

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 682.32+537.8

DOI:10.34229/2707-451X.22.2.1

Ю.Д. МІНОВ, П.Б. ШПИЛЬОВИЙ, Є.В. МЕЛЬНИК

ОПТИМІЗАЦІЯ АНТЕННОГО БЛОКУ НАДПРОВІДНОГО МАГНІТОМЕТРА: ДОСЛІДЖЕННЯ СЛАБКИХ МАГНІТНИХ СИГНАЛІВ

Вступ. СКВІД-магнітометр, рис. 1, для дослідження магнітних властивостей матеріалів, а також неінвазивного дослідження магнітних властивостей біологічних тканин дрібних лабораторних тварин, був розроблений в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, в рамках виконання проекту УНТЦ у 2007 році. З того часу проведено сотні досліджень магнітних властивостей зразків різних матеріалів та досліджено розподіл магнітних частинок в органах дрібних лабораторних тварин, викликаних введенням токсичних частинок в організм тварини, або введенням суспензії наночастинок з магнітними властивостями [1, 2]. СКВІД-магнітометр дозволяє періодично спостерігати картину розподілу магнітних частинок у організмі на протязі значного часу, не завдаючи шкоди тварині та отримувати важливу інформацію про динаміку зміни концентрації магнітних частинок у його організмі. Така робота з обладнанням стає рутинною при проведенні досліджень у біології та біомедицині [3–5].

Описується оптимізація конструкції та методу балансування надпровідної антени магнітометра для дослідження магнітних властивостей біологічних тканин та матеріалів, а саме, реалізація балансування надпровідної антени по вертикальній складовій магнітного поля за допомогою соленоїда зі спеціальним розташуванням витків обмотки, вирішення проблем процедури налаштування магнітометричної системи безпосередньо в місці проведення вимірювань.

Ключові слова: надпровідність, СКВІД-магнітометр, баланс антени, оптимізація.

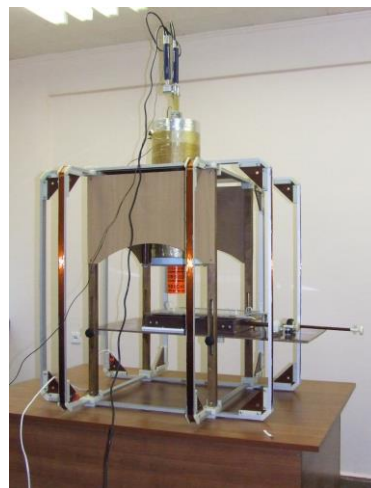


РИС. 1. СКВІД-магнітометрична система для дослідження слабких магнітних сигналів

© Ю.Д. Мінов, П.Б. Шпильовий,
Є.В. Мельник, 2022

Блок надпровідної антени СКВІД-магнітометра та система підмагнічування були розроблені з урахуванням розмірів досліджуваних об'єктів. У першу чергу це стосується вимірювальної надпровідної антени – аксіального градіометра другого порядку з діаметром витків 8 мм, яка є частиною трансформатора потоку СКВІД-сенсора. Невеликий діаметр антени дозволяє реєструвати картину магнітного поля у площині над тілом тварини, що досліджується, шляхом сканування об'єкта з кроком 12 мм, локалізуючи орган-джерело магнітного сигналу. Цього виявилось достатньо для дослідження розподілу магнітних носіїв у органах таких тварин, як щури. Для дослідження більш великих тварин, є можливість змінити крок сканування об'єкта шляхом заміни шаблону карти.

Антенна, аксіальний градіометр другого порядку, з діаметром витків 8 мм, виготовлена за схемою 2-4-2 рис. 2, а і 2, б. Така схема дозволила збільшити її індуктивність до значення 350 нГн та краще узгодити її з вхідною котушкою СКВІД-сенсора з індуктивністю 380 нГн.

