

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПРИТУЛА МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК: 621.382

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.11.08 – радіовимірювальні прилади

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М. О. Притула

Науковий керівник

Осадчук Олександр Володимирович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця - 2020

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, м. Вінниця, 2020.

Дисертаційна робота містить результати досліджень, які спрямовані на підвищення чутливості вимірювання індукції магнітного поля.

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

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.

Проведений аналіз сучасних радіовимірювальних приладів параметрів магнітного поля дозволив визначити переваги та недоліки використання існуючих вимірювальних приладів параметрів магнітного поля.

В роботі було 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 частотоміра середніх значень був вибраний 64 розрядний мікропроцесор. Використання його дозволило зменшити загальну похибку приладу.

У дисертаційній роботі у науковому плані отримано такі результати:

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.

У дисертаційній роботі отримано такі практичні результати:

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 0,6кГц/мТл при магнітній індукції 10 мТл до 0,3кГц/мТл при магнітній індукції 100мТл; подальше коливання чутливості від 0,26кГц/мТл до 0,2кГц/мТл в діапазоні зміни магнітної індукції від 100 до 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 $V=10$ мТл чутливість становить близько $S=2,55$ кГц/мТл, а при індукції магнітного поля $V=1000$ мТл чутливість становить близько $S=0,83$ кГц/мТл; найбільша чутливість спостерігається при магнітній індукції в межах 0-100 мТ.

4. Розроблено радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю 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 здійснити перевірку приладу з метою його використання у вимірювальних процесах.

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

ABSTRACT

Prytula M.O. High-sensitivity radiomeasuring device of the magnetic field induction based on reactive properties of transistor structures. – Manuscript copyright.

Candidate of Engineering Science thesis in the specialty 05.11.08 "Radiomeasuring Devices". - Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The dissertation contains the results of research aimed at increasing the sensitivity of measuring the induction of the magnetic field.

The analysis of the current state of development of magnetic field radiomeasuring devices, which use various sensors and schemes of transformations of the measured quantity into other quantities, is carried out in the work.

In particular, radiomeasuring devices with magnetoresistive sensors on the Gaussian effect, devices with anisotropic magnetoresistors, devices with magnetic sensors based on the giant magnetoresistive effect, devices based on spin-tunnel magnetoresistors on sensors using analyzers are used. superconductivity phenomena, devices with ferrosonde sensors, devices with semiconductor sensors, devices with frequency converters were analyzed.

The analysis of modern radiomeasuring devices of magnetic field parameters allowed to determine the advantages and disadvantages of using existing measuring devices of magnetic field parameters.

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

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 radio measuring devices were determined and their graphical dependences on magnetic field induction were constructed.

Having chosen one of the advanced radiomeasuring frequency converters of the magnetic field, on its basis the highly sensitive radio measuring device of induction of the 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.

In the dissertation work in the scientific plan the following results are received

1. Improved mathematical model of radiomeasuring transducer of magnetic field of radiomeasuring instrument, which consists of Hall sensor and frequency converter based on two bipolar and field-effect transistors, which differs from existing ones in that it takes into account the influence of induction and external magnetic field voltage on the frequency of the output oscillations of the converter, the circuit implementation of which provided an increase in sensitivity to 620 Hz/mT of the whole radiomeasuring device in the range of measuring the induction of the magnetic field 0-200 mT.

2. Improved mathematical model of radiomeasuring transducer of magnetic field of radiomeasuring device, which consists of two-collector bipolar magnetotransistor and frequency converter based on two bipolar and field-effect transistors, which differs from existing ones in that it takes into account the frequency and field of induction, supply and control voltages on the frequency of output oscillations of the converter, the circuit implementation of which provided a reduction in the error of nonlinearity of the converter to 1.8% and the device as a whole.

3. Improved mathematical model of radio measuring transducer of magnetic

field of radio measuring instrument, which consists of two-collector bipolar magnetotransistor and frequency converter based on three bipolar transistors, which differs from existing ones in that it takes into account the influence of induction and frequency of external field, supply and control voltages on the frequency of the output oscillations of the converter, the circuit implementation of which provided an increase in the sensitivity of the radiomeasuring device to 1.25 kHz/mT in the range of measuring the induction of the magnetic field 0-1000 mT.

