

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ПРИТУЛА МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.382

**ВИСОКОЧУТЛИВИЙ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИЛАД
ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВІ
РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР**

05.11.08 – радіовимірювальні прилади

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Осадчук Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри радіотехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Підченко Сергій Костянтинович,
Хмельницький національний університет,
професор кафедри телекомунікацій та
комп'ютерно-інтегрованих технологій

доктор технічних наук, доцент
Шевченко Костянтин Леонідович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»,
професор кафедри автоматизації експериментальних
досліджень

Захист відбудеться " 23 " квітня 2021 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий " 19 " березня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. О. Семенов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вимірювання індукції магнітного поля, як характеристики магнітного поля, є однією з найважливіших задач при створенні та забезпеченні функціонування систем навігації, орієнтації і стабілізації, магнітної томографії, реалізації систем безпеки та охорони різних об'єктів, а також сучасних мобільних робототехнічних комплексів наземного, підводного і космічного призначення. Це все вимагає випереджаючої розробки магнітометрів з високою чутливістю для вимірювання індукції магнітних полів. Варто відзначити, що часто вимірювання індукції магнітного поля повинно проводитись в умовах впливу зовнішніх завад.

Однією із основних складових радіовимірювальних приладів є сенсор, який може складатись з двох ключових елементів: чутливий елемент і спеціальна схема обробки вихідного сигналу чутливого елемента (перетворювач), 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. В даний час розроблено дуже багато приладів для вимірювання параметрів манітного поля. Серед них є і надчутливі, наприклад, які використовують ефект Джозефсона. Але практичного широкого застосування вони не отримали, оскільки такі прилади вимагають криогенного 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.

З вище наведеного випливає, що перспективним науковим напрямком є розробка та створення приладів вимірювання індукції магнітного поля, в яких використовуються напівпровідникові сенсори з частотними перетворювачами. Застосування частотного перетворювача з напівпровідниковим магніточутливим елементом в якості сенсора радіовимірювального приладу, дозволяє компенсувати активні втрати в приладі та підвищити коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача. Також, 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась згідно з госпдоговірними та держбюджетними науково-дослідними роботами: 32-Д-354 "Розробка радіовимірювальних пристроїв на основі транзисторних структур з від'ємним опором" (2013-2014 р.), № державної реєстрації 0113U003133; 32-Д-373 "Радіовимірювальні сенсори фізичних величин на основі реактивних властивостей і від'ємного опору напівпровідникових структур" (2015-2016 р.), № державної реєстрації, 0115U001123; "Розробка моделей та принципів схем радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля та їх дослідження" (2016 р.), № державної реєстрації, 0116U005137; 32-Д-386 "Розроблення теоретичних засад, методів і приладів вимірювання та контролю газового середовища на військових та цивільних об'єктах" (2017 р.),

№ державної реєстрації, 0117U000573; а також згідно програм розвитку електронної промисловості України на 2015-2020 роки "Електроніка України – 2015".

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення чутливості радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля шляхом використання частотних перетворювачів "магнітна індукція – частота" на основі реактивних властивостей транзисторних структур.

Об'єктом дослідження є процес перетворення індукції магнітного поля у частотний сигнал в чутливих напівпровідникових структурах.

Предмет дослідження – математичні моделі та схемотехнічні рішення радіовимірювальних частотних перетворювачів на основі реактивних властивостей транзисторних структур.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язуються такі **задачі**:

- провести аналіз сучасного стану розвитку радіовимірювальних приладів з різними сенсорами магнітного поля;
- вдосконалити математичні моделі перетворювачів магнітного поля радіовимірювальних приладів, схемотехнічна реалізація яких забезпечує підвищення чутливості приладу на основі перетворення "магнітна індукція - частота", отримати аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості;
- провести експериментальне дослідження запропонованих варіантів радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля, щоб підтвердити відповідність математичних моделей реальним схемотехнічним рішенням;
- розробити високочутливий радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур та отримати його метрологічні характеристики.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні:

- рівнянь математичної фізики та фізики напівпровідників при розробці математичних моделей радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля;
- положень комплексного аналізу для визначення функції перетворення та рівняння чутливості радіовимірювальних перетворювачів;
- теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення функцій перетворення та рівнянь чутливості;
- теорії ймовірності для оцінки випадкових похибок вимірювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вдосконалено математичну модель* радіовимірювального перетворювача магнітного поля радіовимірювального приладу, який складається з сенсора Холла та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано вплив індукції та частоти зовнішнього магнітного поля, напруг живлення та керування на частоту вихідних коливань перетворювача, схемотехнічна реалізація якої забезпечила підвищення чутливості до 620 Гц/мТл всього радіовимірювального приладу в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0...200 мТл.

2. *Вдосконалено математичну модель* радіовимірювального перетворювача магнітного поля радіовимірювального приладу, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано вплив індукції та частоти зовнішнього магнітного поля, напруг живлення та керування на частоту вихідних коливань перетворювача, схемотехнічна реалізація якої забезпечила зменшення похибки нелінійності перетворювача до 1,8% та приладу в цілому.

3. *Вдосконалено математичну модель* радіовимірювального перетворювача магнітного поля радіовимірювального приладу, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано вплив індукції та частоти зовнішнього магнітного поля, напруг живлення та керування на частоту вихідних коливань перетворювача, схемотехнічна реалізація якої забезпечила підвищення чутливості радіовимірювального приладу до 1,25 кГц/мТл в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0...1000 мТл.

4. *Отримано нові функції перетворення та рівняння чутливості* перетворювачів радіовимірювального приладу індукції магнітного поля, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховано вплив індукції та частоти магнітного поля, напруг живлення та керування на частоту вихідних коливань радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля з диференційним опором, що дозволило вибрати схемотехнічне рішення з найбільшою чутливістю для розробки високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність роботи полягає в тому, що:

1. Запропоновані моделі забезпечують побудову більш досконалих, порівняно з відомими, радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля.

2. Вдосконалено три схемотехнічні рішення радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля: перше – магніточутливий елемент Холла з частотним перетворювачем на основі двозатворного та двох біполярних транзисторів; друге – магніточутливий двоколекторний біполярний транзистор з частотним перетворювачем на основі двозатворного та двох біполярних транзисторів; третє – магніточутливий двоколекторний біполярний транзистор з частотним перетворювачем на основі трьох біполярних транзисторів.

3. Експериментально досліджено характеристики трьох радіовимірювальних частотних перетворювачів вимірювального приладу індукції магнітного поля:

- чутливість першого варіанту радіовимірювального перетворювача радіовимірювального приладу змінюється в межах від 1,6 кГц/мТл при магнітній індукції 10 мТл до 0,2 кГц/мТл при магнітній індукції 100 мТл; подальше коливання чутливості від 0,2 кГц/мТл до 0,26 кГц/мТл в діапазоні зміни магнітної індукції 100...1000 мТл є незначним;

- чутливість другого варіанту радіовимірювального перетворювача радіовимірювального приладу змінюється в залежності від значення зовнішнього магнітного поля: при індукції магнітного поля 100 мТл, чутливість пристрою становить 0,1765 кГц/мТл, а при магнітній індукції 1000 мТл – 0,1645 кГц/мТл; досліджуваний радіовимірювальний перетворювач радіовимірювального приладу індукції магнітного має найменшу похибку нелінійності, значення якої не перевищує 1,8% в діапазоні 0...300 мТ, та 4,7% в діапазоні 0,3...1 Т;

- третій радіовимірювальний перетворювач радіовимірювального приладу має різну крутість характеристики чутливості при різному рівні магнітної індукції: для індукції магнітного поля 10 мТл чутливість становить близько 2,8 кГц/мТл, а при індукції магнітного поля 1000 мТл чутливість становить близько 0,83 кГц/мТл; найбільша чутливість спостерігається при магнітній індукції в межах 0...100 мТ.

4. Розроблено високочутливий радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур, який використовує радіовимірювальний частотний перетворювач, що складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів.

5. Розраховані метрологічні характеристики розробленого високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур, що дозволить в подальшому провести перевірку приладу для використання його у вимірюваннях та ін.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно у Вінницькому національному технічному університеті. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] - розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля з магнітотранзистором та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з трьох біполярних транзисторів; [2] - розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля з сенсором Холла та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з двозатворного та двох біполярних транзисторів; [3] - розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля з двоколекторним магнітотранзистором та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з двозатворного та двох біполярних транзисторів; [4] - розробка математичних моделей частотних перетворювачів на транзисторних структурах різних типів; [5] - математичне дослідження автогенератора на транзисторній структурі з диференційним опором; [6] - розробка математичної моделі транзисторної структури, еквівалентна ємність якої керується напругою; [7] - порівняльний аналіз трьох різних схемотехнічних рішень радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля; [8] - аналіз та дослідження напівпровідникових магнітних сенсорів, які розроблені та використовуються в промисловості; [9] - розробка схемотехнічного рішення частотного перетворювача магнітного поля; [10] - дослідження вимірювальних приладів на ефекті Джозефсона, визначення їх недоліків та переваг; [11] – запропоновано структурну схему трьохканального приладу вимірювання індукції магнітного поля; [12] – запропоно-

вано використання формувача імпульсів в структурній схемі приладу вимірювання індукції магнітного поля; [13] – запропоновано схему автогенераторного кола мікроелектронного приладу для вимірювання магнітної індукції; [14] – запропоновано схему підключення двоколекторного магнітотранзистора в загальну схему приладу вимірювання магнітної індукції.

