

Винахід відноситься до вимірювальної техніки і може бути використаний для вимірювання слабких змінних магнітних полів.

Відомі способи та пристрої для перетворення напруженості слабких змінних магнітних полів у вимірювальну величину, котрою є електрична напруга. Вони складаються з приймального надпровідного кільця квантового перетворювача 1 та електронної схеми керування 3 і обробки 4 сигналу (рис. 1). У таких магнітометрах приймальна котушка (ПК) і надпровідний квантовий Інтерференційний перетворювач (НКІП) знаходяться у кріостаті 2 при температурах рідкого гелію, кисню або азоту, а електронна схема керування і обробки - при температурі оточуючого середовища [1-3].

Серед відомих способів вимірювання напруженості магнітного поля найбільш близьким за технічним змістом є здійснення прийому магнітного поля ПК, модуляції і зворотнього зв'язку відповідною котушкою, квантування електричного сигналу та його попереднього підсилення у трансформаторі [4]. Усі перелічені дії здійснюються у кріостаті, де забезпечуються умови надпровідного стану усіх згаданих елементів. Подальша обробка електричного сигналу проводиться у звичайних умовах.

З відомих пристроїв найбільш близьким за технічною суттю є індукційний магнітометр, що складається з ПК і підімкненої паралельно схеми підсилення сигналу [5].

Проте навіть при застосуванні Інтегральної технології для мікромініатюризації приймальної одно- або трикомпонентної системи котушок не досягається висока мобільність і гнучкість приймача надпровідного магнітометра. Це пояснюється тим, що за будь-якої конструкції такого магнітометра, необхідним елементом його приймальної частини є охолоджувальний контур, котрому властиві значні об'єм і маса. Необхідний жорсткий зв'язок між приймальним кільцем і НКІПом 1 з одної сторони та системою забезпечення криогенної температури 2 з іншої (рис. 1).

Задача, що вирішується винаходом, полягає у підвищенні чутливості, покращенні роздільної здатності, а також зменшенні маси та енергоспоживання надпровідного магнітометра.

Поставлена задача в запропонованому способі вирішується тим, що перетворення напруженості магнітного поля в електричну напругу здійснюється за допомогою ПК при температурі оточуючого середовища, а попередню обробку отриманого сигналу проводять в умовах надпровідності.

Поставлена задача в запропонованому пристрої вирішується тим, що у магнітометрі, котрий складається з ПК і підімкненої паралельно схеми обробки сигналу, остання виконана у вигляді надпровідного польового транзистора (НПТ), розташованого у кріостаті і під'єднаного електродами витoku і стоку надпровідного каналу до ПК.

Технічний результат від впровадження описаного способу полягає у можливості використання надпровідної схеми обробки сигналу ПК Індукційного перетворювача магнітного поля, а отже її функціонування у режимі короткого замикання для отримання широкого діапазону частот перетворюваного сигналу.

Технічна задача, що вирішується запропонованим пристроєм полягає у підвищенні чутливості, покращенні роздільної здатності, а також зменшенні маси та енергоспоживання надпровідного магнітометра.

Суть способу полягає в тому, що на відміну від відомих аналогів, у ньому ПК не потребує додаткового охолодження для перетворення напруженості магнітного поля у вимірювану величину і у кріостаті знаходиться тільки надпровідний пристрій попередньої обробки сигналу. Цим досягається покращення роздільної здатності та чутливості при напруженості магнітного поля, отримання більшої гнучкості та мобільності при відборі даних, зменшення маси, габаритів та енергоспоживання завдяки скороченню охолоджуваного об'єму, а також покращення електромагнітної сумісності під час проведення вимірів за рахунок можливості рознесення на значну віддадь ПК і надпровідного пристрою попередньої обробки сигналу. До переваг даного способу слід віднести можливість застосування ПК довільних габаритів, оскільки вони не обмежені розмірами кріостату.

Суть вимірювального пристрою полягає у тому, що порівняно з відовими аналогами у магнітометрі зменшені власні шумові флуктуації схеми попередньої обробки електричного сигналу ПК, завдяки застосуванню НПТ, внаслідок чого підвищена чутливість магнітометра.

Пристрій працює наступним чином.

