

**ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ МЕХАНІЗМУ
БАЛАНСУВАННЯ АКСІАЛЬНОЇ НАДПРОВІДНОЇ
АНТЕНИ: ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ
СТАБІЛІЗАЦІЇ СТУПЕНЯ ЇЇ БАЛАНСУ**

Вступ. СКВІД магнітометр з прийнятною надпровідною антеною – надзвичайно чутливий інструмент для дослідження магнітних полів будь-якої природи. Чутливість таких магнітометрів може досягати $5 \div 8 \times 10^{-15}$ Т/Гц^{1/2} в діапазоні від 0 до 100 Гц. При роботі магнітометра в неекранованому просторі, особливо у межах сучасного міста, дуже складно реалізувати переваги надвисокої чутливості магнітометра, бо на заваді стає високий рівень електромагнітних перешкод. Не зважаючи на те, що зазвичай у магнітометрі задіяні всі відомі засоби боротьби з електромагнітними перешкодами, іноді дуже складно виділити корисний сигнал на фоні перешкод значної амплітуди. Слід зазначити, що засобів боротьби з електромагнітними перешкодами всього три. Це просторова і частотна селекції сигналу та цифрова обробка. На наш погляд просторова селекція сигналу – найбільш дієвий засіб, що дозволяє значно покращити відношення сигнал/перешкода безпосередньо в надпровідній антені [1].

Найпоширеніша з реалізацій принципу просторової селекції в СКВІД магнітометрі, це використання антен градіометричного типу (рис. 1,а, 1,б, 1,г, 1,р). Антени градіометричного типу на відміну антени магнітометра (рис. 1,в), сприймають сигнал віддалених джерел як однорідні поля, які створюють однакові та протилежно направлені струми у приймальних контурах. Для якісної просторової селекції вимірюваного сигналу, необхідна ідеальна рівність площ витків градіометрів, що підключені по диференціальній схемі. На практиці, особливо коли градіометр намотаний вручну надпровідним дротом на каркасі з діелектрика, ступінь відмінності площ витків градіометра рідко перевищує 0.1%. Тому виникає необхідність вирівнювання ефективних площ витків градіометра за допомогою надпровідних (тримерних) елементів. Для цього конструкцію вимірювального зонда доповнюють механізмом переміщення спеціальних надпровідних елементів, за допомогою яких змінюють ефективну площу відповідного витка градіометра.

Авторами запропоновано нову конструкцію механізму балансування надпровідникового СКВІД-магнітометра. Розташування його силових елементів всередині антени градіометра дозволяє уникнути деформуючих механічних напружень, що виникають під час зміни рівню гелію і значних температурних градієнтів. Запропонований алгоритм балансування надпровідного градіометра був застосований для балансування надпровідних антен градіометричного типу. Отримано залежності сигналу магнітометра від положення елементів балансування.

Ключові слова: СКВІД-магнітометр, надпровідність, градіометр.

