



УДК 62-115

## НАДПРОВІДНІСТЬ, ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕХНІЦІ

**ІКАЛЬЧИК Ю.М.**

*Студент 1 курсу факультету електроніки*

*Національного технічного університету України «Київського  
політехнічного інституту»*

*Науковий керівник КОРНІЄНКО Є.Г., кандидат фізико-  
математичних наук, старший викладач Національного технічного  
університету України «Київського політехнічного інституту»*

*В даній статті розглянуто явище надпровідності. Наведені приклади  
використання надпровідності в техніці.*

*Надпровідність, перспектива, потужність.*

З часів відкриття надпровідності обговорюються можливості технічного використання цього рідкого явища. Незрозуміла провідність не давала спокою і фізикам, і інженерам. Хотілося якнайшвидше перекопатися в тому, що вона може дати практичні плоди. Але пройшло майже піввіку, перш ніж надпровідність почала виходити зі стін лабораторій на дорогу практичного застосування. Цьому сприяли кілька обставин. Тут і розвиток техніки низьких температур, і поява теоретичних робіт, що пояснили природу надпровідного стану, і відкриття нових квантових ефектів, і, звичайно, створення надпровідних матеріалів з високими критичними параметрами.

Успіхи експериментального і теоретичного досліджень дали реальну можливість приступити до робіт по освоєнню цього чудового фізичного явища. Надпровідність почала як би друге життя, але тепер уже не в якості зацікавленого лабораторного феномена, а як явище, відкриваюче перед наукою і технікою дуже серйозні перспективи.

Найважливіша область техніки, де застосування надпровідників обіцяло зробити великі зміни, визначилася уже в перші роки після відкриття цього явища - це передача електричного струму і створення сильних магнітних полів.

Можна назвати сотні різноманітних фізичних, технічних і чисто інженерних задач, що поєднуються загальною вимогою: для їхнього здійснення потрібні сильні магнітні поля. Але ключі до проблеми створення потрібних магнітів учені довгий час не могли знайти. Здавалося б, що тут складного? Досить пустити сильний струм по витках соленоїда, і він стане потужним магнітом. З тих пір як Ампер з'ясував, що соленоїд поводить себе так само, як і природний магніт, усі сучасні магніти виготовляються по цьому принципу. У



кожному з них є спіраль - обмотка, по якій проходить струм. Чим більша сила струму, тим сильніше магнітне поле.

Електромагніти теоретично не мають межі по своїй "силі" чи інтенсивності (індукції магнітного поля). Але це тільки теоретично. Коли ж за допомогою струму створюють магнітне поле, мають місце два побічних ефекти, що і визначають складності одержання великих полів. По-перше, на елемент проводу довжиною  $l$  і зі струмом  $I$ , що знаходиться в магнітному полі з індукцією  $B$ , діє сила  $F = BI\Delta l \sin\alpha$ , де  $\alpha$  - кут між вектором індукції  $B$  і напрямком струму. Отже, на провід зі струмом будуть діяти сили, пропорційні силі струму й індукції поля, створюваного соленоїдом. Ці сили збільшуються зі збільшенням поля і прагнуть розірвати соленоїд і, крім того, притискають крайні витки до середнього. По-друге, при протіканні струму  $I$  по провіднику з опором  $R$  виділяється потужність  $P = I^2R$ . Ця потужність пропорційна квадрату сили струму  $I^2$ , і, отже, вона буде збільшуватися зі збільшенням індукції створюваного поля. Виходить, якщо підсилити магнітне поле, наприклад, у 10 разів, то необхідно збільшити потужність у 100 разів. Розширення обсягу робочого простору також буде супроводжуватися збільшенням потужності, що виділяється. Звідси виходить, що для живлення одного потужного магніту потрібна ціла електростанція, а для охолодження - водокачка.

Обмотку соленоїда можна зробити із надпровідного матеріалу. Такий соленоїд може працювати, майже не споживаючи електроенергії, оскільки один раз збуджений у ньому струм не загасає. Потрібно тільки підтримувати соленоїд при низькій температурі, а для цього вимагаються дуже малі потужності. Таким чином, експлуатація надпровідних магнітів виключає потребу у великих джерелах споживання. Для споживання годяться звичайні батареї, чи генератори або акумулятори.