Апробація матеріалів дисертації.

Результати досліджень, що викладено у дисертації, було апробовано на наукових конференціях, серед них:

1. IV наукова конференція "Научная индустрия европейского континента – 2007" (27 – 28 листопада 2007 р., м. Прага, Чехія).

2. Міжнародна конференція TCSET'2008 "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії" (19-23 лютого 2008р., Львів-Славське, Україна).

3. Перша Міжнародна науково-практична конференція "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2008)" (19-23 травня 2008р., м. Київ, Україна).

4. Міжнародна науково-практична конференція "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи" (16 – 22 березня 2015 р., м. Київ, Україна).

5. Міжнародна конференція "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science. TCSET'2016" (23-26 лютого 2016 р., Львів-Славське, Україна).

6. 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016 (30 червня - 4 липня 2016 р., м. Ерлагол, республіка Алтай, Російська федерація).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 14 наукових працях. Серед яких 3 статті у фахових виданнях зі списку ДАК України, 2 статті в міжнародних періодичних виданнях, 5 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 4 патенти на корисні моделі України. Серед зазначених наукових праць, чотири опубліковано в фахових виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел і 5 додатків. Загальний обсяг дисертації 186 сторінки, з яких основний зміст викладено на 145 сторінках друкованого тексту, містить 78 рисунків, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 104 найменування. Додатки містять результати експериментальних досліджень, фрагменти програмного забезпечення та акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів досліджень та публікації, структуру і обсяг роботи.

У першому розділі проведено аналіз публікацій та патентів, присвячених сучасним приладам вимірювання параметрів магнітного поля. Зокрема, було проаналізовано радіовимірювальні прилади з магніторезистивними сенсорами на ефекті Гаусса, прилади з анізотропними магніторезисторами, прилади з магнітними сенсорами на основі гігантського магніторезистивного ефекту, прилади на основі спін-тунельних магніторезистивних сенсорів, приладів з сенсорами на основі ядерного магнітного резонансу, приладів, які використовують явища надпровідності, прилади з ферозондовими сенсорами, приладів з напівпровідниковими сенсорами, приладів з частотними перетворювачами.

Показано, що за останні десятиріччя спостерігається інтенсивний розвиток радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля, визначено їх переваги та недоліки. Найбільш оптимальним для практичної реалізації є частотний метод вимірювання індукції магнітного поля на основі залежності реактивних властивостей транзисторних структур з диференційним опором від індукції магнітного поля. Прилади, які побудовані на цьому методі, дозволяють усунути недоліки існуючих радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля, підвищити точність і чутливість, відмовитися від використання підсилювальних пристроїв і класичних аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці сигналів, при цьому також можлива передача сигналів на відстань. Аналіз сучасного стану радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля дозволив сформулювати мету і задачі досліджень, а також оцінити їх теоретичний рівень.

У другому розділі дисертації були вдосконалені математичні моделі трьох різних радіовимірювальних частотних перетворювачів з магніточутливими елементами.

Перше схемотехнічне рішення зображено на рис. 1.

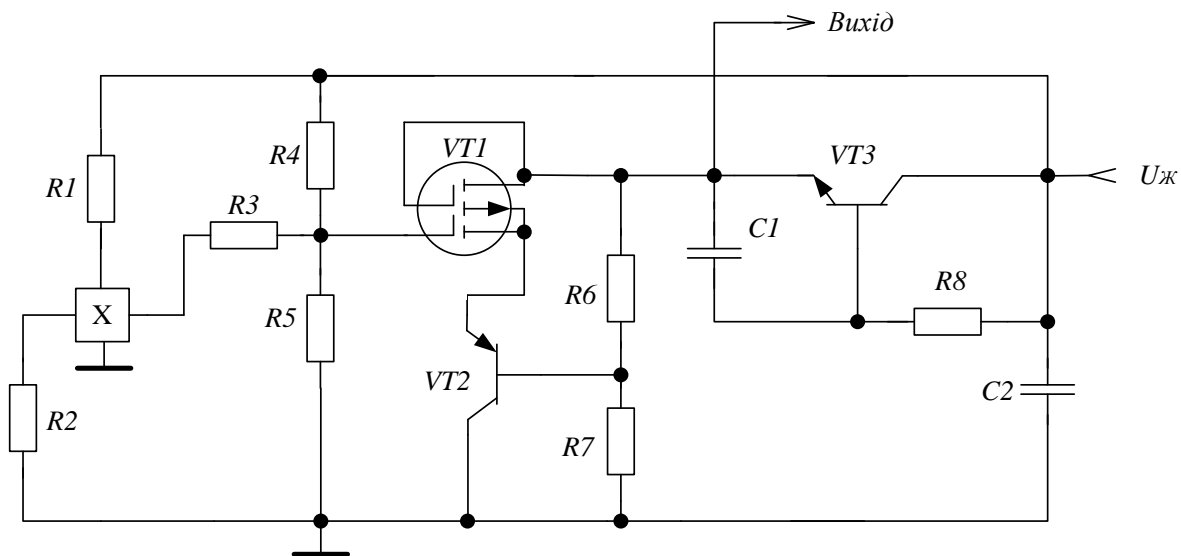


Рисунок 1 – Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з сенсором Холла

Відповідно до створеної еквівалентної схеми рис. 2, була розроблена математична модель (1) першого схемотехнічного рішення.