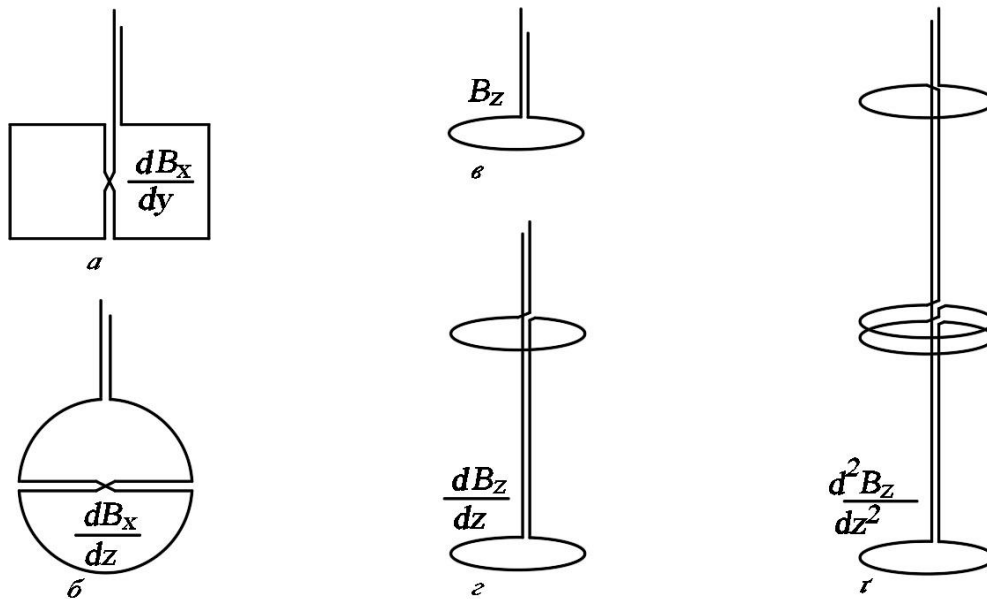


РИС 1. Типи надпровідних антен

Для цього криостат з СКВІД сенсором і антеною розміщують у системі котушок магнітного поля (котушки Гельмгольца) з високим ступенем однорідності і зміщуючи тримерні елементи відносно витків градіометра, досягають мінімального значення сигналу від котушок однорідного поля послідовно по всіх трьох компонентах (X, Y, Z) поля. Існує багато варіантів конструкцій механізмів переміщення тримерних елементів. Проте, усі вони мають окремий редуктор або силовий гвинт з повзуном, з'єднаним досить довгою тягою з антеною. Насамперед це обумовлено тим, що деталі редуктора та силовий гвинт зазвичай зроблені з металу. Тому мають бути максимально віддалені від надпровідної антени щоб не спотворювати магнітне поле і не створювати додатковий внесок у погіршення ступеня балансу вхідної антени. Слід зауважити, що усі елементи системи розташовані в криостаті заповненому рідким гелієм, рівень якого постійно змінюється внаслідок випаровування. Тому змінюється температура частин механізму які не занурені у рідкий гелій. Зміна температури довгих тяг на яких закріплені надпровідні елементи балансування антени при зниженні рівня рідкого гелію, призводить до незначної зміни їх довжини та, як наслідок, зміни ступеня балансу антени. Не дивлячись на те, що конструкція зонду надпровідного магнітометру в цілому усталена [2, 3], до цього часу проводяться розробки зондів для вирішення унікальних задач [4] або розробки нового покоління надпровідного магнітометричних систем [5].

Постановка задачі. Для нормальної роботи СКВІД магнітометра впродовж тривалого часу (час між заправками криостата рідким гелієм), вкрай необхідно мінімізувати зміни ступеня балансу надпровідної антени при зменшенні рівня рідкого гелію у криостаті. Для мобільних СКВІД магнітометрів, які транспортуються літальними апаратами або наземним транспортом, зміни ступеня балансу антени можуть бути пов'язані не тільки з зміною рівня гелію у криостаті, а й з механічним навантаженням механізму балансування. Маються на увазі вібрація транспортних засобів та їх прискорення. Усі ці фактори можуть впливати на ступінь балансування антени завдяки мікроскопічним переміщенням надпровідних елементів балансування, тому що навіть досконалий механізм має люфти. Зважаючи на зазначені виклики, нами було вдосконалено механізм балансування антени

ни та оптимізовано методику її балансування. Найбільш розповсюджена компоновка зонду СКВІД магнітометра у кріостаті така, що надпровідна градіометрична антена знаходиться нижче СКВІД сенсора, а механізм переміщення балансуючих елементів антени вище (рис. 2,а). Це обумовлено не тільки необхідністю віддалити металеві елементи механізму від антени, а ще збільшує ресурс роботи магнітометра на одній заправці гелієм, бо для нормальної роботи магнітометра необхідно щоб рівень рідкого гелію був вище СКВІД сенсора. В свою чергу СКВІД сенсор має бути на певній відстані від антени, щоб надпровідний екран, в якому він знаходиться, не спотворював магнітне поле поблизу антени. Оптимальним рішенням було б розміщення механізму переміщення елементів балансування безпосередньо у корпусі антени (рис. 2,б), тоді усі частини механізму будуть розташовані нижче рівня рідкого гелію протягом всього часу роботи магнітометра. Це забезпечить постійну температуру усіх елементів механізму балансування і, як наслідок, стабільність ступеня балансу надпровідної антени. Друга умова покращення стабільності ступеня балансу надпровідної антени – вибір оптимального розміру елемента балансування. Від цього залежить ступінь його впливу на баланс антени при переміщенні елемента відносно відповідного витка антени. Звісно, що переміщення елемента балансування на пряму залежить від механізму балансування. В нашому випадку це гвинт М2, що забезпечує лінійне переміщення муфти 0.4 мм на одне обертання. Застосовувати різьби з меншим кроком, наприклад, М2×0.25, не має потреби з причини тих самих люфтів у механізмі балансування. Непоганий результат дає застосування редуктора 1 : 2 або 1 : 3. Але це значно ускладнює конструкцію механізму балансування.

