

1. Вступ

Сучасна радіоелектроніка досягла такого рівня, коли подальший її розвиток вже починає обумовлюватися принциповими труднощами. Однією з таких труднощів є обмеження чутливості електронних приладів, пов'язане з термодинамічними флуктуаціями, енергія яких на одну коливальну ступінь свободи тіла дорівнює $k_B T$, де k_B – константа Больцмана, T – температура тіла. Чутливість приладів можна збільшити за рахунок охолодження радіоелектронних пристроїв до криогенних температур. В цьому випадку йдеться про нову галузь електроніки – криогенну електроніку. Однак покращення характеристик електронних приладів^{*/} під час їх охолодження – лише один з аспектів криогенної електроніки. Іншим її аспектом, розгляду якого, власне, і присвячений цей посібник, є створення електронних приладів, які працюють на нових фізичних явищах, що проявляються лише при криогенних температурах. Найсуттєвішими серед цих явищ є надпровідність, ефекти Джозефсона, нелінійний імпеданс надпровідників. В посібнику будуть детально розглянуті різноманітні варіанти використання цих явищ в багатьох електронних приладах: підсилювачах та генераторах електромагнітних коливань, вимірювачах параметрів різноманітних фізичних полів, системах стабілізації та ЕОМ.

Варто зауважити, що криогенна електроніка звичайно не єдина галузь застосування явища надпровідності. Зокрема, можна виділити цілу низку галузей застосування цього явища, які надалі ми не будемо розглядати, але які вже сьогодні мають велике науково-технічне значення. Усі вони базуються на двох чудових властивостях надпровідників, а саме: на відсутності опору постійному струму, що дає змогу знизити втрати енергії на підтримання струму в надпровідних обмотках, і на можливості транспортування крізь надпровідник гігантських струмів (до 10^6 А/см², а за теорією – навіть до 10^8 А/см²), що сприяє зменшенню розмірів та ваги криогенних пристроїв. Наведемо декілька важливих прикладів застосування надпровідності.

1. Надпровідні магніти. Сьогодні існують надпровідні магніти, що забезпечують поля ~ 170 кЕ. Діаметр обмотки ~ 5 см. Звичайний магніт з такими ж параметрами споживав би потужність ~ 5 МВт та вимагав би спеціальної системи охолодження. При збільшенні діаметру до 5 м одержано магнітне поле ~ 20 кЕ.

Найбільш широко надпровідні магніти застосовуються у медицині, в магнітних томографах, у фізиці високих енергій, у термоядерному синтезі, МГД- генераторах, під час дослідження магнітних властивостей речовин.

2. Надпровідні кабелі. При транспортуванні великих потужностей постійного та змінного струму надпровідні кабелі виявляються економічно більш вигідними вже при потужностях 3.2-6.5 млн.кВт. Нижня межа потужності відповідає напрузі 440 кВ, верхня – 880 кВ.

3. Надпровідні системи накопичення енергії. Найпростішою надпровідною системою накопичення енергії є надпровідний магніт. Густина магнітної енергії в ньому досягає величини 40 МДж/м³ або 200-400 кг/МДж, що явно більше, ніж у конденсаторів (4000 кг/МДж), хоча і значно менше, ніж у акумуляторних батарей (2 кг/МДж). Найважливіша перевага надпровідних систем накопичення перед акумуляторами – можливість завдяки малому внутрішньому опору виділяти гігантську енергію за короткий час. Накопичувана цими системами енергія сягає ~ 1 ГДж. (ТокамакТ-15, ЦЕРН, Швейцарія).

4. Надпровідні двигуни та генератори змінного та постійного струму. Завдяки великій густині струму в надпровідних обмотках вага електромоторів потужністю більше 100 кВт навіть з урахуванням ваги кріостатів менша ваги звичайних

^{*/} Мова йде не лише про шумові характеристики, а й такі, як затухання в твердотільних лініях затримки, втрати і коефіцієнт перетворення в приладах на сегнетоелектриках і т.ін.

електромоторів тієї ж потужності. Надпровідний турбогенератор потужністю 1 млн. кВт важить втричі менше звичайної машини з однаковою потужністю.

5. Надпровідні трансформатори. Через значні струми і магнітні поля в таких трансформаторах можна видалити залізне осердя, що дає змогу значно збільшити к.к.д. та зменшити вагу і габарити трансформаторів.

6. Надпровідна магнітна підвіска. В основі такої підвіски лежить принцип механічного відштовхування надпровідника від кільця зі струмом. Надпровідна підвіска може бути використана в електромоторах, к.к.д. яких, через незначне тертя, може доходити майже до 100%, а швидкість обертання – до декількох сотен тисяч обертів на хвилину. Дуже перспективним є створення транспортних засобів на такій підвісці. Швидкість потягів на "магнітній подушці" буде перевищувати 500 км/год при майже повній відсутності шуму, що є суттєвою перевагою перед транспортними засобами на "повітряній подушці".

7. Космічний захист. Надпровідні магніти можуть використовуватися на борту космічних кораблів для захисту космонавтів від підвищеної радіації. Наприклад, один із вже існуючих магнітів має діаметр 1.8 м та величину магнітного поля в центрі ~ 15 кЕ.

8. Магнітний екран. Завдяки ефекту Мейснера, постійне магнітне поле не проникає всередину об'єму, який оточує надпровідник^{*/}. Такий магнітний екран буде ефективно працювати до полів, величина яких не перевищує деяке критичне значення H_K .

У наш час найбільш широко використовуються лише надпровідні магніти. Зовсім інша ситуація складається в криогенній електроніці, де низькі температури вже зараз дозволяють створювати десятки типів унікальних приладів, окремі з яких і будуть предметом обговорення в даному посібнику.

^{*/} Всередині цього об'єму існує заморожений магнітний потік, якщо перехід у надпровідний стан було здійснено в присутності магнітного поля.