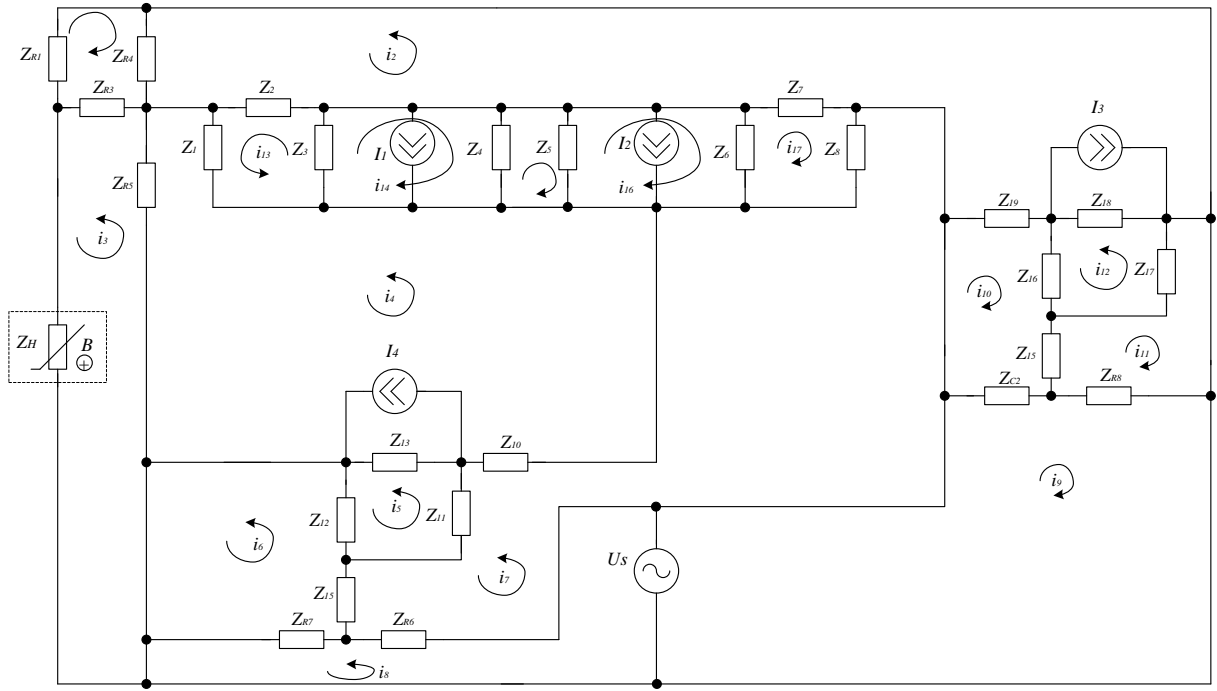


Рисунок 2 – Еквівалентна схема перетворювача із контурними струмами

$$\begin{cases}
 0 = (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13})i_5 - Z_{11}i_7 - Z_{13}(I_4 + i_4) - Z_{12}i_6; \\
 0 = (Z_{R_1} + Z_{R_4} + Z_{R_3})i_1 + Z_{R_4}i_2 + Z_{R_3}i_3; \\
 \dot{U}_S = (Z_{R_7} + Z_{R_6})i_8 - Z_{R_7}i_6 - Z_{R_6}i_7; \\
 0 = (Z_{R_3} + Z_{R_5} + Z_H)i_3 + Z_{R_3}i_1 - Z_{R_5}i_4; \\
 0 = (Z_{R_5} + Z_1 + Z_{10} + Z_{13})i_4 - Z_{R_4}i_3 - Z_{11}i_7 - Z_{10}i_7 + Z_{13}(I_4 - i_{15}); \\
 0 = (Z_{R_4} + Z_2 + Z_7 + Z_{19} + Z_{18})i_2 + Z_{R_4}i_1 - Z_2i_{13} + Z_7i_{17} + Z_{19}i_{10} - Z_{18}(I_3 + i_{12}); \\
 0 = (Z_{R_7} + Z_{14} + Z_{12})i_6 - Z_{R_7}i_8 - Z_{14}i_7 - Z_{12}i_5; \\
 0 = (Z_8 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{14} + Z_{R_6})i_7 + Z_8i_{17} - Z_9i_4 - Z_{10}i_4 - \\
 - Z_{11}i_5 - Z_{14}i_6 - Z_{R_6}i_8; \\
 0 = (Z_{16} + Z_{17} + Z_{18})i_{12} + Z_{16}i_{10} + Z_{17}i_{11} + Z_{18}(I_3 - i_2); \\
 \dot{U}_S = (Z_{C_1} + Z_{R_8})i_9 + Z_{C_1}i_{10} + Z_{R_8}i_{11}; \\
 0 = (Z_{C_1} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{19})i_{10} + Z_{C_1}i_9 - Z_{15}i_{11} + Z_{16}i_{12} + Z_{19}i_2; \\
 0 = (Z_{R_8} + Z_{15} + Z_{17})i_{11} + Z_{R_8}i_9 - Z_{15}i_{10} + Z_{17}i_{10}; \\
 0 = (Z_3 + Z_4)i_{14} + Z_3i_{13} - Z_4i_{15} + Z_3(I_1 + I_2) - Z_4(I_1 + I_2); \\
 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_3)i_{13} - Z_1i_4 + Z_3(i_{14} + I_1) - Z_2i_2 + Z_3I_2 - \\
 - Z_1(I_2 + I_1) - Z_2(I_1 + I_2); \\
 0 = (Z_6 + Z_7 + Z_8)i_{17} - Z_6i_{16} + Z_7i_2 + Z_8i_7 + Z_6(I_1 + I_2) - Z_7(I_1 + I_2) - Z_8(I_1 + I_2), \\
 0 = (Z_4 + Z_5)i_{15} - Z_4i_{14} - Z_5i_{16} + Z_4(I_1 + I_2) - Z_5(I_1 + I_2); \\
 0 = (Z_5 + Z_6)i_{16} - Z_5i_{15} - Z_6i_{17} + Z_5(I_1 + I_2) - Z_6(I_1 + I_2);
 \end{cases} \quad (1)$$

Відповідно до методу Ляпунова було визначено функцію перетворення радіовимірювального перетворювача

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

де $A_1 = C_B(B)R_B(B)$,

$$A_2 = \sqrt{A_1^2 + R_H(B)A_1 C_{DS2} - L_{екв} C_{DS2}}^2 + 4L_{екв} C_{DS2} A_1^2,$$

$C_H(B), R_H(B)$ - еквівалентна ємність та опір магніточутливого елементу,

$L_{екв}$ - еквівалентна індуктивність частотного перетворювача,

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

Оскільки як засіб вимірювання частоти був обраний цифровий частотомір миттєвих значень, то рівняння перетворення всього радіовимірювального приладу матиме вигляді $N = f_0 / F(B)$.

Графіки залежності функції перетворення та чутливості ($S(B) = |d(F(B))/dB|$) представлені на рис. За та 3б відповідно при трьох значеннях напруг живлення: 1) $U_{ж} = 6$ В; 2) $U_{ж} = 5,5$ В; 3) $U_{ж} = 5$ В.

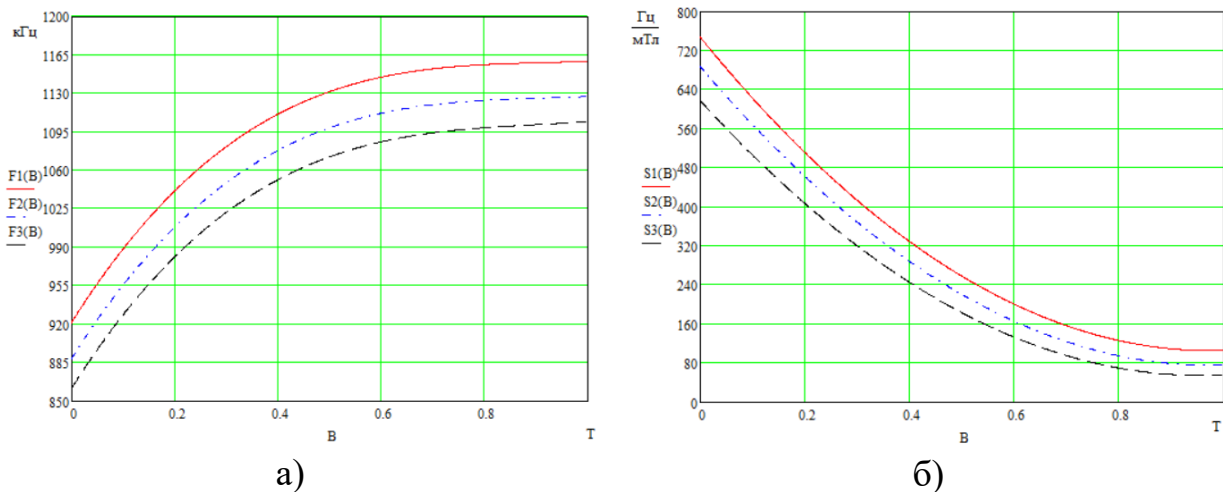


Рисунок 3 – Графіки теоретичних функцій перетворення (а) та чутливості (б) перетворювача магнітного поля

Як видно з графіків на рис. 4, найбільша чутливість приладу лежить в діапазоні від 0...100 мТл і складає 300...600 Гц/мТл.

Для функції перетворення радіовимірювального перетворювача індукції магнітного поля при нарузі живлення 5,5 В, було поведено лінеаризацію. Діапазон вимірювання розділено на три піддіапазони: 0...0,2 Т; 0,2...0,8 Т; 0,8...1 Т. За допомогою математичного пакету MathCad було отримано вирази для функції перетворення в піддіапазонах:

$$f_1(B) = 620B + 889; f_2(B) = 183B + 992; f_3(B) = 50B + 1085.$$

При лінеаризації функції перетворення були отримані сталі значення чутливості та похибки нелінійності ($\gamma_H = \Delta_{\max} / |f_B - f_H|$) в піддіапазонах:

$$0...0,2 \text{ Т: } S_1(B) = 620 \text{ Гц/мТл}; \gamma_{H1} = 0,041;$$

0,2...0,8 Т: $S_2(B) = 183$ Гц/мТл; $\gamma_{H2} = 0,13$;

0,8...1 Т: $S_3(B) = 50$ Гц/мТл; $\gamma_{H3} = 0,05$.

Зменшити похибку нелінійності можливо за рахунок розбиття на більшу кількість піддіапазонів.

За допомогою лабораторного обладнання було проведено експериментальне дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) частотного перетворювача на двох біполярних та польовому транзисторах без магнітного сенсора (рис. 4).



Рисунок 4 – Статична (а) та динамічна (б) ВАХ частотного перетворювача на двох біполярних та польовому транзисторах (по вертикальній вісі одна поділка – 2 мА, по горизонтальній вісі – 2 В)

Відповідно до рис. 4,а, ВАХ транзисторної структури мають як зростаючу так і спадаючу ділянку. Розміщуючи робочу точку на спадаючій частині ВАХ, можна отримати так званий диференційний опір в коливальному контурі, який компенсує втрати в ньому. В цьому випадку відбувається генерація коливань з певною частотою (рис. 4,б).

Друге схемотехнічне рішення зображено на рис. 5.

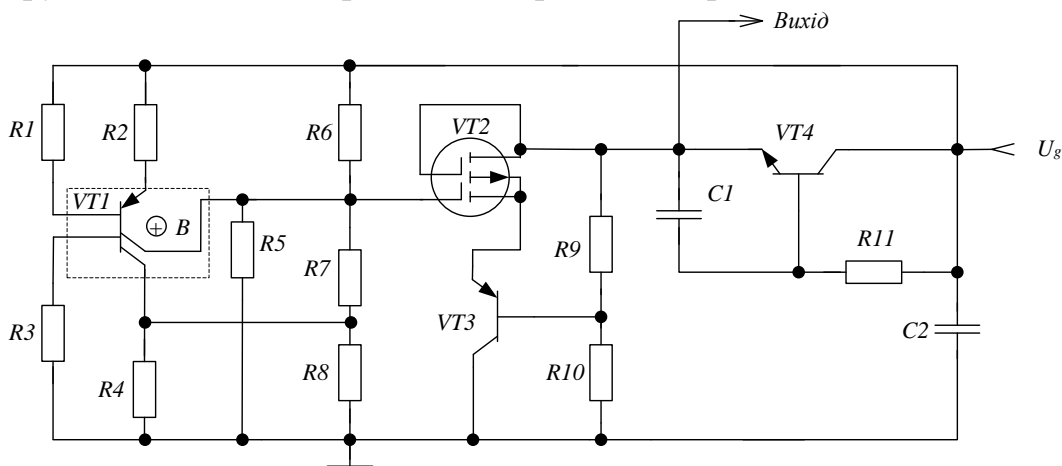


Рисунок 5 – Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля

Еквівалентна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля (рис. 5) представлена на рис. 6. Математична модель описана системою рівнянь рівноваги (3).