На рис. 2 схематично показано два варіанти реалізації механізмів балансування надпровідних антен.

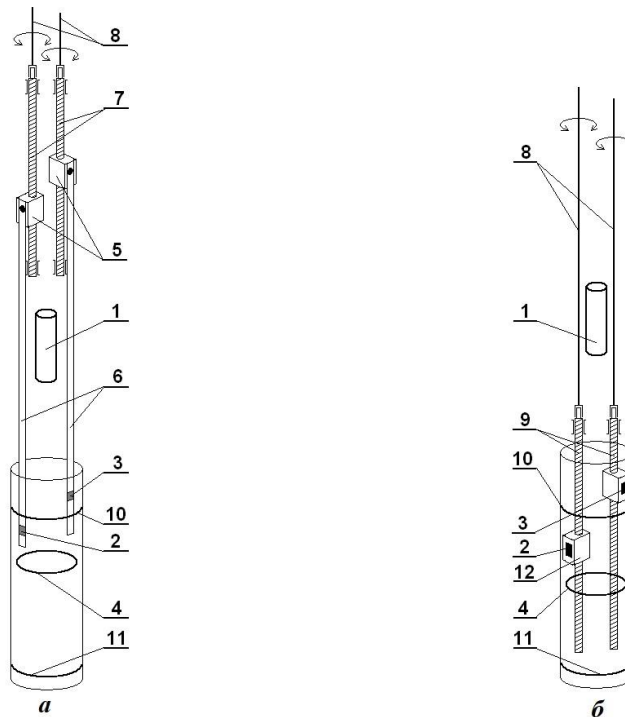


РИС. 2. Варіанти компоновки механізму балансування надпровідної антени. 1 – СКВІД сенсор, 2 – елемент балансування антени по компоненті X, 3 – елемент балансування антени по компоненті Y, 4 – елемент балансування антени по компоненті Z, 5 – латунні різьбові муфти, 6 – склопластикові тяги, 7 – латунні силові гвинти, 8 – склопластикові осі, 9 – склопластикові силові гвинти, 10 – верхнє кільце градіометра, 11 – нижнє кільце градіометра, 12 – текстолітова різьбова муфта

Варіант розміщенням латунних силових гвинтів 7 з латунними муфтами 5 вище СКВІД сенсора 1 при якому елементи балансування 2 (X) та 3 (Y) переміщуються між верхнім кільцем градіометра 10 та нижнім 11 за допомогою довгих тяг (рис. 2,а). Та варіант з розміщенням механізму балансування безпосередньо всередині каркасу надпровідної антени (рис. 2,б). Для реалізації конструкції механізму балансування при якому усі його частини перебувають нижче рівня рідкого гелію протягом усього часу роботи магнітометра, нами було розроблено компактний механізм, розміщений безпосередньо всередині корпусу надпровідної антени та виготовлено основні його частини, а саме різьбові муфти та силові гвинти з текстоліту та склопластику (рис. 3). Були перевірені при температурі рідкого гелію силові гвинти з склопластику з різьбою різного розміру, M3, M2.5, M2. Виявилось, що навіть гвинти з склопластику з різьбою M2, надійно працюють при температурі рідкого гелію. Тому в конструкції механізму балансування було віддано перевагу саме силовим гвинтам із стандартною різьбою M2, що забезпечують необхідну надійність механізму балансування та мають мінімальний крок 0.4 мм. Різьбові муфти були виготовлені з текстоліту марки А. Надпровідні елементи балансування 2 (X) і 3 (Y) приклеєні безпосередньо до поверхні різьбових муфт з текстоліту 12, силові гвинти 9 обертаються зовні за допомогою довгих склопластикових осей 8. Балансуючий елемент по складовій Z (надпровідне кільце на каркасі 4) переміщується лінійно вздовж вертикальної осі за допомогою механізму (силовий гвинт та муфта) повністю ідентичного механізмам переміщення елементів X та Y. Механізм навмисне не показаний на рисунках 2,а та 2,б, щоб не захащувати їх.