Система підмагнічування, що складається з двох ортогональних пар квадратних котушок Гельмгольца, з розміром сторін 1,03 та 1,06 м відповідно, з числом витків у кожній котушці 88, при максимальному струмі 1,4 А, створює однорідне магнітне поле з напругою 142 А/м або 0,178 мТл. При значенні струму в котушках 1 А, значення напруги поля складає 101 А/м або 0,127 мТл. Схема побудови антенного блоку магнітометра з трансформатором потоку та розташування надпровідних елементів для балансування антени показані на рис. 2, а.

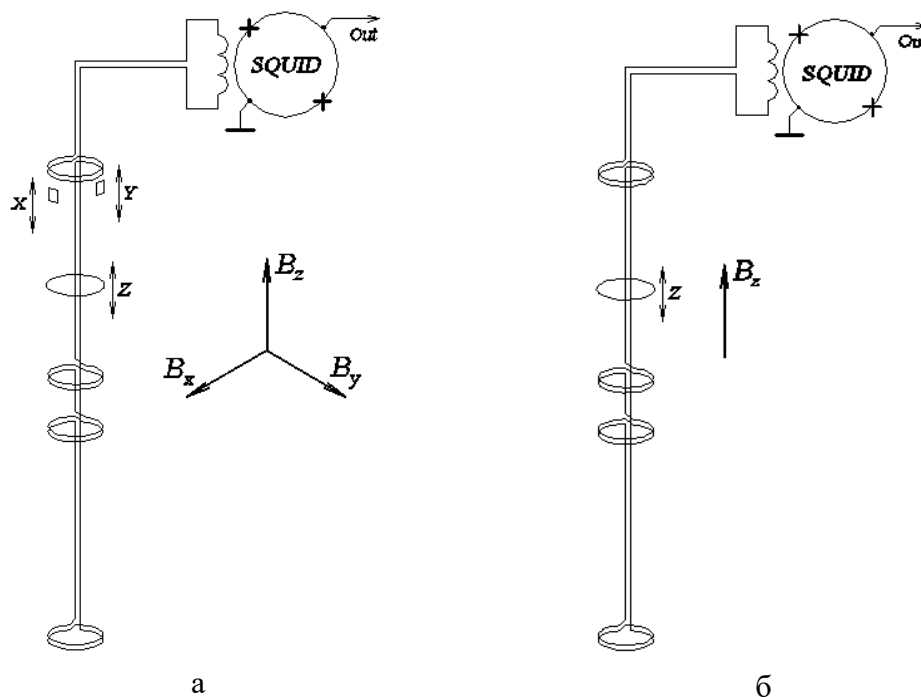


РИС. 2. Схема СКВІД-сенсора з трансформатором потоку з елементами балансування: а – по трьом складовим поля; б – по вертикальній складовій поля

Постановка задачі. Для нормальної роботи надчутливого сенсора магнітного поля в умовах сильного магнітного поля, що створюється котушками підмагнічування, антена повинна мати високий ступінь балансу, це дозволить СКВІД-сенсору надійно працювати у межах динамічного діапазону магнітометра. Тому вимірювальна антена має бути попередньо збалансована у магнітному

полі з високим ступенем однорідності, створюваному системою ортогональних (X, Y, Z) котушок Гельмгольца. Балансувальні елементи – надпровідні пластинки з свинцю та короткозамкнений виток з ніобію, послідовно, при включенні відповідної складової поля (X, Y, Z), переміщуються вздовж осі антени за допомогою спеціального механізму. При цьому змінюється ефективна площа відповідного витка антени, що приводить до змін ступеня балансу градіометра [6].

Зазвичай це ітераційне, потребуюче тривалого часу, регулювання, що дозволяє отримати мінімальний сигнал по всіх трьох складових поля. Після процедури балансування антени, кріостат з вимірювальним зондом переміщується в стапель, встановлений усередині системи котушок підмагнічування. Приймаючи до уваги той факт, що приміщення, в якому відбувається балансування надпровідної антени і встановлений магнітометр, має значні неоднорідності магнітного поля, будучи лабораторією з наявною сталеву арматурою в перекриттях і стінах, з чавунними радіаторами опалення, стелажми, приладами. Тому, зробивши баланс антени в котушках однорідного поля у певному місці, а потім перемістивши її на декілька метрів для установки в систему підмагнічування, ми змінимо картину оточуючого магнітного поля, та, як наслідок, не отримаємо мінімального сигналу від системи котушок однорідного поля у місці вимірювання. Ситуацію ускладнює ще той факт, що елементи, за допомогою яких здійснюється балансування антени по горизонтальним (X, Y) складовим поля, розташовані асиметрично щодо кілець градіометра, створюючи сильну залежність амплітуди сигналу підмагнічування на виході магнітометра від положення вимірювального зонда щодо котушок підмагнічування рис. 2, а.