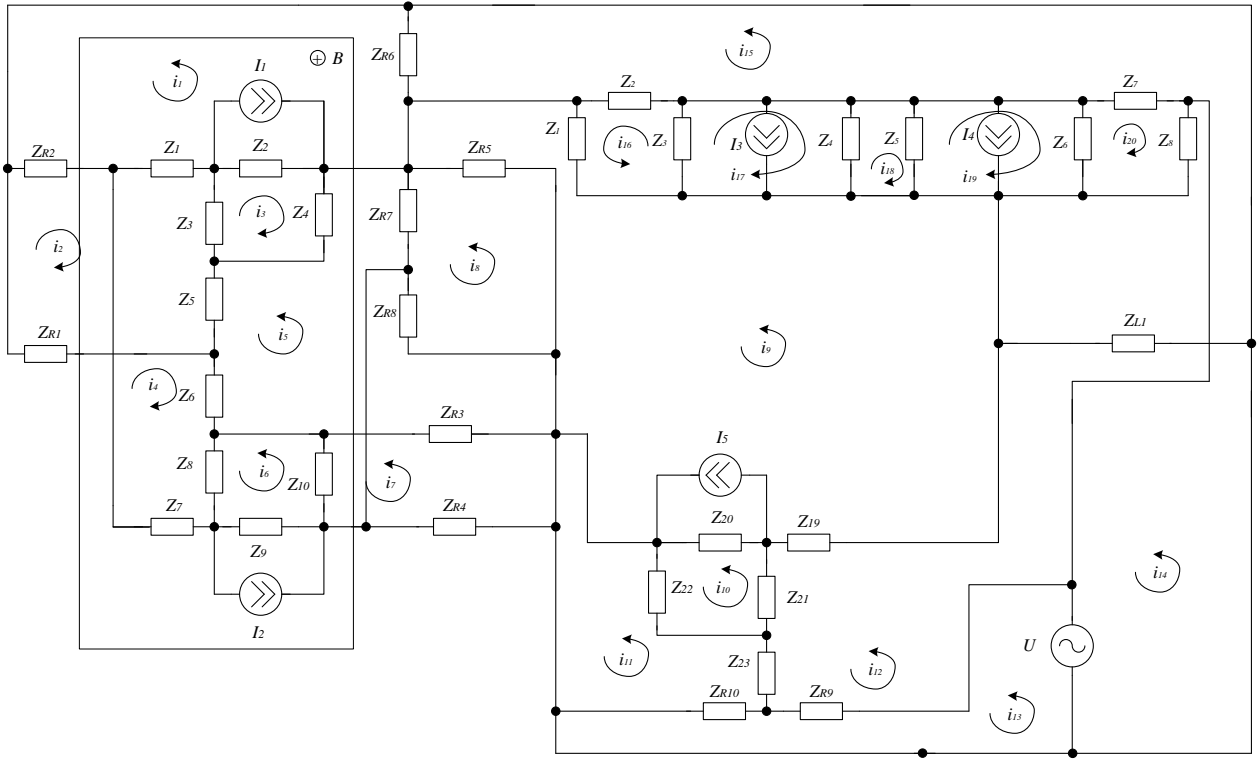


Рисунок 6 – Еквівалентна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля

$$\begin{cases}
 0 = (Z_2 + Z_3 + Z_4) i_3 + Z_2 (i_1 - I_1) - Z_3 i_2 + Z_4 i_5; \\
 0 = (Z_{R_2} + Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_{R_1}) i_2 + (Z_{R_2} + Z_1) i_1 - Z_3 i_3 + Z_5 (i_4 + i_5); \\
 \dot{U} = (Z_{R_{10}} + Z_{R_9}) i_{13} - Z_{R_{10}} i_{11} - Z_{R_9} i_{12}; \\
 0 = (Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8) i_4 - Z_3 i_3 + (i_1 + i_2) Z_1 + (Z_6 + Z_6) i_5 + (i_5 + i_6) Z_8; \\
 0 = (Z_{R_2} + Z_1 + Z_2 + Z_{R_6}) i_1 + Z_{R_2} i_2 + Z_1 i_2 + Z_2 (i_3 - I_1) - Z_{R_6} i_{15} + Z_1 i_4; \\
 0 = (Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{R_7}) i_5 + Z_4 i_3 + (i_4 + i_5) Z_5 + Z_6 i_4 + \\
 + (i_4 + i_6) Z_8 + Z_9 (i_6 + I_2) - Z_{R_7} i_8; \\
 0 = (Z_8 + Z_9 + Z_{10}) i_6 + Z_8 (i_5 + i_4) + Z_9 (i_5 + I_2) - Z_{10} i_7; \\
 0 = (Z_{R_3} + Z_{R_4} + Z_{10}) i_7 - Z_{10} i_6; \\
 0 = (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13}) i_{16} - Z_{12} i_{15} - Z_{11} i_9 + Z_{13} (I_3 + I_4) + Z_{13} i_{17} - Z_{11} (I_3 + I_4) - Z_{12} (I_3 + I_4); \\
 0 = (Z_{R_5} + Z_{R_7} + Z_{R_8}) i_8 - Z_{R_7} i_5 - Z_{R_5} i_9; \\
 0 = (Z_{22} + Z_{23} + Z_{R_{10}}) i_{11} - Z_{22} i_{10} - Z_{23} i_{12} - Z_{R_{10}} i_{13}; \\
 0 = (Z_{R_5} + Z_{20} + Z_{19} + Z_{11}) i_9 - Z_{R_5} i_8 + Z_{20} (I_5 - i_{10}) - Z_{19} i_{12} - Z_{11} i_{16}; \\
 0 = (Z_{20} + Z_{21} + Z_{22}) i_{10} - Z_{22} i_{11} - Z_{21} i_{12} - Z_{20} (I_5 + i_9); \\
 0 = (Z_{19} + Z_{21} + Z_{23} + Z_{R_9} + Z_{18}) i_{12} - Z_{19} i_9 - Z_{21} i_{10} - Z_{23} i_{11} - Z_{R_9} i_{13} + Z_{18} i_{20}; \\
 \dot{U} = Z_{L_1} i_{14} - Z_{L_1} i_{15}; \\
 0 = (Z_{R_6} + Z_{12} + Z_{17} + Z_{L_1}) i_{15} - Z_{R_6} i_1 - Z_{12} i_{16} + Z_{17} i_{20} - Z_{L_1} i_{14}; \\
 0 = (Z_{16} + Z_{17} + Z_{18}) i_{20} - Z_{16} i_{19} + Z_{18} i_{12} + Z_{17} i_{15} + Z_{16} (I_3 + I_4) - Z_{17} (I_3 + I_4) - Z_{18} (I_3 + I_4); \\
 0 = (Z_{13} + Z_{14}) i_{17} + Z_{13} i_{16} - Z_{14} i_{18} + Z_{13} (I_3 + I_4) - Z_{14} (I_3 + I_4); \\
 0 = (Z_{15} + Z_{16}) i_{19} - Z_{15} i_{18} - Z_{16} i_{20} + Z_{15} (I_3 + I_4) - Z_{16} (I_3 + I_4); \\
 0 = (Z_{14} + Z_{15}) i_{18} - Z_{14} i_{17} - Z_{15} i_{19} + Z_{14} (I_3 + I_4) - Z_{15} (I_3 + I_4);
 \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язавши систему рівнянь рівноваги за допомогою обчислювальної техніки, отримуємо функцію перетворення радіовимірювального перетворювача

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4L_{екв} C_{GD} A_2^2}}{2L_{екв} C_{GD} A_2^2}}, \quad (4)$$

де $A_1 = L_{екв} C_{GD} - A_2^2 - C_{GD} A_2 R_B(B)$; $A_2 = C_B(B) R_B(B)$; $L_{екв}$ – еквівалентна індуктивність транзисторного аналога індуктивності; C_B, R_B – еквівалентні ємність та опір області бази біполярного двоколекторного магнітотранзистора; C_{GD} – ємність області затвор-витік МДН транзистора.

Графік залежності функції перетворення та чутливості представлений на рис. 7,а та 7,б відповідно при трьох значеннях напруг живлення: 1) $U_{Ж} = 6$ В; 2) $U_{Ж} = 5,5$ В; 3) $U_{Ж} = 5$ В.