З метою подальшого покращення стабільності ступеня балансу надпровідної антени нами було оптимізовано процедуру балансування у котушках однорідного поля (котушки Гельмгольца). Насамперед було експериментально отримано залежності сигналу на виході магнітометра від поля котушок Гельмгольца при переміщенні елементів балансування різних розмірів уздовж осі Z. Криві 1, 2, 3 відповідають переміщенню балансувального елемента Z (надпровідного кільця) між верхнім та нижнім кільцями градіометра, а криві 4, 5, 6 – переміщенню елементів X, Y відносно верхнього витка антени. Експериментальні результати були отримані для надпровідної антени, градіометра другого порядку, діаметром 20 мм та базою 60 мм при частоті струму в котушках однорідного поля 8 Гц (рис. 3).

Слід зауважити, що залежність повністю однакова для градіометрів 1-го та 2-го порядку, тому на рис. 3 показано обидва типи антен. Ліворуч приведені залежності зміни сигналу магнітометра при переміщенні надпровідного кільця Z між кільцями градіометра. Залежність 1 відповідає діаметру надпровідного кільця Z максимально наближеного до діаметра кільця надпровідної антени. При цьому максимальна крутизна схилів кривої не дозволяє з великою точністю зафіксувати мінімальний сигнал від котушок Гельмгольца. До того ж переміщення різьбової муфти навіть у межах люфту механізму, буде призводити до погіршення ступеня балансу надпровідної антени. Крива 2 на (рис. 3) відповідає діаметру надпровідного кільця Z приблизно 2/3 діаметра кільця антени. Такий розмір забезпечив кривій схили з помірною крутизною, що є добрим показником та забезпечує мінімальне відхилення ступеня балансу антени у межах люфту механізму. Крива 3 (рис.3) відповідає діаметру надпровідного кільця Z приблизно 1/4 діаметра кільця антени. За допомогою кільця зазначеного діаметра не вдалось отримати вихідний сигнал магнітометра від поля котушок Гельмгольца амплітудою 0 вольт. Крива не перетинає нульову позначку і далі амплітуда сигналу знову починає зростати. Аналогічно досліджувались залежності амплітуди сигналу магнітометра від площі балансуєчих елементів X та Y. Крива 4 відповідає площі балансуєчого надпровідного елемента приблизно 10 мм². Вона, так як і у випадку з кривою 1, має дуже велику крутизну схилів і не може забезпечити необхідну стабільність ступеня балансу антени. Крива 5 зафіксована при площі балансуєчого елемента приблизно 6 мм². Має помірну крутизну схилів і може вважатися близькою до оптимальної. Так саме крива 6 з приблизною площею 3 мм², не здатна забезпечити достат-

ню ступінь балансу антени, так як не може компенсувати сигнал магнітометра, зменшивши його до 0 вольт. Слід додати, що вихідний ступінь балансу антени для різних градіометрів, що виготовлені вручну надтонким дротом, може відрізнятись приблизно на 20 %. Тому при оптимізації площ елементів балансування слід це враховувати і в особливо відповідальних випадках проводити додаткову корекцію площ елементів балансування.