4. New analytical dependences of conversion functions and sensitivity equations of magnetic field induction radiomeasuring transducers are obtained, which differ from the existing ones in that they take into account the influence of magnetic field induction and frequency, supply and control voltages on the frequency of output oscillations of radiomeasuring transducers, which allowed to choose the solution for the development of a highly sensitive magnetic measuring device of magnetic field induction based on the reactive properties of transistor structures.

The following practical results were obtained in the dissertation:

1. The proposed models provide the construction of more advanced, compared to known, radiomeasuring devices for magnetic field induction.

2. Three circuit solutions of radiomeasuring frequency converters of the magnetic field have been improved: the first is a magnetosensitive Hall element with a frequency converter based on a gate and two bipolar transistors; the second is a magnetically sensitive two-collector bipolar transistor with a frequency converter based on a gate and two bipolar transistors; the third is a magnetically sensitive two-collector bipolar transistor with a frequency converter based on three bipolar transistors.

3. The characteristics of three radiomeasuring frequency converters of the magnetic field induction measuring device are experimentally investigated:

- the sensitivity of the first variant of the radiomeasuring converter of the radiomeasuring device varies in the range from 0.6 kHz/mT at a magnetic induction

of 10mT to 0.3 kHz/mT at a magnetic induction of 100 mT; further sensitivity fluctuations from 0.26 kHz/mT to 0.2 kHz/mT in the range of changes in magnetic induction from 100 to 1000 mT is insignificant;

- the sensitivity of the second variant of the radiomeasuring converter of the radiomeasuring device varies depending on the value of the external magnetic field: with magnetic field induction 100 mT, the sensitivity of the device is 0.1765 kHz/mT, and with magnetic induction 1000 mT - 0.1645 kHz/mT; the studied radio converter of the magnetic induction radiomeasuring device has the smallest nonlinearity error, the value of which does not exceed 1.8% in the range of 0-300 mT, and 4.7% in the range of 0.3-1 T;

- the third radiomeasuring converter of the radiomeasuring device has different steepness of the sensitivity characteristic at different levels of magnetic induction: for magnetic field induction $B = 10$ mT the sensitivity is about $S = 2.55$ kHz/mT, and for magnetic field induction $B = 1000$ mT the sensitivity is about $= 0.83$ kHz/mT; the greatest sensitivity is observed at magnetic induction in the range of 0-100 mT.

4. A radiomeasuring device for magnetic field induction with increased sensitivity based on the reactive properties of transistor structures has been developed, which uses a radiomeasuring frequency converter consisting of a two-collector bipolar magnetotransistor and a frequency converter based on three bipolar transistors.

5. The metrological characteristics of the developed high-sensitivity radiomeasuring device of magnetic field induction based on the reactive properties of transistor structures are calculated, which will allow to carry out further calibration of the device for its use in measuring processes.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] О. В. Осадчук, М. О. Притула, 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, Наукове фахове видання, індексується РИИЦ, Index Copernicus, Google Scholar).

[2] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, 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, Наукове фахове видання).

[3] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, "Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на транзисторній структурі". *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, №2, с. 15-19, 2016. (ISSN 1607-3274. Наукове фахове видання, індексується Web of Science, РИИЦ, Index Copernicus, Google Scholar).

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

[5] A. Semenov, A. Osadchuk, Ia. Osadchuk, K. Koval, 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, Індексуються Scopus).

[6] A. Osadchuk, K. Koval, A. Semenov, 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. INSPEC Accession Number: 11155526.

Індексується Scopus, Web of Science)

[7] O. Osadchuk, K. Koval, M. Prytula, 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, Індексується Scopus, Web of Science).

[8] О. В. Осадчук, М. О. Притула, 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, 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, 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, О. І. Альтман, "Прилад вимірювання просторового магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/02. №102708*, 10.11.2015.

[12] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, О. І. Альтман, "Прилад вимірювання просторового постійного магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/02. №107489*, 10.06.2016.

[13] О. В. Осадчук, А. О. Семенов, М. О. Притула, К. О. Коваль, Г. Л. Антонюк, О. С. Полуденко, "Мікроелектронний прилад для

вимірювання магнітної індукції", *МПК(2006.01) H01L 29/82. №108576*, 25.07.2016.