Зважається проблема відводу тепла. При нульовому опорі і потужність, що виділяється, рівна нулю. Правда, проблема міцності залишається, тому рекордних полів надпровідні соленоїди не створюють. Але зате вони легші і менші по розмірах, ніж звичайні. У порівнянні з криогенними надпровідні соленоїди вимагають у сотні разів меншої витрати холодоагенту. Так, при індукції магнітного поля 10..15 Тл надпровідний магніт важить усього кілька десятків кілограмів, і із усім стосовним до нього устаткуванням займає площу кілька квадратних метрів і витрачає приблизно 10 л рідкого гелію в добу. І це замість декількох десятків тонн і тисяч кіловат електроенергії, що знадобилися б для роботи не надпровідного магніту з тими ж параметрами.

### **Надпровідні генератори**

Сучасні електрогенератори - великі спорудження, у яких утворюються великі магнітні поля, і з кожним роком їхня потужність зростає. Нажаль, можливості підвищення потужності електричних машин не безмежні. Якби обмотку збудження електричної машини (по суті справи, електромагніт



особливої форми) вдалося зробити з надпровідника, це відразу б вирішило ряд проблем. По-перше, зникло б нагрівання. По-друге, збільшилися би у машині поля і струми, що привело б до різкого скорочення розмірів машини. Так, надпровідний генератор потужністю 1300 МВт мав би близько 10 м у довжину і масу 280 т. Довжина аналогічної машини звичайної конструкції більш 20 м, маса 700 т. Одна тільки маса ротора, наприклад, зменшилась би у 4...5 разів. Адже метал, з якого виготовлений великий ротор, що швидко обертається, працює в дуже напружених умовах, так що зниження маси і розмірів істотно підвищує механічну надійність конструкції. Можна вказати і на ряд визначених економічних переваг: коефіцієнт корисної дії надпровідних машин вищий, ніж у генераторів традиційної конструкції.

Переваги надпровідних машин стають особливо помітними при потужності генератора більш 1000 МВт. Надпровідники знімають з порядку денного проблему "ліміту потужності", даючи фантастичну можливість будівлі генераторів потужністю аж до 20 000 МВт. Роботи, зв'язані зі створенням могутніх і економічних генераторів, ведуться зараз широким фронтом. Перша експериментальна модель такого генератора була побудована ще в 1967 році. Вона мала потужність усього лише 600 Вт. А в 1982 році був випробуваний генератор потужністю вже 20 МВт. Результати цих експериментів дозволили приступити до будівлі надпровідного генератора потужністю 300 МВт.

### **Кабелі для передачі інформації**

З ростом споживаних потужностей усе гострішою стає проблема передачі енергії. Джерела енергії і її споживачів часто розділені величезними відстанями. Як краще передавати енергію?

Сьогодні електроенергія передається споживачам в основному за допомогою повітряних ліній передачі (ЛЕП). Для підвищення ефективності роботи таких ліній є єдиний шлях - подальший підйом напруги. Уже давно існують ЛЕП напругою 1 МВ і вище, коефіцієнт корисної дії таких ліній близький до 95%.

Повітряні лінії найдешевші, але з ними зв'язані безліч проблем. У них б'ють блискавки, вони заважають будівництву, транспорту, радіозв'язку, псує ландшафт, шкодять фауні і людині. Можна, звичайно, передавати енергію по підземних кабелях, але і тут виникає чимало складностей. Приходиться прокладати кілька паралельних віток кабелю, охолоджувати струмонесучі жили кабелю газом, олією чи водою. Кабельна лінія передачі приблизно в 10...15 разів дорожче повітряної при однаковій провідній здатності. І в повітряній, і в кабельній лінії приблизно десята частина енергії губиться при нагріванні струмопровідних жил.

Звичайно ж, дуже заманливим для рішення цієї проблеми є явище надпровідності. Провідник без опору ідеально підходить саме для цієї мети. Перші кроки в цьому напрямку були зроблені ще в 60-х роках. Уже тоді



американець Р. Мак-фи підрахував, що по надпровідному кабелю товщиною в руку можна пропускати всю пікову потужність, що виробляється електростанціями США. Ідея створення надпровідних кабелів зміцнювалася в гострій науковій боротьбі. Необхідно було вирішити, чи буде застосування надпровідників економічно конкурентно здатним в якому-небудь інтервалі напруг. Виконаний ще радянськими інженерами техніко-економічний аналіз показав, що при великій потужності надпровідний кабель є в 2..3 рази дешевшим звичайного, а втрати енергії в ньому скорочені приблизно в 25 разів. Сам по собі надпровідний матеріал набагато дорожчий міді, однак струмонесуча жила виявляється дешевшою. Причина ясна: адже по проводу площею перетину 1 мм<sup>2</sup> можна пропускати не 1...2 А, а 10 кА.