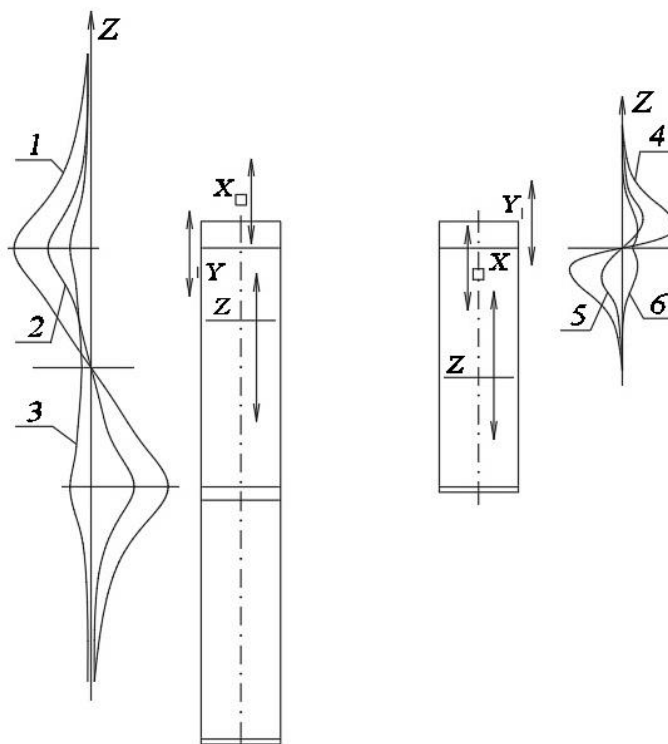


РИС. 3. Вплив надпровідних балансуєчих елементів при переміщенні їх відносно витків надпровідного градіометра в залежності від їх розміру. 1 – великий діаметр надпровідного кільця Z, 2 – діаметр надпровідного кільця Z близький до оптимального, 3 – недостатній діаметр надпровідного кільця Z, 4 – велика площа елементів балансування X, Y, оптимальна площа елементів балансування X, Y, недостатня площа елементів балансування X, Y

Висновок. Результати досліджень довели, що для досягнення високого ступеня балансу антени і його стабільності незалежно від рівня гелію у кріостаті та інших дестабілізуючих впливів, необхідно не тільки модернізувати механізм балансування, але й ретельно здійснити саму процедуру балансування з оптимізацією розмірів надпровідних балансуєчих елементів. Запропонований алгоритм балансування надпровідного градіометра може бути застосований для балансування надпровідних антен градіометричного типу будь-якої конфігурації та розмірів.

Авторські внески.

Мінов Ю.Д.: концептуалізація, методологія, дослідження, написання – оригінальна чернетка. Шпильовий П.Б.: концептуалізація, формальний аналіз, чисельні експерименти, написання – рецензування та редагування. Мельник Є. В.: дослідження, узагальнення, формальний аналіз, написання – редагування.

Список літератури

1. Clarke J., Braginski A.I. The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDS and SQUID Systems. 2004. <http://dx.doi.org/10.1002/3527603646>
2. US Patent. Superconducting magnetic sensor with improved balancing system. 3976938A, V.W. Hesterman, P. Alto., Calif. Aug. 24. 1976.
3. US Patent. High balance gradiometer. Vol. 1. US 2003\0141868A1. A.A. Bakharev. 2003.
4. Park J.-H., Stillwell R.L., Murphy T.P., Tozer S.W., Palm E.C. Design and Construction of a top loading dilution refrigerator probe for a superconducting quantum interference device DC magnetometer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. Vol. 150. 012035. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/150/1/012035>
5. Lee Y.H., Kang C.S., Yu K.K., Kim J.M., Kim K., Kwon H., Lim H.K., Kim I.S., Park Y.K., Lee S.G. Characteristics of magnetocardiograms measured using various pickup coil structures. *Physica C: Superconductivity*. 2007. Vol. 463–465. P. 1017–1023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physc.2007.03.472>

Одержано 16.04.2024

Мінов Юрій Дмитрович,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0009-0003-0283-8069>

Шпильовий Павло Борисович,

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0000-0003-1006-8263>

Мельник Євгеній Володимирович,

провідний інженер-електронік
Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, Київ,
<https://orcid.org/0009-0007-0524-9947>

УДК 537.8

Ю.Д. Мінов, П.Б. Шпильовий, Є.В. Мельник *

Оптимізація конструкції механізму балансування аксіальної надпровідної антени: дослідження методів стабілізації ступеня її балансу

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ

* Листування: evgm1991@gmail.com

Вступ. Існують три основні засоби боротьби з електромагнітними перешкодами, що ускладнюють роботу СКВІД-магнітометрів – це просторова і частотна селекції сигналу та цифрова обробка. Саме просторова селекція сигналу є найбільш дієвим засобом, що дозволяє значно покращити відношення сигнал/перешкода безпосередньо в приймальній надпровідній антені. Оптимізація конструкції системи балансування приймальної градіометричної антени – це актуальна задача в умовах існування високих електромагнітних завад сучасного міста.

Мета роботи – обґрунтувати і розробити нову конструкцію механізму балансування надпровідникової градіометричної антени СКВІД-магнітометра для роботи в умовах високого рівня електромагнітних завад. Розробити алгоритм балансування антени такого СКВІД-магнітометра.