На практиці це приводить до необхідності ретельно вибирати положення зонда, повертаючи його щодо котушок підмагнічування, а також додатково регулювати балансування антени з метою мінімізувати сигнал від котушок підмагнічування до прийняттого рівня. Таким чином процедура налаштування віднімає досить багато часу.

Критерієм готовності системи до вимірювань завжди слугує запис карти магнітного поля тестового зразка. Запис карти магнітного поля здійснюється шляхом сканування тестового зразка по координатній сітці розміром 6x6 точок з кроком 12 мм з послідовним записом сигналу тривалістю 1 секунда в кожній з 36 точок сітки. Запис синхронізовано сигналом поля підмагнічування частотою близько 86,8 Гц, синусоїдальної форми. На підставі цих записів програма дозволяє отримати миттєву картину поля в будь-якій точці часового інтервалу запису. В даному випадку на рис. 3 показана 21 карта магнітного поля тестового зразка для добре збалансованої антени.

Записані на протязі 1 секунди сигнали магнітометра в кожній з 36 точок піддаються процедурі усереднення рис. 4.

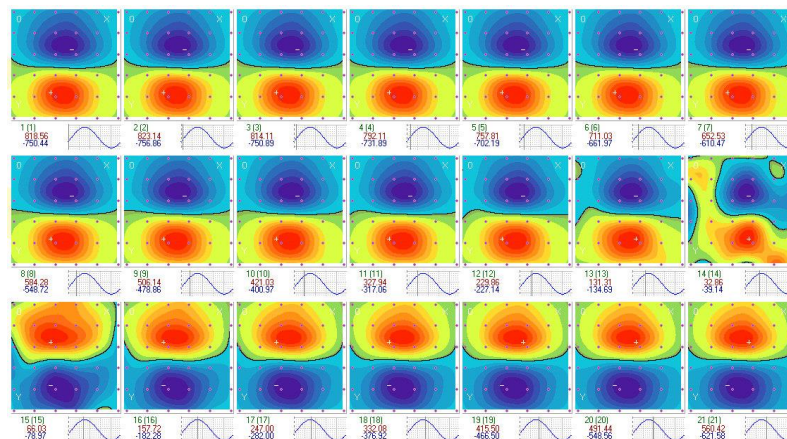


РИС. 3. Карти магнітного поля тестового зразка (норма)

