

ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ ІЗОЛЬОВАНОГО ВИХОРУ АБРИКОСОВА У ЖОРСТКИХ НАДПРОВІДНИКАХ II РОДУ

В. Ф. Русаков, Н. М. Русакова, В. В. Чабаненко

Відомо, що у діапазоні магнітних полів між першим і другим критичними полями ($H_{c1} < H < H_{c2}$) магнітний потік входить у надпровідники II роду у вигляді вихорів Абрикосова, які є основним структурним елементом змішаного стану надпровідника. Електромагнітні властивості надпровідників в значній мірі визначаються рухом вихрової системи. В області магнітних полів, близьких до першого критичного, вихори можна розглядати як ізольовані. Траєкторії вимушених коливань поодиноких вихорів Абрикосова вдалося спостерігати у високотемпературному надпровідному монокристалі $YBa_2Cu_3O_{6,991}$ за допомогою голки магнітного силового мікроскопа [1]. Тут рух вихору, захопленого голкою, модулювався у площині у двох напрямках – коливання уздовж осі Ox і повільна протяжка уздовж осі Oy .

Нами розглянуто рух ізольованого вихору в зовнішньому магнітному полі під дією змінної в площині і загасаючої вглиб зрзка зовнішньої сили $\vec{f}((x, y, z)) = \vec{f}_{0x} e^{-z/\lambda} \cos \omega t + \vec{f}_{0y} e^{-z/\lambda} \sin \Omega t$, ($\Omega \ll \omega$), тут: f_{0x} і f_{0y} – амплітудні значення, ω і Ω – частоти відповідних проекцій зовнішньої сили, λ – глибина проникнення магнітного поля, з урахуванням інертності вихору і всіх сил, що на нього діють у надпровіднику. Рівняння руху в цьому випадку набуває вигляду:

$$\begin{cases} \mu_{eff} \frac{\partial^2 S_x}{\partial t^2} = J_x \frac{\partial^2 S_x}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial S_y}{\partial t} - \eta \frac{\partial S_x}{\partial t} - \beta_x S_x + f_{0x} e^{-z/\lambda} \cos \omega t \\ \mu_{eff} \frac{\partial^2 S_y}{\partial t^2} = J_y \frac{\partial^2 S_y}{\partial z^2} - \alpha \frac{\partial S_x}{\partial t} - \eta \frac{\partial S_y}{\partial t} - \beta_y S_y + f_{0y} e^{-z/\lambda} \sin \Omega t \end{cases}$$

Розв'язок цієї системи і побудова траєкторії вихору дозволяє якісно пояснити результати маніпуляції поодиноким вихором, отримані авторами [1] за допомогою магнітного силового мікроскопа. Параметри розрахунку динаміки вихору обрані для двох класичних надпровідників: анізотропного високотемпературного – $YBaCuO$ і низькотемпературного – $NbTi$. У $YBaCuO$ в геометрії $H||c$ аналіз форми траєкторії вихору в широкому діапазоні частот зовнішньої сили дозволив встановити, наступне. На частотах $\omega \geq 3 \cdot 10^7$ Гц помітні відхилення від стандартної форми для вимушених коливань гармонійного осцилятора пов'язані з впливом пружних властивостей вихору. Показано, що перетворення форми траєкторії від гармонійної на низьких частотах до спіралеподібної при $\omega \sim 10^9$ Гц, пов'язано зі зростанням впливу сили Лоренца. Збільшення сили Лоренца обумовлено зростанням швидкості вихору зі збільшенням частоти зовнішньої сили. Таким чином, в цьому частотному діапазоні траєкторія вихору Абрикосова в основному визначається силою Лоренца і силою пружності. При цьому інертність вихору, сили піннинга і в'язкості на форму і розмір траєкторії практично не впливають. Вплив інертності вихору починає проявлятися на частотах $\omega \sim 2 \cdot 10^{11}$ Гц. Сила в'язкості тут істотно змінює траєкторію при резонансній частоті. Розраховане поглинання енергії вихором, як функція частоти, має два резонансні піки, які відповідають низько- і високочастотній модам спектра коливань. Проаналізовано відмінності в прояві вимушених коливань вихору для різних орієнтацій поля в $YBaCuO$ и для ізотропного низькотемпературного надпровідника $NbTi$.

Література

1. Auslaender O. M., Luan L., Straver E. W. J., Hoffman J. E., et al., *Nature Physics* **5**, 35