Тут треба відзначити, що в кабелях змінного струму деяка частина енергії все-таки губиться. Справа в тому, що при протіканні змінного струму у надпровідному кабелі з'являється електричний опір. Обумовлено це явище впливом змінного електричного поля на неспарені електрони в надпровіднику. Протягом одного півперіоду струму їхня швидкість наростає від нуля до максимуму і знову падає до нуля, а потім струм змінює напрямок на протилежний, і усе повторюється знову.

Таким чином, струм що йде по надпровіднику витрачає свою енергію на коливальні рухи електронів. Виникаючий опір, хоча він і малий в порівнянні з опором металу в нормальному стані, усе-таки приводить до виділення тепла, і кабель треба охолоджувати.

Основні труднощі, що виникають при прокладанні надпровідного кабелю - тепловий захист надпровідника. Охоронити кабель від великого припливу тепла ззовні можна за допомогою вакуумної ізоляції. Кабель має вид багат шарової труби і, по суті, являє собою кріостат. Поперечний переріз такого кабелю схематично показано на рисунку 1.

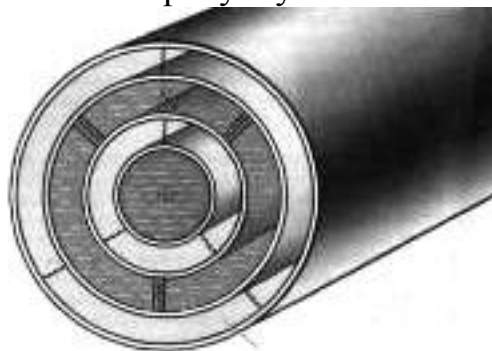


Рис. 1 Поперечний переріз надпровідного кабелю.

Внутрішня труба діаметром близько 70 мм, покрита шаром надпровідного матеріалу товщиною близько 0,3 мм, заповнена рідким гелієм, який женуть по ній насоси. В якості надпровідника може бути використаний, наприклад, сплав ніобію, титана і цирконію. Між першою і другою трубами вакуумна ізоляція, між другою і третьою протікає рідкий азот, між третьою і четвертою (зовнішньою) знову вакуумна ізоляція.



Незважаючи на простоту конструкції, монтаж такої лінії пов'язаний із значними труднощами.

Треба забезпечити герметичність кабелю, навчитися збирати його з окремих коротких відрізків, розробити рефрижератори, компенсатори деформацій і інше устаткування. "Холодні" лінії повинні витримувати перевантаження й аварійні режими, тому важливо удосконалювати і стабілізацію ліній.

### Магнітні підвіси і підшипники

Надпровідна сфера висить над кільцем, у якому циркулює незатухаючий струм. Відбувається це, як ми вже знаємо, завдяки діамagnetизму надпровідників. Сила ваги сфери врівноважується "магнітною подушкою", що створюється надпровідним струмом.

Висіти таким чином, як з'ясувалося, можуть досить важкі предмети.

Ефект механічного відштовхування використовується для створення магнітного підвісу. Найбільш простий варіант такого пристрою схематично зображений на рисунку 3.



Рис. 2 Магнітний підшипник

Надпровідний диск опускається на надпровідну котушку, у якій тече незатухаючий струм. На цьому принципі можна створити різні пристрої, що дозволяють забезпечити стійку підвіску в одному, двох чи трьох напрямках. На рисунку 3.а зображений підшипник, стійкий в одному напрямку, а на рисунку 3.б показано застосування цього принципу підвіски підшипника на всі три напрямки в просторі.

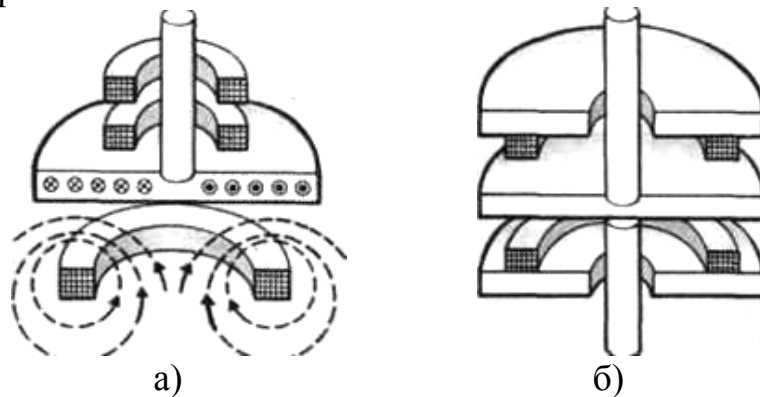


Рис. 3 Надпровідний підвіс.