Результати. В роботі розглянуто основні реалізації градіометричних антен та методи їх балансування. Як основний чинник, що впливає на нормальну роботу системи балансування градіометричної антени СКВІД-магнітометра впродовж тривалого часу (час між заправками криостата рідким гелієм), виділено зменшення рівня рідкого гелію у криостаті. Таке зменшення рівня призводить до деформації окремих елементів системи балансування. Як протидію цьому запропоновано розміщення механізму переміщення елементів балансування градіометра безпосередньо в корпусі антени, при якому всі частини механізму розташовані нижче рівня рідкого гелію протягом всього часу роботи магнітометра. Проведено аналіз стійкості до температурних та механічних впливів окремих елементів системи балансування.

Обґрунтовано підхід до вибору оптимального розміру елемента балансування, від чого залежить ступінь його впливу на баланс антени.

Експериментально отримано залежності сигналу на виході магнітометра від поля котушок Гельмгольца при переміщенні елементів балансування різних розмірів уздовж осі аксіального градіометра. Експериментальні результати отримані для надпровідної антени, градіометра другого порядку, діаметром 20 мм та базою 60 мм.

Висновки. Запропонований авторами підхід до підвищення ефективності фільтрації електромагнітних завад за допомогою надпровідникових градіометричних антен, дозволив розробити нову конструкцію їх механізму балансування. Його перевага – це стійкість до механічних напружень окремих елементів системи, що виникає як наслідок існування значних температурних градієнтів під час випаровування рідкого гелію.

Запропонований алгоритм балансування надпровідного градіометра може бути застосований для балансування надпровідних антен градіометричного типу будь-якої конфігурації та розмірів.

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

UDC 537.8

Yurii Minov, Pavlo Shpylovyi, Yevhenii Melnyk*

Optimization of Construction of the Balance Mechanism Axial Superconducting Antenna: Research of Methods Stabilizing the Degree of its Balance

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

* Correspondence: evgm1991@gmail.com

Introduction. There are three main means of suppression of electromagnetic interference that can reveal at the operation of SQUID magnetometers – spatial and frequency signal selection and digital processing. The spatial signal selection is the most effective means that allows to significantly improve the signal/interference ratio directly in the receiving superconducting antenna. To optimize the design of the balancing system of the receiving gradiometric antenna is an important task in the conditions of existence of high electromagnetic interference in the contemporary city.

The purpose of the work is to justify and develop a new design of the balancing mechanism of superconducting gradiometric antenna of the SQUID magnetometer for operation in conditions of a high level electromagnetic interference. To develop an algorithm for balancing the antenna of such a SQUID magnetometer.

Results. The paper considers the main implementations of gradiometric antennas and their balancing methods. As the main factor affecting the normal operation of the balancing system of the gradiometric antenna of the SQUID magnetometer over a long period of time (the time between refueling the cryostat with liquid helium), the decrease in the level of liquid helium in the cryostat was emphasized. Such a decrease in level leads to the deformation of individual elements of the balancing system. As a counteraction to this, it is proposed to place the mechanism for moving the gradiometer balancing elements directly in the antenna housing. In it the all parts of the mechanism are located below the level of liquid helium during the entire time the magnetometer is operating. The analysis of the resistance to temperature and mechanical effects of individual elements of the balancing system was carried out. The approach to choosing the optimal size of the balancing element is substantiated, this size influences at the degree of the balance of antenna.

The output of the magnetometer on the field of Helmholtz coils during the movement of balancing elements of different sizes along the axis of the axial gradiometer was obtained experimentally. Experimental results were obtained for a superconducting antenna – the second-order gradiometer, with a diameter of 20 mm and base of 60 mm.

Conclusions. The approach proposed by the authors to increase the efficiency of electromagnetic interference filtering with the help of superconducting gradiometric antennas made it possible to develop a new design of their balancing mechanism. Its advantage is the resistance to mechanical stresses of individual elements of the system, which arises as a result of the existence of significant temperature gradients during the evaporation of liquid helium.

The proposed algorithm for balancing of the superconducting gradiometer can be applied to balance superconducting gradiometric antennas of any configuration and size.

Keywords: superconductivity, SQUID-magnetometer, antenna balance, optimization.