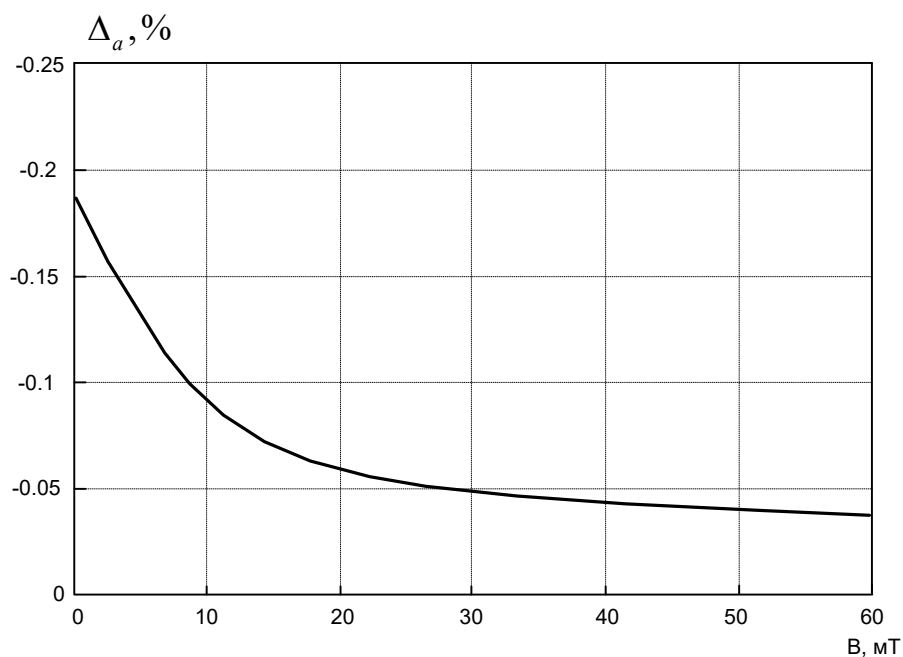


Рисунок 11 – Адитивна похибка

Виграш амплітудної модуляції буде дорівнювати одиниці

$$B_{AM} = \frac{\gamma_{вихAM}}{\gamma_{вхAM}} = 1,$$



де $\gamma_{вихАМ}$ - відношення потужностей сигналу та завади на виході радіовимірювального перетворювача при амплітудній модуляції;

$\gamma_{вхАМ}$ - відношення потужності корисного сигналу до потужності завади на вході радіовимірювального перетворювача.

Отже, при амплітудній модуляції відношення сигнал/шум на виході та вході перетворювача однакові.

У випадку частотної модуляції, величина сигналу на виході перетворювача буде пропорційною девіації частоти вхідного сигналу. Отже, відношення потужностей сигналу та завади на виході приймача

$$\gamma_{вbxЧМ} = \left(\frac{\Delta\omega}{\delta\omega} \right)^2 \gamma_{вxЧМ},$$

де $\Delta\omega$ - максимальна зміна частоти сигналу при корисній частотній модуляції; $\delta\omega$ - максимальна зміна частоти сигналу при паразитній частотній модуляції.

Отже, виграш, що забезпечується частотною модуляцією

$$B_{ЧМ} = \frac{\gamma_{вbxЧМ}}{\gamma_{вxЧМ}} = \left(\frac{\Delta\omega}{\delta\omega} \right)^2. \quad (12)$$

На рис. 12 представлена залежність виграшу завадостійкості від індукції магнітного поля, розрахована за виразом (12).

З рис. 12 видно, що при частотній модуляції в діапазоні до 120 мТ виграш завадостійкості змінюється від 750 до 10.

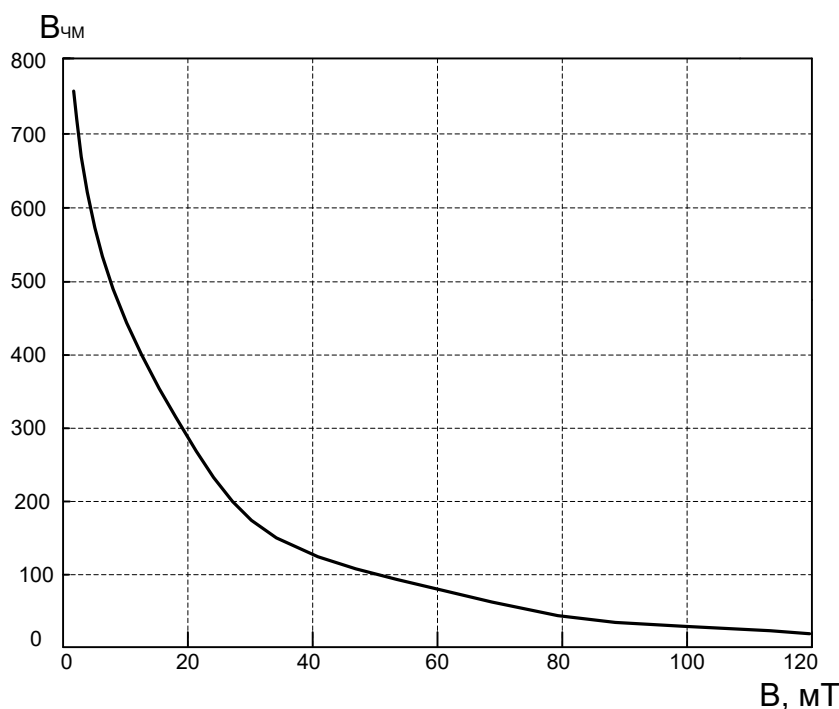


Рисунок 12 – Виграш завадостійкості в залежності від індукції магнітного поля

Висновки

1. Розроблено структурну та принципову схему радіовимірювального приладу індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю, який може використовуватись в різних галузях промисловості: медичній, метрологічній, навігаційній та інших. Принципова схема високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля складається з мікропроцесора, кварцового резонатора, стабілізованої системи живлення, радіовимірювального перетворювача та системи термостабілізації, яка підтримує стабільну роботу радіовимірювального перетворювача в межах $53^{\circ}C \pm 0,05^{\circ}C$.

2. Проведено комп'ютерне моделювання частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, що входить до складу радіовимірювального перетворювача розробленого приладу. Проведено



розрахунок покращення чутливості вимірювання приладу на основі відношення сигнал/шум.

3. Розраховані статичні похибки, що входять до загальної похибки радіовимірювального приладу індукції магнітного поля зпідвищеною чутливістю. Визначена систематична складова основної похибки радіовимірювального приладу індукції магнітного поля, яка становить $\delta_{\Sigma} = 0,25$ %. Визначено, що її граничне значення складає $\pm 0,75$ %. Оцінено вірогідність контролю індукції магнітного поля на основі помилок першого та другого роду. В результаті отримано значення вірогідності контролю $D_I = 0,96$, що є більшим ніж у існуючих засобів контролю індукції магнітного поля.