

## **АНАЛІЗ НАДЧУТЛИВИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЇХ СЕНСОРІВ ДО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕФЕКТИ ДЖОЗЕФСОНА**

*Осадчук О. В., д.т.н., проф.; Притула М. О., аспірант;  
Коваль К. О., к.т.н., доц.*

*Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна*

Метою аналізу є інформаційна підготовка для проведення експериментальних досліджень надчутливих пристроїв для вимірювання магнітного поля.

Завданням роботи є пошук та аналіз сучасних надчутливих пристроїв та їх сенсорів для вимірювання магнітного поля.

Розвиток фізики надпровідності сприяв створенню нового вимірювального сенсору, що отримав назву «СКВІД» (*SQUID, Superconducting Quantum Interference Device*). Принцип дії сенсору СКВІД заснований на використанні таких квантових явищ — ефекту Джозефсона і інтерференції хвильової функції електронних пар в надпровідному кільці, що містить джозефсонівський перехід. СКВІД являє магнітометрів, що застосовуються для вимірювання магнітного нуля і інших фізичних величин таких. Чутливість таких сенсорів в 1000 разів вища, ніж у кращих ненадпровідникових магнітометрів [1].

Принцип роботи пристрою: для підтримки надпровідного стану, який можливий при дуже низькій температурі, СКВІД поміщають в посудину Дьюара з рідким гелієм. Якщо стінки посудини металеві, то виникаючі у них струми спотворюють магнітні поля від джерел, що знаходяться зовні. Останнім часом розроблені спеціальні діелектричні посудини Дьюара зі склопластику. У них СКВІД розміщений лише в сантиметрі від зовнішньої стінки посудини і може без спотворень сприймати магнітне поле від зовнішнього джерела, що знаходиться при кімнатній температурі [2].

Характерною особливістю СКВІДа є те, що при зміні магнітного потоку, що пронизує контур, напруга на виході періодично змінюється, причому період дорівнює кванту магнітного потоку. Ця залежність дозволяє створити на основі СКВІДів найчутливіші вимірювачі магнітного поля [3].

На сьогодні, в електроніці набули найбільшого поширення СКВІДи, які виготовлені за тонкоплівковою технологією. Схема такого СКВІДу являє собою замкнутий контур з надпровідника (в який включені два джозефсонівських переходи) з чотирма виводами, які використовуються для подачі струму і зняття напруги, а технологія виготовлення СКВІДів рухається вперед [4]. В більшості використовуваних системах на базі низькотемпературних СКВІДів, самі сенсори розташовані всередині малих циліндричних надпровідних магнітних екранів. Багато фірм, які виготовляють низькотемпературні СКВІДи, поширюють не просто кремнієві чіпи, а сенсори

закапсульовані в твердий пластиковий матеріал з виведеними на корпус металевими контактами. Такі пристрої легко монтуються всередину суперізованих гелійових кріостатів із оргскла. Також, паралельно розвивається технологія виготовлення високотемпературних СКВІДів [3]. Вони з'явилися порівняно недавно і мають більш високий рівень шуму в порівнянні з низькотемпературними СКВІДами. Але не дивлячись на це, високотемпературні СКВІДи постійно вдосконалюються. Приклади таких СКВІДів виготовляються в Юліхському технологічному центрі в Німеччині [4].

Одним із відомих виробників СКВІД датчиків на ринку є американська компанія *Tristan Technologies* та англійська компанія *Cryogeic* [2, 4]. Приклади СКВІД датчиків компанії *Tristan Technologies* наведено на рис. 1.

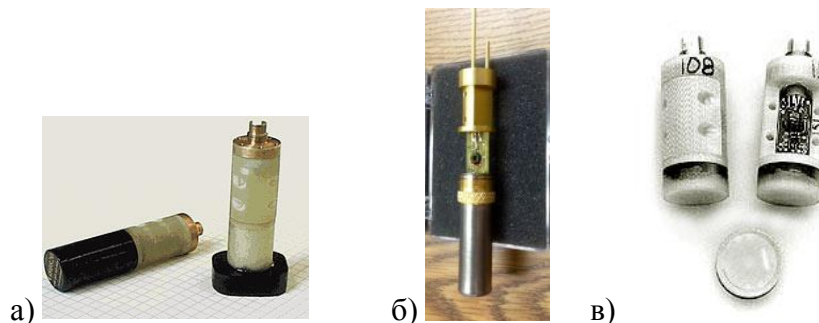


Рисунок 1. Приклади СКВІД датчиків компанії *Tristan Technologies*  
а — СКВІД високої температури НТМ-8; б — СКВІД низької температури *LSQ/20LTS*;  
в — СКВІД низької температури *LSQ/20M LTS*.