[14] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, А. О. Семенов, А. І. Лещук, "Прилад вимірювання індукції магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/06. №108578*, 25.07.2016.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРИЛАДІВ ВИМІРЮВАННЯ	
ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	27
Аналіз особливостей вимірювальних приладів.....	27
Аналіз приладів з магніторезистивними сенсорами	32
Аналіз приладів з сенсорами на основі ЯМР.....	39
Аналіз приладів зі СКВІДами.....	43
Аналіз приладів з ферозондовими сенсорами	49
Аналіз приладів з напівпровідниковими сенсорами	57
Аналіз приладів з частотними перетворювачами.....	63
Висновки до розділу	66
РОЗДІЛ 2 ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ	
ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО	
ПРИЛАДУ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	
68	
Вдосконалення математичної моделі радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля на основі ЕХ та транзисторної структури на польовому та біполярних транзисторах	68
Вдосконалення математичної моделі радіовимірювального частотного перетворювача на основі ДБМТ та транзисторної структури на польовому та біполярних транзисторах.....	85
Вдосконалення математичної моделі радіовимірювального частотного перетворювача на основі ДБМТ та транзисторної структури на біполярних транзисторах.....	98
Висновки до розділу.....	111
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИМІРЮ-	
ВАЛЬНИХ ЧАСТОТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИЛАДУ	
112	
Експериментальне дослідження радіовимірювального частотного перетворювача приладу на основі ЕХ та транзисторної структури на польовому та біполярних транзисторах.....	112

Експериментальне дослідження радіовимірювального частотного перетворювача приладу на основі ДБМТ та транзисторної структури на польовому та біполярних транзисторах	117
Експериментальне дослідження радіовимірювального частотного перетворювача приладу на основі ДБМТ та транзисторної структури на біполярних транзисторах	122
Порівняльний аналіз експериментальних даних розроблених радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля з частотним виходом.....	126
Висновки до розділу	133
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ВИСОКОЧУТЛИВОГО РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	136
Розробка структурної та електричної схем радіовимірювального приладу індукції магнітного поля.....	136
Комп'ютерне моделювання радіовимірювального частотного перетворювача приладу	145
Розрахунок похибок високочутливого радіовимірювального приладу індукції магнітного поля	149
Висновки до розділу 4.....	160
ВИСНОВКИ	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	163
ДОДАТКИ	
Додаток А Результати експериментального дослідження частотного перетворювача на біполярних транзисторах	174
Додаток Б Результати експериментального дослідження частотного перетворювача з польовим транзистором.....	177
Додаток В Параметри транзисторів для моделювання	179
Додаток Г Акти та довідки впровадження.....	181
Додаток Д Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	184

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.

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.

На сьогоднішній день ведуться широкомасштабні наукові дослідження по використанню нових ідей, нових матеріалів, фізичних явищ для створення приладів вимірювання індукції магнітних полів [1], [2], [3]. 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 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 [1], [2], [4].

Слід зазначити, що у Вінницькому національному технічному університеті проводяться теоретичні та практичні дослідження в області вимірювання індукції магнітних полів. В науковій школі професорів Осадчука О.В. та Осадчука В.С. розвивають теорію диференційного опору та його реалізації в радіовимірювальних частотних перетворювачах з напівпровідниковими елементами в своїй основі, розробляють варіанти реалізації даної теорії в реальні вимірювальні прилади, проводять оцінку ефективності розроблених приладів [3]-[5].

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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 манітного 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 кріогенної 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 [6].

Одним із основних складових вимірювальних приладів є сенсор, який може складатись 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 [6].

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.

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.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні таких результатів:

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 0,6кГц/мТл при магнітній індукції 10 мТл до 0,3кГц/мТл при магнітній індукції 100мТл;

подальше коливання чутливості від 0,26кГц/мТл до 0,2кГц/мТл в діапазоні зміни магнітної індукції від 100 до 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 $V=10$ мТл чутливість становить близько $S=2,55$ кГц/мТл, а при індукції магнітного поля $V=1000$ мТл чутливість становить близько $S=0,83$ кГц/мТл; найбільша чутливість спостерігається при магнітній індукції в межах 0-100 мТ.