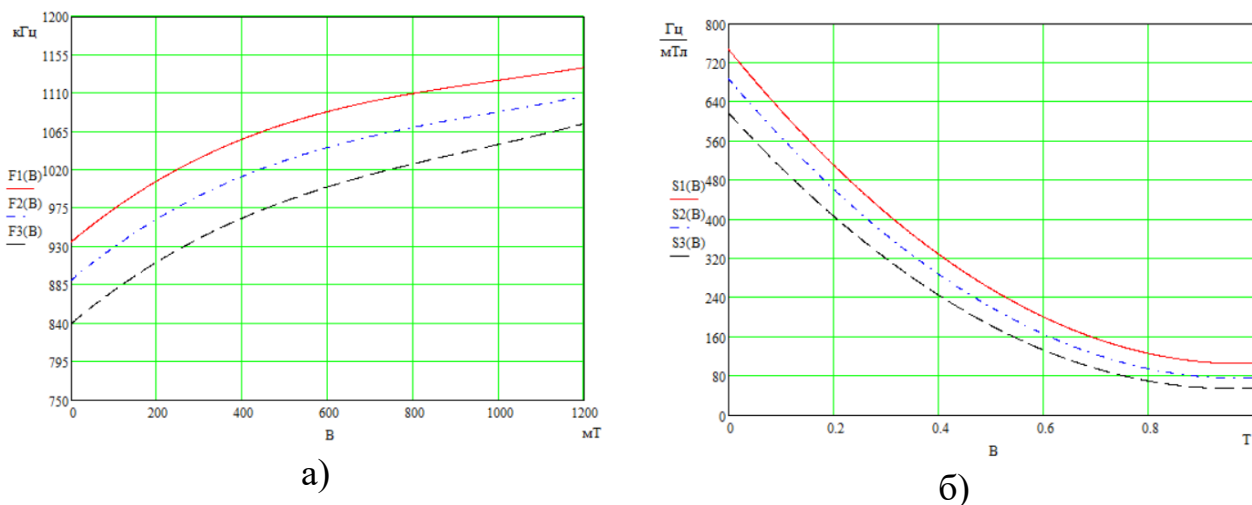


Рисунок 7 – Графіки теоретичних функції перетворення (а) та чутливості (б) перетворювача магнітного поля

Аналіз графіків на рис. 7 показав, що найвищу чутливість частотний перетворювач магнітного поля на основі двоколекторного, двозатворного та двох біполярних транзисторів має в діапазоні $0 \dots 200$ мТл, вона складає $240 \dots 405$ Гц/мТл при нарузі живлення 5,5 В.

Для теоретичної функції перетворення радіовимірювального перетворювача індукції магнітного поля при нарузі живлення 5 В було проведено її лінеаризацію. Розбивши діапазон вимірювання на два піддіапазони ($0 \dots 0,3$ Т; $0,3 \dots 1$ Т) та використавши математичний пакет MathCad, отримуємо вирази для функції перетворення в піддіапазонах:

$$f_1(B) = 0,35B + 840; \quad f_2(B) = 0,15B + 905.$$

При лінеаризації функції перетворення отримано значення чутливості та похибки нелінійності в піддіапазонах:

$$0 \dots 0,3 \text{ Т: } S_1(B) = 350 \text{ Гц/мТл}; \quad \gamma_{H1} = 0,018;$$

$$0,3 \dots 1 \text{ Т: } S_2(B) = 150 \text{ Гц/мТл}; \quad \gamma_{H2} = 0,047.$$

Чутливість даного варіанту перетворювача зменшилась майже в два рази при магнітній індукції до 300 мТл.

Третє схемотехнічне рішення та його еквівалентна схема зображені на рис. 8 та рис. 9 відповідно.

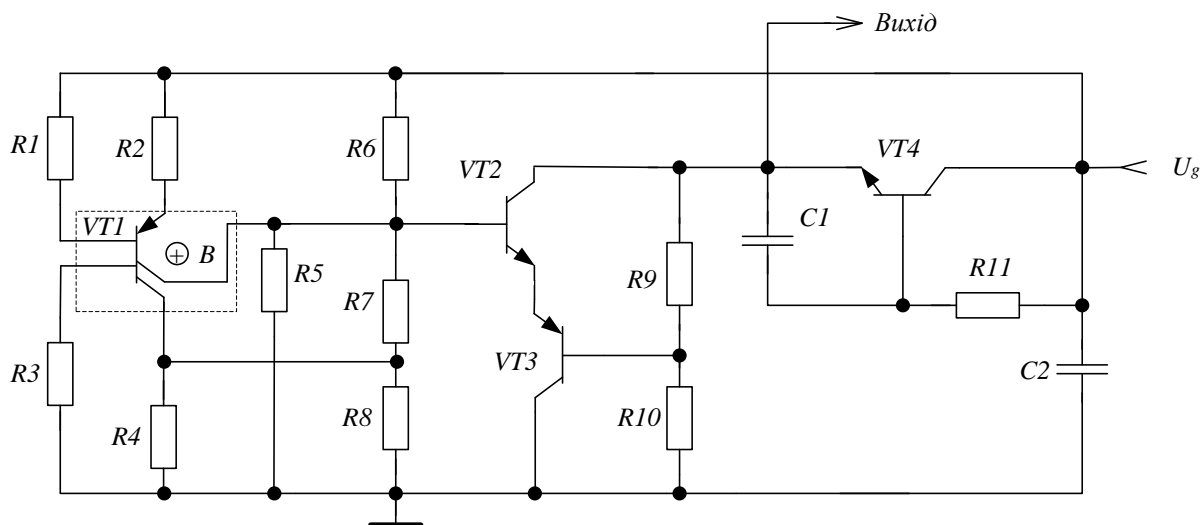


Рисунок 8 – Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача на біполярній магніточутливій структурі з активним індуктивним елементом

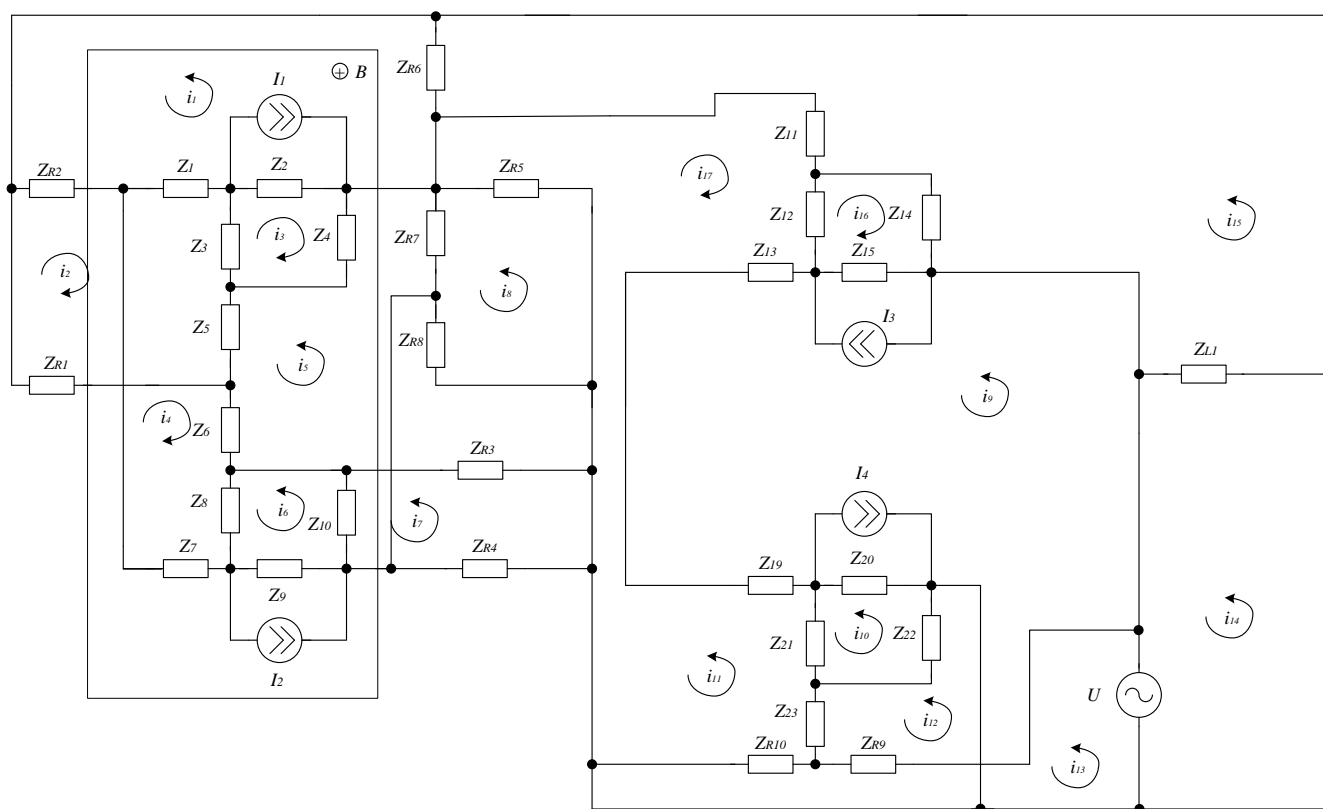


Рисунок 9 – Перетворена нелінійна еквівалентна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітної індукції