Параметри СКВІДа високої температури НТМ-8 [2]: розмах сигнальної характеристики 50 мкВ; крутість  $\partial V_{SQUID} / \partial \Phi = 150$  мкВ/ $\Phi_0$  ( $\Phi_0$  — квант магнітного потоку); коефіцієнт перетворення індукції магнітного поля в магнітний потік  $\partial B / \partial \Phi = 2,8$  нТ/ $\Phi_0$ ; чутливість по магнітному полю 50 фТл/ $\text{Гц}^{1/2}$ ; власний шум 18 мк $\Phi_0$ / $\text{Гц}^{1/2}$ ; ефективна площа 0,7 мм<sup>2</sup>; коефіцієнт зв'язку котушки зворотного зв'язку 2,5 мкА/ $\Phi_0$ .

Параметри СКВІД-магнетометрів S700X та CF-S700X [4]: напруженість магнітного поля  $\pm 7,5$  Т; однорідність магнітного поля 0,01 %; стабільність магнітного поля 0,1% ppm/ч; роздільна здатність встановлення магнітного поля: 0,11 мТ (стандартно),  $10^{-7}$  Т (опція); максимальний розмір зразка 9 мм; діапазон температур зразка: 1,6 – 300К (стандартно), до 700К (опція); стабільність температури: 2 мК / 10 К, 3 мК / 100 К, 10 мК / 300 К; діапазон вимірювань:  $10^{-8}$  –  $10^{-2}$  етм (стандартно), до 5 етм (опція); чутливість  $10^{-8}$  етм.

На основі низькотемпературних (гелієвих) СКВІДів створені найчутливіші вольтметри і підсилювачі, шуми яких наближаються до квантової границі. Надчутливі магнітометри, що вимірюють варіації магнітних полів з великою роздільною здатністю — це вже промислова продукція, що знаходить широке застосування у вимірювальній техніці.

Таким чином, після проведеного аналізу, можна зазначити, що СКВІД-и займають у фізиці низьких температур особливе місце і в даний час використовуються в багатьох практичних областях науки і техніки. Чутливість таких пристроїв в діапазоні від сотих часток герца до десятків гігагерц знаходиться поза конкуренцією. Тому використання СКВІДів в більшості випадків дозволяє отримати пристрої з якісно новим рівнем параметрів. Зокрема, на основі низькотемпературних СКВІДів були створені магнітометри і градієнтметри, які дозволили реєструвати магнітні поля мозку і серця людини. Після відкриття високотемпературної надпровідності були випробувані перші зразки СКВІДов на основі високотемпературних надпровідників. Вони продемонстрували можливість створення вимірювальних систем, що працюють при температурі рідкого азоту і мають параметри, які близькі до їх низькотемпературних аналогів.

#### **Перелік посилань**

1. Любимов В. В. Магнитометры-градиентометры для научных исследований: новые разработки / В. В. Любимов // Экономика и производство. Технологии, оборудование, материалы. — 2009. — №2. — С. 61-63.

2 Faley M. I. Low Noise HTS dc-SQUID Flip-Chip Magnetometers and Gradiometers / M. I. Faley, U. Poppe, K. Urban, D. N. Paulson, T. N. Starr, R. L. Fagaly // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, — 2001. — Vol. 11, No. 1 — P. 120-127.

3 Koelle D. High transition temperature superconducting quantum interference devices / D. Koelle, R. Kleiner, F. Ludwig, E. Dantsker, J. Clarke // Reviews of Modern Physics — 1999. — Vol. 71, No. 3. — P. 631-686.

4 Фалей М. И. Магнитометры и градиометры на основе гетероструктур оксидных сверхпроводников / М. И. Фалей // Радиотехника и электроника. — 2005. — №3. — С. 2-8.

#### **Анотація**

Проведено аналіз надчутливих пристроїв та їх сенсорів до магнітного поля на ефекті Джозефсона. Представлено основи роботи таких сенсорів та приклади їх промислових зразків іноземного виробництва. Наведено варіанти застосування СКВІДів в промисловості.

Ключові слова: СКВІД, магнітне поле, сенсор.

#### **Аннотация**

Проведен анализ сверхчувствительных устройств и их сенсоров к магнитному полю на эффекте Джозефсона. Представлены основы работы таких сенсоров и примеры их промышленных образцов иностранного производства. Приведены варианты применения СКВИД в промышленности.

Ключевые слова: СКВИД, магнитное поле, сенсор.

#### **Abstract**

The supersensitive devices and their sensors to the magnetic field on the Josephson effect are analysed. The basics of sensors and examples of their foreign industrial designs are presented. The industry SQUIDs are presented.

Keywords: SQUID, magnetic field, sensor.