4. Розроблено радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля з підвищеною чутливістю 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 здійснити перевірку приладу з метою його використання у вимірювальних процесах.

Реалізація результатів роботи.

Результати дисертаційної роботи впроваджено на Приватному підприємстві "Мідас П" (м. Вінниця), на ТОВ "ОДА "БЕЗПЕКА-СЕРВІС"

(м. Вишгород). На даних підприємствах, було використано розроблений високочутливий радіовимірювальний прилад індукції магнітного поля на основі реактивних властивостей транзисторних структур для оцінювання магнітної обстановки на їхніх об'єктах інформаційної діяльності. Підтверджуючими документами даних впроваджень є довідки наведені в Додатку Г даної роботи.

Також результати дисертаційної роботи впроваджено на навчальному процесі Вінницького національного технічного університету. Зокрема, створені лабораторні експериментальні зразки радіовимірювальних частотних перетворювачів та розроблений методичний матеріал для проведення лабораторних робіт. Підтверджуючим документом є акт впровадження наведений в Додатку Г даної роботи.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах опублікованих у співавторстві здобувачеві належать: аналіз напівпровідникових магнітних сенсорів, які розроблені та використовуються в промисловості [1], аналіз радіовимірювальних приладів на ефекті Джозефсона, визначення їх недоліків та переваг [2], розробка математичної моделі частотного перетворювача, еквівалентна ємність якого керується напругою [9], розробка схемотехнічного рішення частотного перетворювача магнітного поля [10], математичне дослідження автогенератора радіовимірювального перетворювача на транзисторній структурі з диференційним опором [11], розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля з магнітотранзистором та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з трьох буполярних транзисторів [12], розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля з сенсором Холла та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з двозатворного та біполярних транзисторів [13], порівняльний аналіз трьох

різних схемотехнічних рішень радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля [14], розробка математичної моделі радіовимірювального перетворювача магнітного поля з двоколекторним магнітотранзистором та частотним перетворювачем на основі транзисторної структури з двозатворного та біполярних транзисторів [15], розробка математичних моделей частотних перетворювачів на транзисторних структурах різних типів [20], запропоновано структурну схему трьохканального приладу вимірювання індукції магнітного поля [86], запропоновано використання формувача імпульсів в структурній схемі приладу вимірювання індукції магнітного поля [87], запропоновано схему автогенераторного кола мікроелектронного приладу для вимірювання магнітної індукції [88], запропоновано схему підключення двоколекторного магнітотранзистора в загальну схему приладу вимірювання магнітної індукції [89].

Апробація матеріалів дисертації

Результати досліджень, що викладені в дисертації, були апробовані 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 внесені до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу і 4-х розділів, 5-х додатків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації 186 сторінок, з яких основний зміст викладений на 145 сторінках друкованого тексту, містить 78 рисунків, 4 таблиці. Список використаних джерел складається з 104 найменувань. Додатки містять додаткові результати досліджень та документи про впровадження результатів роботи.

Робота виконана протягом 2007-2020рр. на кафедрі радіотехніки Вінницького національного технічного університету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, "Аналіз сучасного стану напівпровідникових магнітних сенсорів", на *IV науковій конференції "Научная индустрия европейского континента – 2007"*, Прага, 2007, с. 57-63.
- [2] О. В. Осадчук, М. О. Притула, 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.
- [3] В.С. Осадчук, О. В. Осадчук, *Сенсори тиску і магнітного поля*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2005.
- [4] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, *Напівпровідникові перетворювачі інформації*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2004.
- [5] В. С. Осадчук, А. В. Осадчук, "Методы построения микроэлектронных радиоизмерительных преобразователей с частотным принципом работы", *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 3. с. 26-33, 2004.
- [6] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston, USA: Artech house, 2000, 494p.
- [7] И. М. Голев, Е. В. Никитина, "Технические аспекты измерения поля земли для решения задач воздушной навигации", *Воздушно-космические силы. Теория и практика*, № 1, с. 273-279, 2017.
- [8] С. К. Киселев, "Авиационные магнитометрические системы навигации и перспективы их практического использования", *Автоматика и телемеханика*, №7, с. 129-137, 2001.
- [9] Alexandr Osadchuk, Kostyantun Koval, Andriy Semenov, Maxim 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.