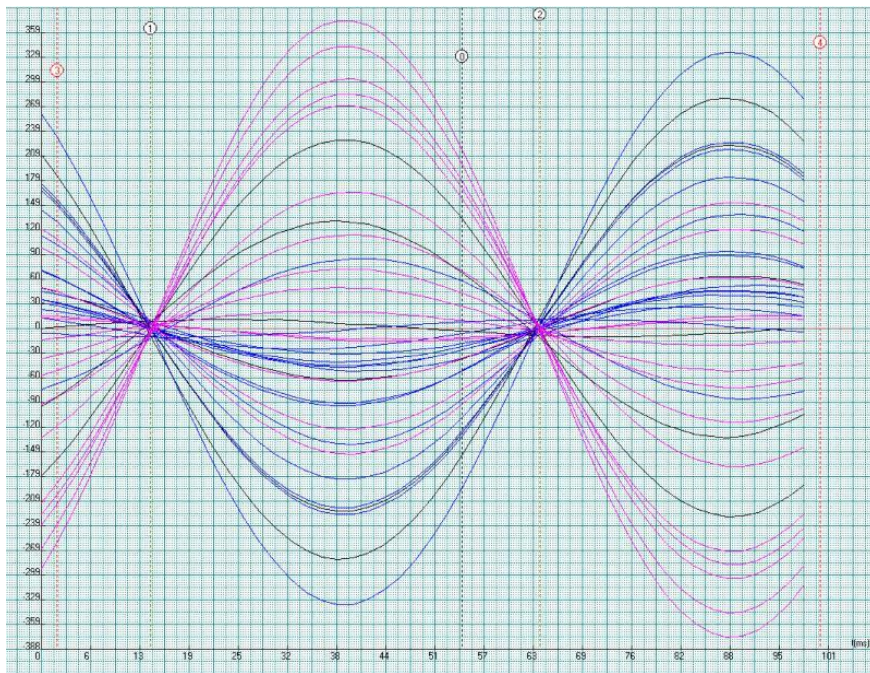


РИС. 4. Усереднений сигнал у 36 точках у площині над тестовим зразком (норма)

Для порівняння на рис. 5 та 6 показано карти магнітного поля і усереднений сигнал у 36 точках для антени, яка має недостатній баланс.

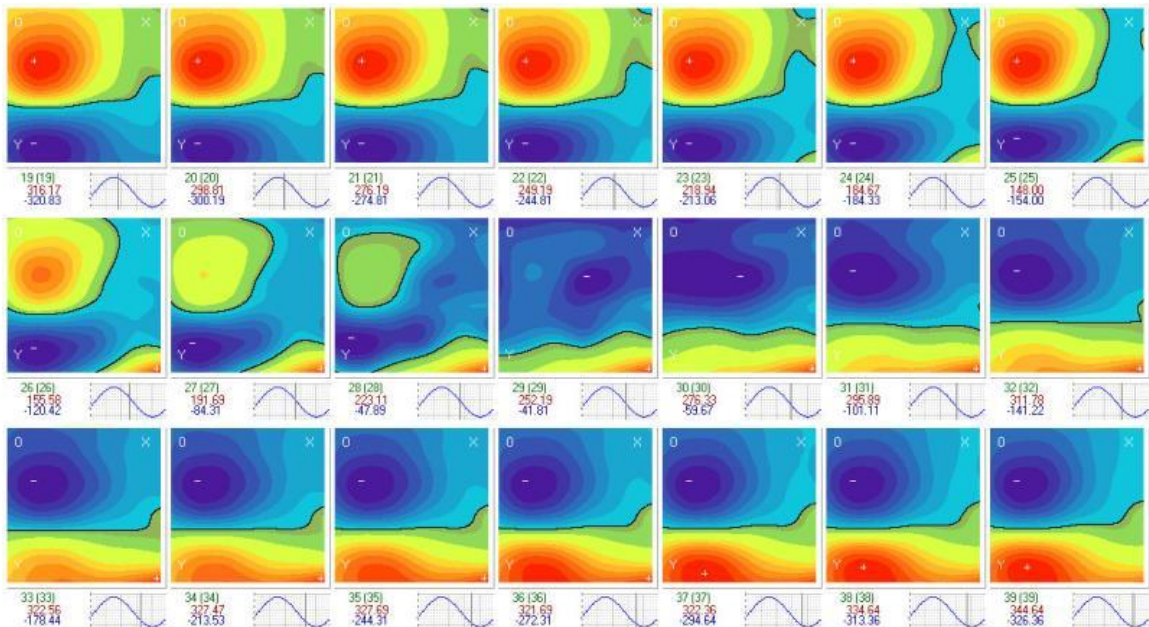


РИС. 5. Карти магнітного поля для тестового зразка при недостатньо збалансованій антені