На ПК діє вимірюване магнітне поле (МП) з напруженістю  $H$ , котра наводить є.р.с.  $E_0$ , пропорційну до частоти МП  $\omega$ . ПК з індуктивністю  $L$  ємністю  $C$  і активним опором  $R$  послідовно з'єднана з витком НПТ [6], котрий використовується як амперметр з нульовим опором, що перетворює струм витку  $I_b$  у напругу затвору  $V_{зс}$  при  $I_b < I_0$ , де

$I_0$  - критичний струм переходу Джозефсона,  $I_b$  - визначається є.р.с.  $E_0$  у виразі

$$I_b = \frac{E_0}{z_k} = \mu_0 \mu_{ef} \omega H N \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

де  $\mu_0$  - магнітна проникність вакууму,  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  
 $\mu_{ef}$  - ефективна магнітна проникність осердя котушки;  
 $N$  - кількість витків ПК;  
 $d$  - середній діаметр ПК;  
 $z_k$  - Імпеданс ПК.

Коефіцієнт перетворення надпровідного Індукційного магнітометра (НІМ), еквівалентна схема котрого подана на рис. 2, із врахуванням виразу (1) виражається

$$\frac{V_{зс}}{H} = \frac{j \omega \mu_0 \mu_{ef} N \pi d^2}{4 \cdot C \cdot z_k \sin \theta} (I_0 - 0.5 I_2),$$

$$I_2 = \frac{\hbar^2 C}{2e} \quad (2)$$

де  $C$  - ємність затвору НПТ;

$\sin \Theta$  - змінна Джозефсона, що визначається впливом напруги затвору,

$\omega_T$  - тісно пов'язана з малосигнальною провідністю НПТ при  $V_{BC} = 0$ .

Для визначення порогу чутливості (ПЧ) НІМ у широкій смузі частот розглянемо його шумову схему (рис. 3). При  $V_{BC} = 0$  вхідний опір НПТ нульовий, а провідність безмежно велика. Якщо знехтувати джерелом шумового струму  $I_{ш}$ , котрий у польовому транзисторі надто малий, то шумова напруга  $E_{ш}$  визначається як

$$E_{ш}^2 = kT \frac{1}{g_{BC}} \gamma_{ш}, \quad (3)$$

де  $\gamma_{ш}$  - відношення кінетичної енергії переходу Джозефсона до термічної енергії;

$I_0$  - критичний струм переходу;  $V_C$  - характеристична напруга.

Згідно з виразами (1) і (3) знаходимо ПЧ НІМ

$$H_{НІМ} = \sqrt[4]{\frac{L_e^2 k T_{НПТ} \gamma_{ш}}{\mu (g_3 - Q_T)} + 4kTR / \mu_0 \mu_{eff} \pi d^2 N \omega} = \sqrt[4]{k T_{НПТ} \gamma_{ш} V_C / I_0 + 4kTR / \mu_0 \mu_{eff} \pi d^2 N \omega} \quad (4)$$

де  $\mu$  - поверхнева рухливість зарядів напівпровідника [6];

$L_e$  - довжина електричного каналу НПТ,

$g_3$  - повний заряд затвору, відбитий у канал,

$Q_T$  - граничний заряд транзистора.

Покращення чутливості пропонованої моделі НІМ у порівнянні з відомими магнітометрами показано на графіку рис. 4. Подані шумові характеристики у широкому частотному діапазоні високочутливих магнітометрів (НКІП та Індукційних перетворювачів (ІП) і розрахований за формулою (4) ПЧ НІМ. Нумерація ліній на графіку відповідає еквівалентному шумовому магнітному потоку вказаних магнітометрів:

1) ІП з параметрами польового транзистора: довжина електричного каналу  $L_e = 4 \mu\text{м}$ , ширина  $W = 400 \mu\text{м}$  і ПК:  $N = 200$ ,  $\mu_{eff} = 10$ ,  $T = 293 \text{ K}$ ,  $d = 15 \text{ мм}$ ,  $R = 30 \text{ Ом}$ ;

2) Інтегрального НКІПу постійного струму, що містить вхідну котушку з 22-х витків, 1 виток модуляційного зворотнього зв'язку і 1 виток ПК, площею  $8 \times 8 \text{ мм}^2$  [5];