[10] О. В. Осадчук, В. С. Осадчук, 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.

[11] Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Kostyantyn O. Koval, Maksym O. 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

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

[13] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, 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.

[14] Oleksandr Osadchuk, Kostyantyn Koval, Maksym Prytula, Andriy 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.

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

[16] Mehran Mirzaei, Pavel Ripka, Vaclav Grim, "A Novel Position Sensor With a Conical Iron Core". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, pp. 9178-9189, March 2019.

[17] А. А. Игнатъев, М. Н. Куликов, А. В. Маханьков, А. В.

Прозоркевич, "Магнитометрия слабых магнитных полей", *Гетеромагнитная микроэлектроника*, №15, с. 11-35, 2013.

[18] C. P. Gooneratne, B. D. Li, T. E. Moellendick, "Downhole Applications of Magnetic Sensors". *Sensors*, vol. 17(10), pp. 1-32, October 2017. DOI: 10.3390/s17102384.

[19] H. Ramos, A. Lopes Ribeiro, "Present and Future Impact of Magnetic Sensors in NDE". *Procedia Engineering*, vol. 86, pp. 406-419, April 2014.

[20] Oleksandr Osadchuk, Vladimir Osadchuk, Andriy Semenov, Iaroslav Osadchuk, Olena Semenova, Serhii Baraban, Maksym Prytula, "Radiomeasuring Optical-Frequency Converters Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance". *Data-Centric Business and Applications*. vol 48., Springer, Cham, pp. 229-261. June 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2_12.

[21] М. Л. Бараночников, *Микромагнитоэлектроника*. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2001, Т. 1, 544с.

[22] Hava Can, Ugur Topal, "Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 28, № 3, pp. 1093-1096, 2015.

[23] Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F. Sample, "3D magnetometer for a dilution refrigerator", in Proc. of the 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing, 2012, pp. 110-118.

[24] Г. Н. Щербаков, М. А. Анцелевич, Д. Н. Удинцев, Ю. А. Шлыков, А. В. Бровин, "Применение магнитной томографии в проходных металлодетекторах", *Специальная Техника*, № 6, с. 20-25, 2007.

[25] Д. Я. Суханов, Е. С. Берзина, "Магнитная интроскопия с использованием решетки сенсоров магнитного поля", *Известия высших учебных заведений. Физика*. т. 56, № 8/2, с. 23-26, 2013.

[26] A. A. Baschiroto, "2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup", *Measurement*. vol. 43, pp. 46-53, 2010.

[27] M. Butta, P. Ripka, "Model for coil-less fluxgate", *Sensors and Actuators*, vol. 156, № 11, pp. 269-273, 2009.

[28] Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Пути повышения помехоустойчивости магнитометрических средств поиска и их практическая реализация // Специальная техника.- 2005.- № 3.- С.19-24.

[29] P. Ripka, "Advances in Magnetic Field Sensors", *IEEE Sensors*, vol. 10, №6, pp. 1108-1116, 2010.

[30] A. E. Mahdia, L. Panina, D Mapos, "Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials", *Sensors and Actuators*, vol. 105, pp. 271-285, 2003.

[31] J. E. Lenz, A. S. Edelstein, "Magnetic Sensors and Their Applications", *IEEE Sensors*, vol. 6, № 3, pp. 631-649, 2006.

[32] Ф. Мейзда, *Электронные измерительные приборы и методы измерений*. пер. с англ. В.Д. Новиков. Москва, Россия: Мир, 1990.

[33] Н. П. Васильева, С. И. Касаткин, А. М. Муравьев, "Магниторезистивные сенсоры на тонких ферромагнитных пленках", *Приборы и системы управления*. - 1994. - № 8, с. 20-23, 1994.

[34] F. L. Machado, B. L. da Silva, S. M. Rezende, C. S. Martins, "Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co_{70.4}Fe_{4.6}Si₁₅B₁₀", *Journal of Applied Physics*, vol.75, pp. 6563 – 6565, 1994.