Математична модель з урахуванням позначень на рис. 9 має вигляд:

$$\begin{cases}
0 = (Z_{R_2} + Z_1 + Z_2 + Z_{R_6})i_1 + Z_{R_2}i_2 + Z_1i_2 + Z_2(i_3 - I_1) - Z_{R_6}i_{15} + Z_1i_4; \\
0 = (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13})i_{17} + Z_{11}i_{15} + Z_{13}i_9 + Z_{13}(I_3 + I_4) + Z_{13}i_{17} \\
0 = (Z_2 + Z_3 + Z_4)i_3 + Z_2(i_1 - I_1) - Z_3i_2 + Z_4i_5; \\
0 = (Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8)i_4 - Z_3i_3 + (i_1 + i_2)Z_1 + (Z_6 + Z_6)i_5 + (i_5 + i_6)Z_8; \\
\dot{U} = (Z_{R_{10}} + Z_{R_9})i_{13} - Z_{R_{10}}i_{11} - Z_{R_9}i_{12}; \\
0 = (Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_8 + Z_9 + Z_{R_7})i_5 + Z_4i_3 + (i_4 + i_5)Z_5 + Z_6i_4 + \\
+ (i_4 + i_6)Z_8 + Z_9(i_6 + I_2) - Z_{R_7}i_8; \\
0 = (Z_8 + Z_9 + Z_{10})i_6 + Z_8(i_5 + i_4) + Z_9(i_5 + I_2) - Z_{10}i_7; \\
0 = (Z_{R_3} + Z_{R_4} + Z_{10})i_7 - Z_{10}i_6; \\
0 = (Z_{R_5} + Z_{R_7} + Z_{R_8})i_8 - Z_{R_7}i_5 - Z_{R_5}i_9; \\
\dot{U} = Z_{L_1}i_{14} - Z_{L_1}i_{15}; \\
0 = (Z_{R_5} + Z_{20} + Z_{19} + Z_{11})i_9 - Z_{R_5}i_8 + Z_{20}(I_5 - i_{10}) - Z_{19}i_{12} - Z_{11}i_{16}; \\
0 = (Z_{20} + Z_{21} + Z_{22})i_{10} - Z_{22}i_{11} - Z_{21}i_{12} - Z_{20}(I_5 + i_9); \\
0 = (Z_{22} + Z_{23} + Z_{R_{10}})i_{11} - Z_{22}i_{10} - Z_{23}i_{12} - Z_{R_{10}}i_{13}; \\
0 = (Z_{19} + Z_{21} + Z_{23} + Z_{R_9})i_{12} - Z_{19}i_9 - Z_{21}i_{10} - Z_{23}i_{11} - Z_{R_9}i_{13} + Z_{18}i_{20}; \\
0 = (Z_{R_2} + Z_1 + Z_3 + Z_5 + Z_{R_1})i_2 + (Z_{R_2} + Z_1)i_1 - Z_3i_3 + Z_5(i_4 + i_5); \\
0 = (Z_{R_6} + Z_{11} + Z_{14} + Z_{L_1})i_{15} - Z_{R_6}i_1 + Z_{14}i_{16} + Z_{11}i_{17} - Z_{L_1}i_{14}; \\
0 = (Z_{13} + Z_{14})i_{17} + Z_{13}i_{16} - Z_{14}i_{18} + Z_{13}(I_3 + I_4) - Z_{14}(I_3 + I_4);
\end{cases} \quad (5)$$

Вплив магнітного поля на еквівалентні ємність та індуктивність коливального контура передається через зміну параметрів елементів еквівалентної схеми, тому функція перетворення описується рівнянням

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-(A_1 - A_3) + \sqrt{(A_1 - A_3)^2 + 8(C_e + C_b)LC_b C_e A_2^2}}{2L_{екв} C_b C_e A_2^2}}, \quad (6)$$

де $A_1 = L_{екв} C_b C_e - (C_e + C_b)A_2^2$,

$A_2 = C_B(B)R_B(B)$,

$A_3 = R_B^2(B)C_B(B)C_e C_b$,

$L_{екв}$, C_b , C_e - еквівалентна індуктивність, ємність бази та емітера.

Графік залежності функції перетворення та чутливості представлено на рис. 10,а та 10,б відповідно при трьох значеннях напруг живлення: 1) $U_{ж} = 5$ В; 2) $U_{ж} = 4$ В; 3) $U_{ж} = 3$ В.

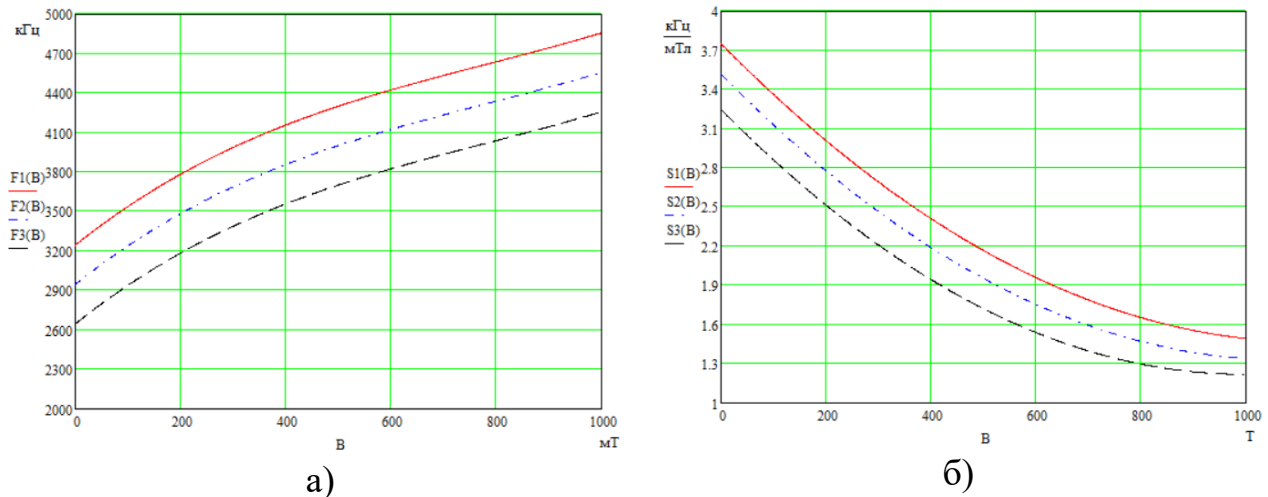


Рисунок 10 – Графіки теоретичних функції перетворення (а) та чутливості (б) перетворювача магнітного поля

Аналіз графіків на рис. 10 показує, що при зростанні значення індукції магнітного поля, чутливість радіовимірювального перетворювача спадає. В діапазоні 0...200 мТл, графіки чутливості є близькими до лінійних. І в даному діапазоні чутливість вимірювання радіовимірювального частотного перетворювача приладу змінюється в діапазоні 2,5...3,3 кГц/мТл.

Результат експериментального дослідження ВАХ частотного перетворювача на двох біполярних та польовому транзисторах без магнітного сенсора представлений на рис. 11.

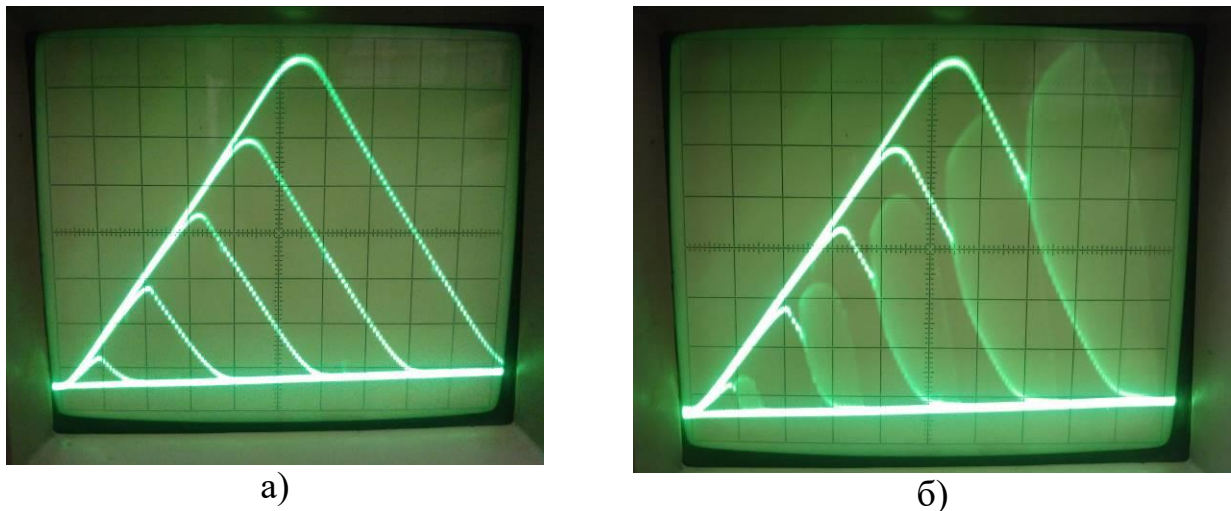


Рисунок 11 – Статична (а) та динамічна (б) ВАХ частотного перетворювача на двох біполярних та польовому транзисторах (по вертикальній вісі одна поділка – 2 мА, по горизонтальній вісі – 2 В)

Відповідно до рис. 11,б та рис. 4,б, встановлено, що амплітуда генерованих коливань в частотному перетворювачі з польовим транзистором є більш стабільною. Це в свою чергу впливає на лінійність функції перетворення.

Розбивши діапазон вимірювання на два піддіапазони (0...0,3 Т; 0,3...1 Т), отримуємо вирази для функції перетворення в піддіапазонах:

$$f_1(B) = 2,4153B + 2665; f_2(B) = 1,25286B + 3035.$$

При лінеаризації функції перетворення було отримано сталі значення чутливості та похибку нелінійності в піддіапазонах:

$$0 \dots 0,3 \text{ Т: } S_1(B) = 2,41 \text{ кГц/мТл; } \gamma_{H1} = 0,044;$$

$$0,3 \dots 1 \text{ Т: } S_2(B) = 1,25 \text{ кГц/мТл; } \gamma_{H2} = 0,043.$$

Встановлено, що при розбитті лише на два піддіапазони, ми отримуємо незначну похибку нелінійності у порівнянні з попереднім радіовимірювальним частотним перетворювачем. Одночасно, в кілька разів було підвищено чутливість перетворювача.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено експериментальному дослідженню схемотехнічних рішень на основі вдосконалених математичних моделей другого розділу. Структурна схема експериментальної установки зображена на рис. 12.