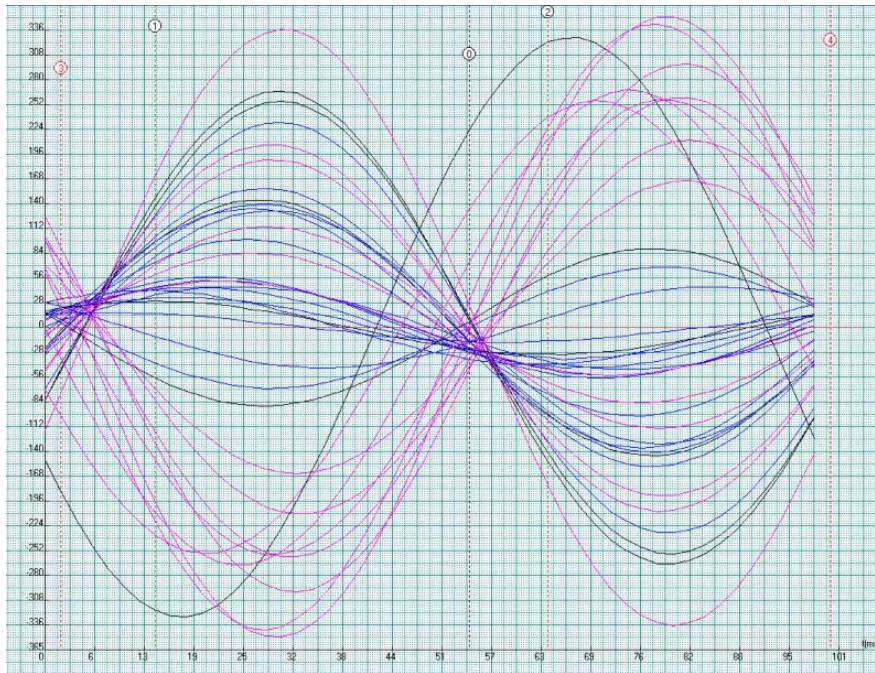


РИС. 6. Усереднений сигнал у 36 точках у площині над тестовим зразком, отриманий з недостатньо збалансованою антеною

Недоліки антенного блоку магнітометра, які проявились при практичному застосуванні приладу для дослідження магнітних властивостей біологічних тканин лабораторних тварин та зразків матеріалів привели до необхідності оптимізації блока надпровідної антени та процедури її балансування.

Враховуючи той факт, що надпровідна антена – аксіальний градіометр другого порядку, невеликого (8 мм) діаметра, намотана на каркасі, який виготовлено з високою точністю та має доволі високий ступінь початкового балансу, було запропоновано на першому етапі оптимізації відмовитись від балансувальних елементів по горизонтальним складовим поля (X , Y). Був залишений тільки елемент балансування антени по вертикальній складовій (Z), який представляє собою надпровідне кільце, що не порушує симетрії антени. Наявність високого ступеня початкового балансу надпровідної антени було перевірено експериментально. Для цього елементи балансування антени по складовим (X , Y), у працюючій системі зі збалансованою антеною, були підняті механізмом переміщення у верхнє положення, тобто, виведені із зони впливу на кільця градіометра. При цьому не спостерігалось значної зміни амплітуди вихідного сигналу від котушок намагнічування. Система продовжувала функціонувати у робочому режимі.

Другим важливим кроком процедури оптимізації антенного блоку було використання для балансування антени соленоїда зі спеціальним розташуванням витків обмотки з метою підвищити однорідність поля у середині соленоїда та усунути спотворення поля на його краях. При цьому балансування антени по вертикальній складовій (Z) виконувалось безпосередньо в геометричному центрі котушок підмагнічування рис. 7, а. Це дозволило поєднати місце балансування антени з місцем робочих вимірювань. Соленоїд встановлюється таким чином, щоб вісь антени збігалась з віссю соленоїда, а їх геометричні центри співпадали.