[35] Лебедев Анатолий Иванович, "Устройство для измерения крутящего момента и осевого усилия во вращающихся валах", МКИ G 01L3/10. №2380667, Янв. 27, 2010.

[36] Bharat B. Pant, Lakshman Withanawasam, "Anisotropic magnetoresistance gradiometer/magnetometer to read a magnetic track", № US 20130334311 A1, Dec. 19, 2013.

[37] Axel Bartos, Armin Meisenberg, Fritz Dettmann, "Magnetoresistive sensor for determining an angle or a position", № US 20110074399 A1, Mach 31, 2011.

[38] С. А. Никитин "Гигантское магнитосопротивление", *Соровский*

образовательный журнал, т. 8, №2, с. 92-98, 2004.

[39] Jinliang He, Yong Ouyang, Jun Hu, Shanxiang Wang, Shijie Ji, Rong Zeng, Bo Zhang, Zhanqing Yu, "Giant Magnetoresistance Current Sensor", № US 20130049750 A1, Feb. 28, 2013.

[40] Jian-Ping Wang, Yuanpeng Li, "Gmr sensor", № US 20140099663 A1, Apr. 10, 2014.

[41] Jeffrey R. Childress, Tomoya Nakatani, "Current-perpendicular-to-the-plane giant magnetoresistance (CPP-GMR) sensor with indium-zinc-oxide (IZO) spacer layer", №US9047891 B1, Jun. 2, 2015.

[42] Jeffrey Robinson Childress, Young-Suk Choi, Tomoya Nakatani, John Creighton Read, "Underlayer for reference layer of polycrystalline CPP GMR sensor stack", № US 9412399 B2, Aug. 9, 2016.

[43] K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L.V. Panina, "Sensitive micro magnetic sensor family utilizing magneto-impedance and stress-impedance effects for intelligent measurements and controls", *Sensors and actuators*, № 91, pp. 85-90, 2001.

[44] А. Ферт, "Происхождение, развитие и перспективы спинтроники", *Успехи физических наук / Нобелевские лекции по физике - 2007*. т. 178, №12, с. 1136-1348, 2008.

[45] J. Deak, A. Jander, E. Lange, S. Mundon, D. Brownell, L. Tran, "Delta-sigma digital magnetometer utilizing bistable spin-dependent-tunneling magnetic sensors", *Journal of Applied Physics*, vol. 99, issue 8, pp. 08B320-08B323, 2006.

[46] James Geza Deak, Zhimin Zhou, "Closed-loop TMR current sensor", № CN 105606877 A, May 25, 2016.

[47] James Geza Deak, Zhimin Zhou, "Push-pull x-axis magnetoresistive sensor", № WO 2016197840 A1, Dec. 15, 2016.

[48] Wei-Chuan Chen, Xiaochun Zhu, Chando Park, Seung Hyuk Kang, "Spin-transfer switching magnetic element formed from ferrimagnetic rare-earth-transition-metal (re-tm) alloys", № US 20150303373 A1, Oct. 22, 2015.

[49] Gerard Marriott, "Compositions of platelet-derived theranostics", №

WO 2016205144 A1. Dec. 22, 2016.

[50] Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, А. П. Щелкин Афанасьев, *Магнитометрические преобразователи, приборы, установки*. Львов, Украина: Энергия, 1972.

[51] Seong-Min Hwang, Kiwoong Kim, Kwon-Kyu Yu, Seong-Joo Lee, Jeong-hyun Shim, "Low magnetic field, ultra-low magnetic field nuclear magnetic resonance and magnetic resonance image apparatus", № US 20160209482 A1, Jul. 21, 2016.

[52] Arcady Reiderman, Lilong Li, "Downhole Nuclear Magnetic Resonance Sensor Using Anisotropic Magnetic Material", № US 20170010378 A1, Jan. 12, 2017.

[53] Michelle A. Espy, "Ultra-low field nuclear magnetic resonance method to discriminate and identify materials", № US 20120001631 A1, Jan. 5, 2012.

[54] Arcady Reiderman, "Ultra-slim nuclear magnetic resonance tool for oil well logging", № US 20170010379 A1, Jan. 12, 2017.