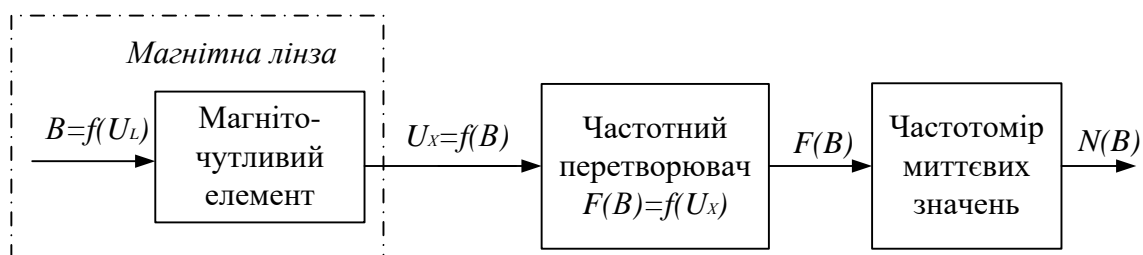


Рисунок 12 – Установка для дослідження радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля

Дослідження було проведено для трьох різних варіантів: перший – сенсор Холла з частотним перетворювачем на основі двох біполярних та одного польового транзисторів; другий – двоколекторний біполярний магнітотранзистор з частотним перетворювачем на основі трьох біполярних транзисторів; третій – двоколекторний біполярний магнітотранзистор з частотним перетворювачем на основі двох біполярних та одного польового транзисторів.

За допомогою програмного пакету MathCad були побудовані графіки функції перетворення та чутливості (рис. 13) на основі експериментальних результатів.

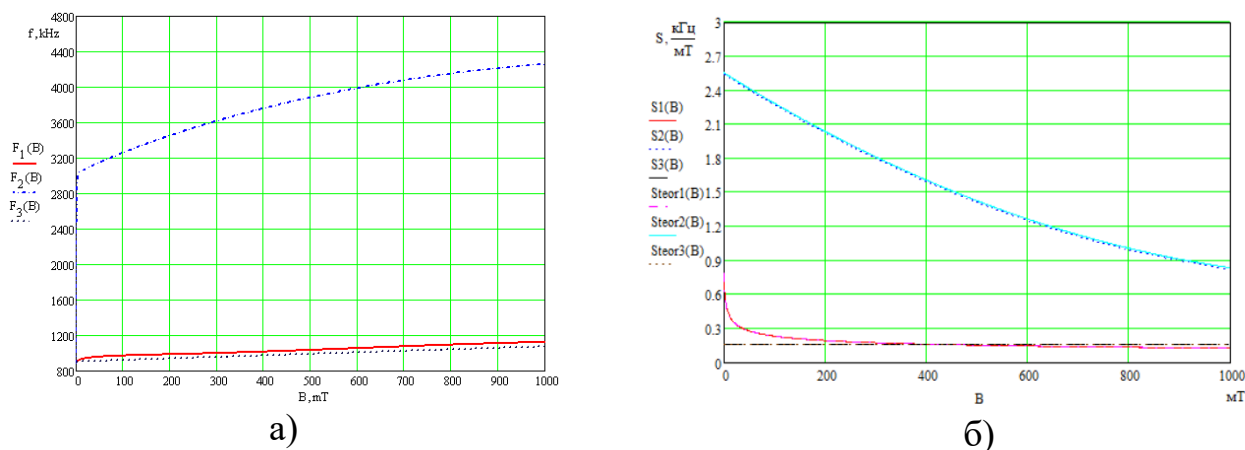


Рисунок 13 – Графіки функцій перетворення (а) та чутливості (б) радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля

Аналіз графіків на рис. 13,а показав, що робочі частоти радіовимірювальних перетворювачів є невеликими, і максимальна частота, яку необхідно вимірювати, становить близько 4,3 МГц.

Графічні дані функції перетворення та чутливості радіовимірювальних перетворювачів підтверджують, що максимальну чутливість було отримано при використанні двоколекторного біполярного магніточутливого транзистора та частотного перетворювача на базі трьох біполярних транзисторів, а максимальну лінійність було отримано при використанні біполярного двоколекторного магнітотранзистора з частотним перетворювачем на базі двох біполярних та польового транзисторів.

Для графіків на рис. 13,б проведено розрахунок похибки моделі та отримано її чисельні значення: $\delta_{M1} = 1,52\%$; $\delta_{M2} = 1,14\%$; $\delta_{M3} = 1,81\%$.

В четвертому розділі дисертаційної роботи подано результати розробки високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур. Структурна схема розробленого високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля зображена на рис. 14.

В приладі використаний 64-розрядний ARM-мікропроцесор з USB інтерфейсом STM64F205RGT6W, кварцевий генератор, блок живлення, LCD-дисплей WC0802C-STBLWNC-06, систему термостабілізації.

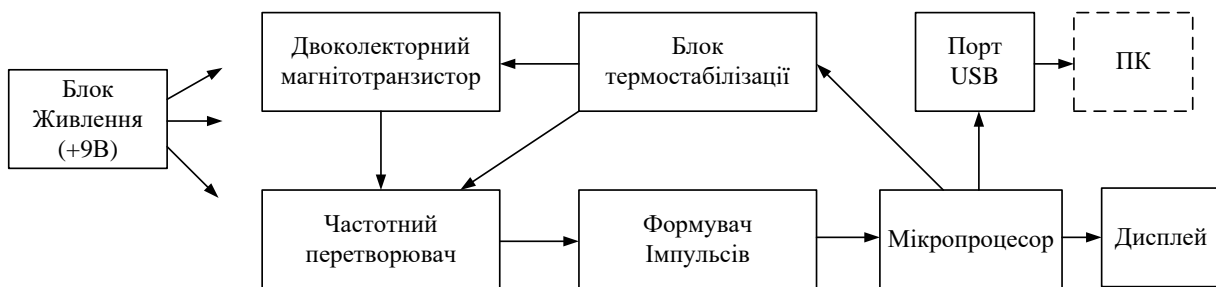


Рисунок 14 – Структурна схема високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля

Фотографії готового радіовимірювального приладу наведені на рис. 15.



Рисунок 15 – Фотографії готового радіовимірювального приладу

Для розробленого приладу була розрахована систематична складова основної похибки, яка враховує похибку температурної нестабільності ємності, похибку девіації параметрів джерела живлення, температурну залежність, власну нестабільність, похибку міри частотоміра, похибку квантування, похибку розрядності. Граничне значення систематичної складової основної похибки набуває значення: $\pm 3 \delta_{\Sigma} = \pm 0,75\%$.

У додатках наведено додаткові результати експериментальних досліджень, параметри моделі транзисторів при проведенні моделювання частини радіовимірювального приладу, акти впровадження результатів роботи, список публікацій.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу підвищення чутливості вимірювання індукції магнітного поля шляхом використання додаткового перетворення "напруга-частота" в радіовимірювальних приладах.

Результатом виконаних досліджень є такі висновки:

В результаті аналізу публікацій та патентів, присвячених сучасним приладам вимірювання параметрів магнітного поля, встановлено, що існують високочутливі радіовимірювальні прилади індукції магнітного поля, але вони мають ряд недоліків, які не дозволяють їх широко використовувати.

Було вдосконалено математичні моделі перетворювачів магнітного поля радіовимірювальних приладів, схемотехнічна реалізація яких забезпечила підвищення чутливості приладу на основі перетворення "магнітна індукція - частота". Зокрема, для частотного перетворювача на основі польового та двох біполярних транзисторів з елементом Холла, було підвищено чутливість в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0...200 мТл до 620 Гц/мТл. Для радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі двох біполярних та польового транзисторів, було зменшено похибку нелінійності як перетворювача так і радіовимірювального приладу індукції магнітного поля в цілому до 1,8%. Вдосконалення математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля, який складається з двоколекторного біполярного магнітотранзистора та частотного перетворювача на основі трьох біполярних транзисторів, дозволила підвищити чутливість в діапазоні вимірювання індукції магнітного поля 0...300 мТл до значення 2,41 кГц/мТл, а в діапазоні 0,3...1 Тл – до значення 1,25 кГц/мТл. Для всіх трьох варіантів, було отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості.

Експериментальне дослідження реалізованих схемотехнічних рішень запропонованих варіантів радіовимірювальних частотних перетворювачів індукції магнітного поля підтвердило відповідність вдосконалених математичних моделей їх експериментальним зразкам. Похибка моделей становить $\delta_{M1} = 1,52\%$; $\delta_{M2} = 1,14\%$; $\delta_{M3} = 1,81\%$.

На основі найкращого варіанту, відповідно до забезпечення максимальної чутливості, був розроблений високочутливий радіовимірювальний прилад ін-

дукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур.

Були розраховані метрологічні характеристики розробленого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю на основі реактивних властивостей транзисторних структур, що дозволить використовувати розроблений радіовимірювальний прилад на практиці після його повірки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] О. В. Осадчук, М. О. Притула, та К. О. Коваль, "Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля з магнітотранзистором та частотним вихідним сигналом", *Вісник Хмельницького національного університету*, №1 (221), с. 102-106, 2015. ISSN 2307-5732.