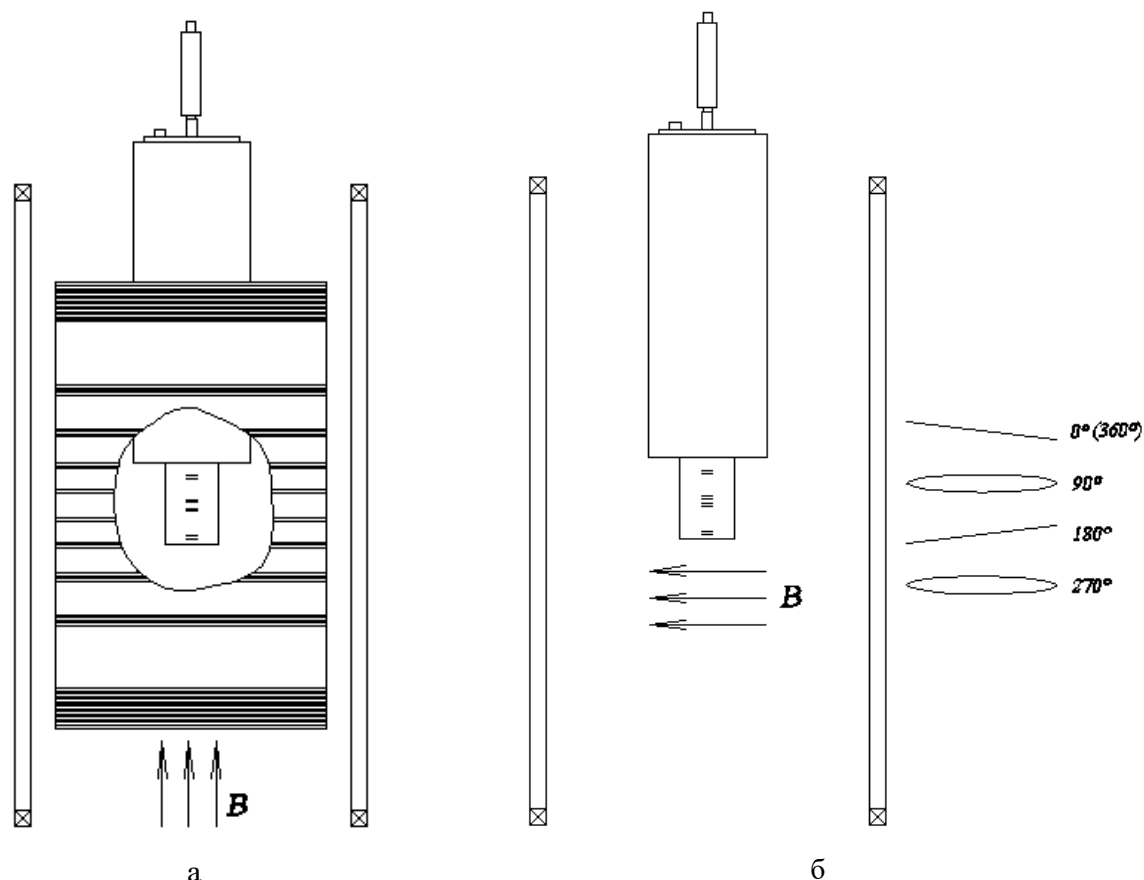


РИС. 7. *а* – балансування антен по вертикальній складовій поля; *б* – проекції витків антени на вертикальну площину при обертанні зонда на 360°

Після балансування антени соленоїд видаляється, а в котушки підмагнічування подається змінний струм частотою 86,8 Гц. Після чого, вихідний сигнал магнітометра мінімізується шляхом повертання зонду навколо власної осі. Проникнення горизонтальної складової сигналу від котушок підмагнічування у витки градіометра, пов'язано з неідеальним збігом площин кілець антени з горизонтальною площиною та з незначним спотворенням поля котушок підмагнічування, пов'язаним з розташованим приблизно в 100 мм від антени надпровідним екраном СКВІД-сенсора. Внаслідок цього на виході магнітометра існує залишковий сигнал з частотою струму підмагнічування. На рис. 7, *б* показано проекції витка антени на вертикальну площину та їх зміни при обертанні антени навколо своєї осі. При обертанні антени спостерігаються два мінімуму і два максимуму сигналу з частотою підмагнічування на виході магнітометра. При чому сигнал на виході магнітометра може виходить за межі динамічного діапазону приладу. Тому, обертаючи зонд, необхідно досягти мінімального сигналу від котушок підмагнічування та зафіксувати його положення. Після мінімізації сигналу та фіксації зонду, можна приступити до контрольного вимірювання тестового зразка.

Висновок. Таким чином, завдяки запропонованому способу оптимізації конструкції антенного блоку магнітометра та процесу його налаштування, процедура налаштування магнітометра суттєво спрощується, проводиться без переміщень кріостата з зондом у котушки однорідного поля для балансування, скорочується час підготовки системи до роботи та покращуються метрологічні показники вимірювальної системи.