[55] Gersh Z. Taicher, "Nuclear magnetic resonance apparatus and methods", № US 20160025826 A1, Jan. 28, 2016.

[56] Д. А. Великанов, "Сквид-магнитометр для фотомагнитных исследований", № RU(11) 2 515 059, Май 10, 2014.

[57] Е.Ф. Щербаков, В.М. Петров, *Физические основы электротехники*. Ульяновск, Россия: УЛГТУ, 2012.

[58] Antonio Orozco, Vladimir V. Talanov, "DC SQUID based RF magnetometer operating at a bandwidth of 200 MHz and higher", № US 9476951 B2, Окт. 25, 2016.

[59] Boris Chesca, Daniel John, "Superconducting magnetic sensor", № WO 2017006079 A1, Янв. 12, 2017.

[60] Ю. В. Афанасьев, *Феррозонды*. Львов, Украина: Энергия, 1969.

[61] Bruno Ando, Salvatore Baglio, Adi R. Bulsara, Vincenzo Sacco, "Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers", *IEEE Sensors*, vol. 5, № 5, pp. 895-904, 2005.

[62] Y. Nishio, F. Tohyama, N. Onishi, "The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite", *Measurement Science and Technology*, vol. 18. - pp. 2721-2730, 2007.

[63] Andrea Baschiroto, Enrico Dallago, Piero Malcovati, Marco Marchesi, Enrico Melissano, Marco Morelli, Pietro Siciliano, Giuseppe Venchi, "An Integrated Micro-Fluxgate Magnetic Sensor With Front-End Circuitry", *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, vol. 58, pp. 3269-3275, 2009.

[64] A. Baschiroto, "A 2D micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup", *Measurement*, vol. 43, pp. 46-53, 2010.

[65] P. M. Drljaca, P. Kejik, F. Vincent, D. Piguet, R. S. Popovic, "Lowpower 2-D fully integrated CMOS fluxgate magnetometer", *IEEE Sensors*, vol. 5, pp. 909-915, 2005.

[66] A. Baschiroto, "A fluxgate magnetic sensor: From PCB to micro-integrated technology", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, pp. 25-31, 2007.

[67] Hioka, Takaaki Chiba-shi, Chiba, "Semiconductor device", *№EP 3570337 A1*, Apr. 24, 2018.

[68] P. Ripka, "New directions in fluxgate sensors", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 215-216, pp. 735-739, 2000.

[69] J. Kubik, L. Pavel, P. Ripka, P. Kaspar, "Low-power PCB Fluxgate Sensor", in *Proc. of the 4-th IEEE Conference on Sensors Irvine, California*, 2005, pp. 432-435.

[70] Three-Axis Magnetic Sensor HMC1043. [Online]. Available: <https://www.acalbf.com/nl/Sensors/Position/Electronic-compass-and-Magnetometer/p/Three-Axis-Magnetic-Sensor/00000010HJ>. Accessed on: May 23, 2016

[71] А. О. Борисов, "Современные АМР-сенсоры для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей", *Компоненты и технологии. №7*, с. 56-60, 2007.

[72] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, "Мікроелектронний вимірювач магнітної індукції", *МПК H01L29/82, H01L43/00, G01R33/06. №70192*, 25.05.2013.

[73]. Anton Mauder, Martin Gruber, Goran Keser, "Magnetic current sensor", *U.S. Patent Appl. 2019/0369144 A1*. May 30, 2011.

[74] Werth Tobias, Hermann Robert, "Magnetic sensor system for measuring a linear position", *№DE102019109317A1*, Oct. 10, 2019.

[75] А. А. Штанько, В. А. Родионов, А. В. Беринцев, Н. Т. Гурин, С. Г. Новиков, "Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением на передаточной вольт-амперной характеристике", *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, т. 15, №6, с. 59-68, 2013.

[76] П. Н. Дробот, Д. А. Дробот, "Осцилляторные сенсоры с частотным выходом", *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях*, №1, с. 124-127, 2011.

[77] Ф. Д. Касимов, "Перспективы развития и применения микроэлектронной негатроники", *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 5, с. 5-8, 2003.