[2] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, та Я. О. Осадчук, "Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля з сенсором Холла та частотним вихідним сигналом", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, №1(27), с. 106-112, 2015. ISSN 2219-9365.

[3] О. В. Осадчук, М. О. Притула, та К. О. Коваль, "Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на транзисторній структурі". *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*, №2, с. 15-19, 2016. ISSN 1607-3274.

[4] O. Osadchuk, V. Osadchuk, A. Semenov, Ia. Osadchuk, O. Semenova, S. Varaban, and M. Prytula, "Radiomeasuring Optical-Frequency Converters Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance", *Data-Centric Business and Applications*, vol 48, pp. 229-261, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2_12. ISSN 2367-4512.

[5] A. Semenov, A. Osadchuk, Ia. Osadchuk, K. Koval, and M. Prytula, "The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance", in *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*, Erlagol, Altai, 2016, pp. 178-184. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538720. ISSN 2325-4173.

[6] A. Osadchuk, K. Koval, A. Semenov, and M. Prutyla, "Mathematical model of transistor equivalent of electrical controlled capacity", in *Proceedings of the XIII International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science"*. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2008, pp. 35-36. ISBN 978-966-553-678-9.

[7] O. Osadchuk, K. Koval, M. Prytula, and A. Semenov, "Comparative Analysis of Radiomeasuring Frequency Converters of the Magnetic Field", in *Proceedings of the XIII International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science"*. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016, pp. 275-278. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452034. ISBN 978-617-607-806-7.

[8] О. В. Осадчук, М. О. Притула, та К. О. Коваль, "Аналіз сучасного стану напівпровідникових магнітних сенсорів", на *IV науковій конференції "Научная индустрия европейского континента – 2007"*, Прага, 2007, с. 57-63.

[9] О. В. Осадчук, В. С. Осадчук, та М. О. Притула, "Частотний перетворювач магнітного поля", на *Першій Міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2008)"*, Київ, 2008, с. 206-208.

[10] О. В. Осадчук, М. О. Притула, та К. О. Коваль, "Аналіз надчутливих пристроїв та їх сенсорів до магнітного поля на ефекті Джозефсона" на *Міжнародній науково-практичній конференції "Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи"*, Київ, 2015, с. 112-114.

[11] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, та О. І. Альтман, "Прилад вимірювання просторового магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/02. №102708*, Листоп. 10, 2015.

[12] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, та О. І. Альтман, "Прилад вимірювання просторового постійного магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/02. №107489*, Черв.10, 2016.

[13] О. В. Осадчук, А. О. Семенов, М. О. Притула, К. О. Коваль, Г. Л. Антонюк, та О. С. Полуденко, "Мікроелектронний прилад для вимірювання магнітної індукції", *МПК(2006.01) H01L 29/82. №108576*, Лип. 25, 2016.

[14] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, А. О. Семенов, та А. І. Лещук, "Прилад вимірювання індукції магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/06. №108578*, Лип. 25, 2016.

АНОТАЦІЯ

Притула М. О. Високочутливий радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 "Радіовимірювальні прилади". – Вінницький національний технічний університет, Вінниця. 2021.

У дисертаційній роботі викладено результати досліджень, які спрямовані на підвищення чутливості вимірювання індукції магнітного поля.

Проведено аналіз сучасного стану розвитку радіовимірювальних приладів магнітного поля, які в своєму складі використовують різні сенсори та схеми перетворень вимірювальної величини в інші величини.

Вдосконалено математичні моделі радіовимірювальних частотних перетворювачів, які є основними складовими радіовимірювальних приладів індукції магнітного поля. Саме ними, в основному, визначається чутливість радіовимірювального приладу індукції магнітного поля на транзисторних структурах з диференційним опором. Було отримано їх теоретичні функції перетворення та рівняння чутливості.

За вдосконаленими математичними моделями, були розроблені схемотехнічні рішення, які їх реалізовували. Експериментальні дослідження підтвердили математичні розрахунки моделей. Були визначені основні характеристики частотних перетворювачів радіовимірювальних приладів та побудовані їх графічні залежності від індукції магнітного поля.

Вибравши один із вдосконалених радіовимірювальних частотних перетворювачів магнітного поля, на його основі був розроблений високочутливий радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур. Для реалізації в радіовимірювальному приладі частотомера середніх значень був вибраний 64 розрядний мікропроцесор. Використання його дозволило зменшити загальну похибку приладу.

Ключові слова: радіовимірювальний прилад, індукція магнітного поля, частотний перетворювач, сенсор, функція перетворення, чутливість, математична модель, реактивні властивості транзисторних структур.

АННОТАЦИЯ

Притула М.А. Высокочувствительный радиоизмерительный прибор индукции магнитного поля на основе реактивных свойств транзисторных структур. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 "Радиоизмерительные приборы". – Винницкий национальный технический университет. Винница. 2021.

В диссертационной работе изложены результаты исследований, направленных на повышение чувствительности измерения индукции магнитного поля.

Проведен анализ современного состояния развития радиоизмерительных приборов магнитного поля, которые в своем составе используют различные сенсоры и схемы преобразований измеряемой величины в другие величины.

Усовершенствованные математические модели радиоизмерительных частотных преобразователей, которые являются основными составляющими радиоизмерительных приборов индукции магнитного поля. Именно ими, в основном, определяется чувствительность радиоизмерительных приборов индукции магнитного поля на транзисторных структурах с дифференциальным сопротивлением. Было получено их теоретические функции преобразования и уравнения чувствительности.

По усовершенствованным математическими моделям, были разработаны схемотехнические решения, которые их реализовывали. Экспериментальные исследования подтвердили математические расчеты моделей. Были определены основные характеристики частотных преобразователей радиоизмерительных приборов и построены их графические зависимости от индукции магнитного поля.

Выбрав один из усовершенствованных радиоизмерительных частотных преобразователей магнитного поля, на его основе был разработан высокочувствительный радиоизмерительный прибор индукции магнитного поля на основе реактивных свойств транзисторных структур. Для реализации в радиоизмерительном приборе частотомера средних значений был избран 64 разрядный микропроцессор. Использование его позволяет уменьшить общую погрешность прибора.

Ключевые слова: радиоизмерительный прибор, индукция магнитного поля, частотный преобразователь, сенсор, функция преобразования, чувствительность, математическая модель, реактивные свойства транзисторных структур.

ABSTRACT

Prytula M. O. High-sensitivity radiomeasuring device of the magnetic field induction based on reactive properties of transistor structures. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Candidate of Engineering Science thesis in specialty 05.11.08 "Radio-measuring devices". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2021.

In the dissertation work the results of researches which are directed on increase of sensitivity of measurement of induction of a magnetic field are stated.

The analysis of the current state of development of radiomeasuring devices of a magnetic field which in the structure use various sensors and schemes of transformations of measuring value into other measuring values is carried out.

The most optimal for practical implementation is the frequency method of measuring the induction of the magnetic field based on the dependence of the reactive properties of semiconductor structures with differential resistance on the induction of the magnetic field. Devices based on this method increase the sensitivity.

Mathematical models of radiomeasuring frequency converters, which are the main components of magnetic radiomeasuring devices of magnetic field induction, have been improved. They mainly determine the sensitivity of the radio measuring device of magnetic field induction on transistor structures with differential resistance. Their theoretical transformation functions and sensitivity equations were obtained.

Three different circuits was conducted: the first - a Hall sensor with a frequency converter based on two bipolar and one field-effect transistors; the second is a two-collector bipolar magnetotransistor with frequency converters based on two bipolar and one field-effect transistors; third - two-collector bipolar magnetotransistor with frequency converters based on three bipolar transistors.

According to advanced mathematical models, circuit solutions were developed and implemented.

Experimental studies have confirmed the mathematical calculations of the models. The main characteristics of frequency converters of radiomeasuring devices were determined and their graphical dependences on magnetic field induction were constructed.

The analysis of the presented graphical data of the conversion function and sensitivity of radioconverters showed that the maximum sensitivity was obtained by using a two-collector bipolar magnetosensitive transistor and a frequency converter based on three bipolar transistors, and the maximum linearity – by using of the bipolar transistors and one field-effect transistors. The error of the model was calculated and obtain numerical values for the first solution – 1,52%, for the second – 1,14%, for the third – 1,81%.

Having chosen one of the advanced radiomeasuring frequency converters of a magnetic field, on its basis the highly sensitive radiomeasuring device of induction of a magnetic field on the basis of reactive properties of transistor structures was developed. A 64-bit microprocessor was selected for implementation in the radiofrequency meter. Using it allowed to reduce the overall error of the device.

For the developed device the systematic component of the main error was calculated, which takes into account the error of temperature instability of capacity, error of deviation of power supply parameters, temperature dependence, intrinsic insta-

bility, frequency meter error, quantization error, bit error. The limit value of the systematic component of the main error is the value: $\pm 3 \pm 0.75\%$.

Keywords: radiomeasuring device, magnetic field induction, frequency converter, sensor, conversion function, sensitivity, mathematical model, reactive properties of transistor structures.

Підписано до друку 10.03.2021 р. Формат 29.7×42¹/₄

Наклад 100 прим. Зам. № 2021-020.

Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 65-18-06.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.