3) моделі НІМ, розрахованої згідно виразу (4), з ПК, описаного в пункті 1 і параметрами НПТ:  $Q_T = 0$ ,  $\mu = 1000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $T_{НПТ} = 2 \text{ K}$ ,  $L_e = 100 \text{ нм}$ ,  $W = 100 \mu\text{м}$ ,  $I_0 = 10 \mu\text{А}$ ,  $V_0 = 3 \text{ мВ}$ ,  $\gamma_{ш} = 50$ ;

4) моделі НІМ із масою ПК, що дорівнює масі охолоджуючого дюзару, описаного в [6].

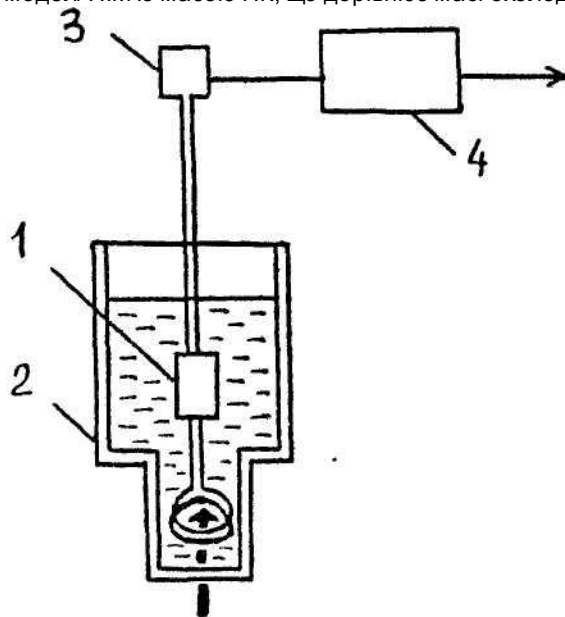


Рис.1

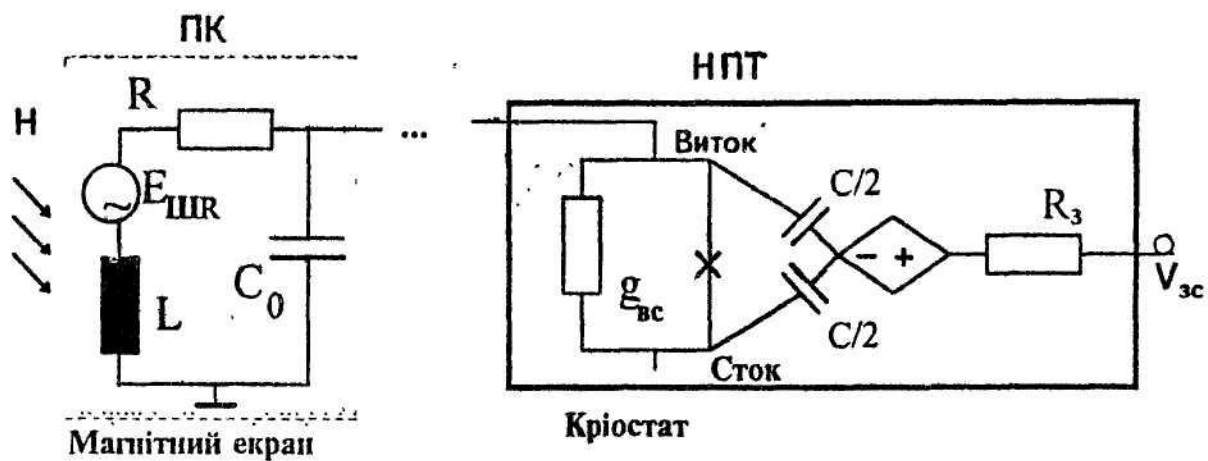


Рис. 2

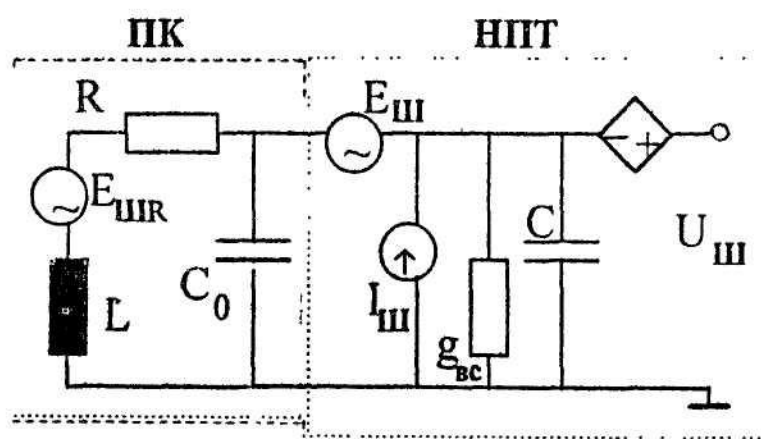


Рис. 3

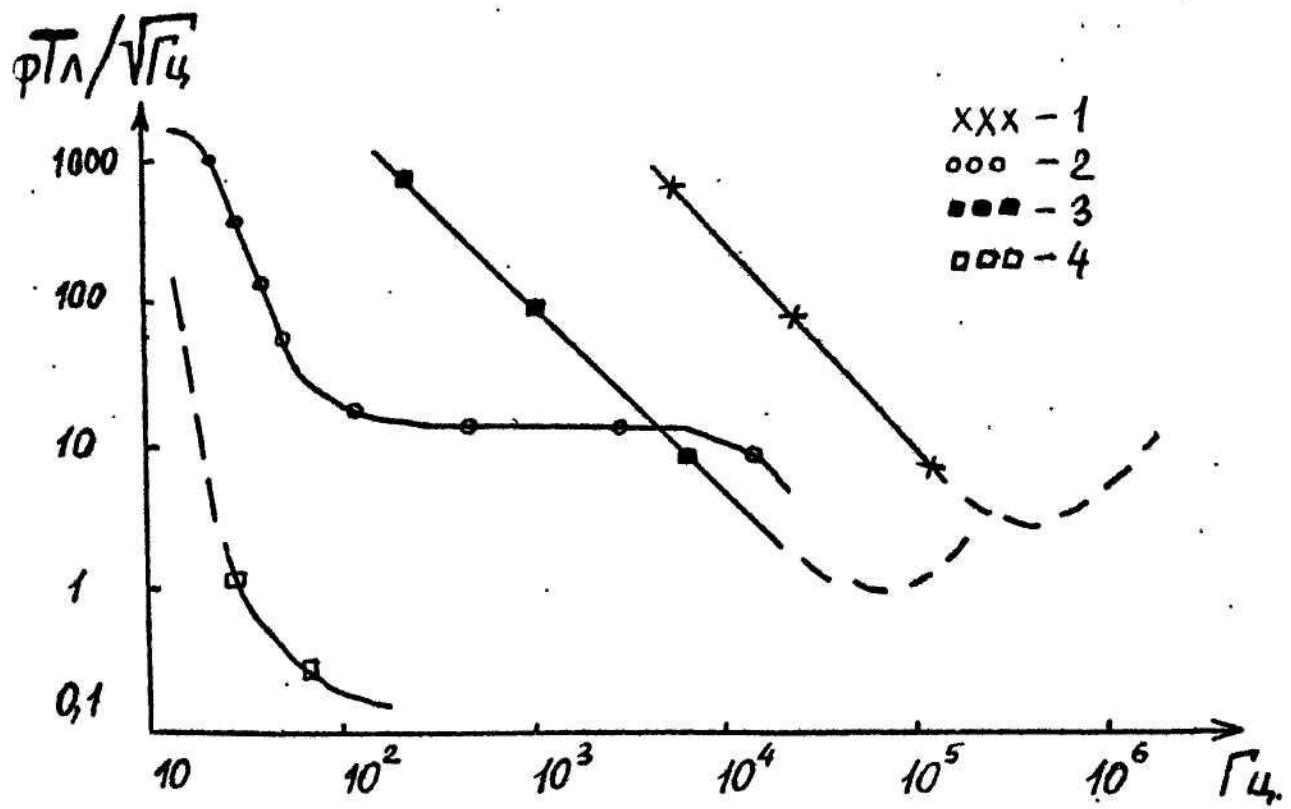


Рис. 4