[78] О. Н. Негоденко, Ю. П. Мардамшин, "Микроэлектронные сенсоры с частотным выходом на основе аналогов негатронов", *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 5-6, с. 19-22, 2000.

[79] В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, *Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2013.

[80] Л. Росадо, *Физическая электроника и микроэлектроника*. Москва, Россия: Высшая школа, 1991.

[81] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль, "Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором". Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011.

[82] Ta Z., Wei Ch.Yu, Jian Z.Z., Fu Ch.Du., "Research on Three-

Component Geomagnetic Field Differential Measurement Method for Underwater Vehicle", *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 9. №4, p. 165-176, 2016.

[83] П. Ф. Баранов, С. В. Муравьев, В. Е. Огай, "Феррозондовый магнитометр для измерения магнитной индукции до 1 нТл", *Известия Томского политехнического университета*, т. 320. № 4. с. 89–92, 2012.

[84] Enrique Arribas, Isabel Escobar, Carmen Del Pilar, Suarez Rodriguez, Alberto Nájera López, "Measurement of the magnetic field of small magnets with a smartphone". *European Journal of Physics.*, vol. 36(6), pp. 1-11. October 2015. DOI: 10.1088/0143-0807/36/6/065002.

[85] P. Ripka, "Advances in Magnetic Field Sensors". *IEEE Sensors Journal*, vol. 10(6), pp. 1108 – 1116, July 2010. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2043429.

[86] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, О. І. Альтман, "Прилад вимірювання просторового магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/02. №102708*, 10.11.2015.

[87] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, О. І. Альтман, "Прилад вимірювання просторового постійного магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/02. №107489*, 10.06.2016.

[88] О. В. Осадчук, А. О. Семенов, М. О. Притула, К. О. Коваль, Г. Л. Антонюк, О. С. Полуденко, "Мікроелектронний прилад для вимірювання магнітної індукції", *МПК(2006.01) H01L 29/82. №108576*, 25.07.2016.

[89] О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль, А. О. Семенов, А. І. Лещук, "Прилад вимірювання індукції магнітного поля", *МПК(2006.01) G01R 33/06. №108578*, 25.07.2016.

[90] The description of the STM64F205xx and STM64F207xx micro-controllers. [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1867262.pdf>. Accessed on: April 14, 2018.

[91] Ю. Д. Мінов, М. М. Будник, П. Б. Шпильовий, "Сенсор надслабких магнітних полів", *МКИ G01R 33/035. №75434*, Квіт. 17, 2006.

- [92] З. Ю. Готра, *Мікроелектронні сенсори фізичних величин*. т. 3. Львів, Україна: Ліга-Прес, 2002.
- [93] Oleg V. Minin, Igor V. Minin, *Microsensors*. New York, U.S.A: Magnum Publishing LLC, 2018.
- [94] О. В. Осадчук, *Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2000.
- [95] J. P. Lynch, K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring", *Shock and Vibration Digest*, vol. 38, № 2, pp. 91-130, 2006.
- [96] С. Г. Новиков, Н. Т. Гурин, А. В. Беринцев, В. А. Родионов, А. А. Штанько, И. С. Федоров, "Полупроводниковые приборы с S-образной передаточной вольт-амперной характеристикой", *Нано- и микросистемная техника*, № 7, с. 52-56, 2014.
- [97] Є. С. Поліщук та ін., *Засоби та методи вимірювань неелектричних величин*. Львів, Україна: "Бескид Біт", 2008.
- [98] В.И. Нефедова и др., *Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах*. Москва, Россия: Высшая школа, 2001.
- [99] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська, *Метрологія та вимірювальна техніка*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2004.
- [100] Стабилизатор напряжения LM7805. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avrlab.com/node/29>. Дата обращения: Январь 18, 2018.
- [101] В.О. Пождаренко, В.В. Кухарчук, *Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка*. Київ, Україна: НМК ВО, 1991.
- [102] И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус, *Основы теории информации и кодирования*. Киев, Украина: Высшая школа, 1986.
- [103] Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк, *Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю*. Вінниця,

Україна: ВДТУ, 2001.

[104] М. М. Дорожовець, *Опрацювання результатів вимірювання*.
Львів, Україна: "Львівська політехніка", 2007.