Список літератури

1. Примин М.А., Недайвода И.В., Сутковой П.И., Минов Ю.Д. Биосептометрические исследование магнитных сигналов мелких животных – физических моделей. *Комп'ютерні засоби мережі та системи*. 2019. № 18. С. 24–31. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/168472>
2. Примин М.А., Недайвода И.В., Бурчак А.В., Сутковой П.И., Минов Ю. Д. Бесконтактные исследования и анализ магнитных сигналов образцов угольного вещества. . *Комп'ютерні засоби мережі та системи*. 2017. № 17. С. 30–39. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/131507>
3. Škrátek M., Dvurečenskij A., Kluknavský M., Barta A., Bališ P., Mičurová A., Cigáň A., Eckstein-Andicsová A., Maňka J., Bernátová I. Sensitive SQUID Bio-Magnetometry for Determination and Differentiation of Biogenic Iron and Iron Oxide Nanoparticles in the Biological Samples. *Nanomaterials*. 2020. **10** (10). P. 1993. <https://doi.org/10.3390/nano10101993>
4. Barandiaran J.M. et al. Search for Magnetite Nanoparticles in the Rats' Brain. In *IEEE Transactions on Magnetics*. Jan. 2015. **51** (1). P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2347337>.
5. Líšková S., Bališ P., Mičurová A. et al. Effect of iron oxide nanoparticles on vascular function and nitric oxide production in acute stress-exposed rats. *Physiol Res*. 2020. **69** (6). P. 1067–1083. <https://doi.org/10.33549/physiolres.934567>
6. US Patent. Superconducting magnetic sensor with improved balancing system. 3976938A, V. W. Hesterman, P. Alto., Calif. Aug. 24, 1976.

Одержано 26.08.2022

Мінов Юрій Дмитрович,кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,**Шпильовий Павло Борисович,**кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,**Мельник Євгеній Володимирович,**провідний інженер-електронік
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.

UDC 682.32+537.8

Yuriy Minov, Pavlo Shpylovi, Yevhenii Melnyk *

Optimization of the Antenna Unit of the Superconducting Magnetometer: Research of Weak Magnetic Signals*V. M. Glushkov Institute of Cybernetics NAS of Ukraine, Kyiv** Correspondence: evgm1991@gmail.com

Introduction. The article describes the optimization of the superconducting antenna design and balancing method of the superconducting antenna of magnetometer. This magnetometer is designed to study the magnetic properties of materials, as well as non-invasive study of the distribution of magnetic particles in organs of small laboratory animals, when toxic particles or drugs are introduced into the animal's body. The superconducting antenna of the magnetometer is a second-order axial gradiometer and is a part of the flux transformer of the SQUID sensor. For stable operation within the dynamic range of the magnetometer, the antenna must have a balance degree of at least 1/1000. Traditionally, it is balanced in a separate tuning module (Helmholtz coils), which creates a homogeneous magnetic field with a high degree of uniformity.

The purpose. The problem is that the subsequent displacement of the SQUID magnetometer unit into the measuring complex, even within the laboratory, reduces the degree of balance of the magnetometer due to objects that create a strong gradient magnetic field, which negatively affects the measurements.

Results. As a solution of this problem, the some approaches are described in the article. In order to increase the uniformity of the field inside the solenoid and eliminate field distortions at its edges, the using of so-

lenoid with a special arrangement of turns to balance the antenna directly at the measurement site was proposed. The balancing elements for the horizontal components of the magnetic field were eliminated. Also the antenna balancing element in the form of a ring along the vertical component of the magnetic field, which does not violate the symmetry of the antenna was applied.

Conclusions. Using this approach, it is possible to optimize the design of the antenna unit and the balancing process of the magnetometer antenna with a sufficient degree of balance in the vertical component directly in the geometric center of the measuring system, which reduced the time of preparing the system for work and improved the metrological indicators of the system.

Keywords: superconductivity, SQUID-magnetometry, axial gradiometer, antenna balance, optimization.