

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«Харківський політехнічний інститут»



**ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ
НАДПРОВІДНИКІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ
з дисципліни «Перспективи застосування надпровідності
в електромеханіці»

для студентів денної форми навчання
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціалізації «Електричні машини»

Харків – 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«Харківський політехнічний інститут»

**ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ
НАДПРОВІДНИКІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ
з дисципліни «Перспективи застосування надпровідності
в електромеханіці»

для студентів денної форми навчання
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціалізації «Електричні машини»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 2 від 29.06.2021 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2021

Перспективи застосування високотемпературних надпровідників в електротехнічному обладнанні. Методичні вказівки та контрольні завдання з дисципліни «Перспективи застосування надпровідності в електромеханіці» для студентів денної форми навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «Електричні машини» / Укладачі: Шевченко В. В., Шайда В. П., Шилкова Л. В. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 36 с.

Укладачі: В. В. Шевченко, В. П. Шайда, Л. В. Шилкова

Рецензент проф. О. П. Лазуренко

Кафедра електричних машин

1 ВСТУП

Дисципліна «Перспективи застосування надпровідності в електромеханіці» дозволяє студентам-магістрантам одержати теоретичні знання в галузі надпровідності (НП), теоретичні та практичні знання в області використання низько- та високотемпературних НП для електротехнічного обладнання (електричних машин і трансформаторів). Для вивчення дисципліни необхідні знання з загальних курсів фізики, теоретичних основ електротехніки, електричних машин, технології виготовлення та діагностики електричних машин і трансформаторів, нормативних документів з обслуговування електрообладнання (ЕО).

Під час вивчення дисципліни розглядаються основні положення теорії надпровідності, типи та технологія виготовлення НП; теорій, що пояснюють механізм надпровідності; досягнення світової науки і практики в створенні НП різних типів; технології виготовлення НП; області використання НП різних типів в електромеханіці; основні конструктивні рішення і особливості надпровідникових елементів електрообладнання, турбогенераторів (ТГ) та інших типів електричних машин;

Методичні вказівки містять контрольні питання до розділів курсу «Перспективи застосування надпровідності в електромеханіці», назви тем індивідуальних завдань, методичні вказівки і теоретичні дані, які можна використовувати для виконання цих завдань, а також перелік літературних джерел, необхідних для вивчення дисципліни та виконання роботи.

У методичних вказівках та в контрольних завданнях використовуються скорочення: **ЕМ** – електрична машина; **ЕО** – електрообладнання; **НП** – надпровідник; **НТНП** – низькотемпературний надпровідник; **ВТНП** – високотемпературний надпровідник; **БКШ** – теорія надпровідності Бардіна – Купера – Шріффера (теорія куперівських пар); **ТГ** – турбогенератор.

Навчальним планом дисципліни «Перспективи застосування надпровідності в електромеханіці» передбачені лекції та самостійна робота з виконання індивідуального завдання. Вивчення курсу закінчується заліком. При виконанні контрольного завдання з дисципліни «Перспективи застосування надпровідності в електромеханіці» потрібно в письмовому вигляді виконати завдання відповідно до варіанта, який для студентів денного навчання слід вибрати за номером у списку журналу академічної групи, а для студентів заочної форми – згідно шифру з залікової книжки. Приклад оформлення титульного аркуша завдань наведено в Додатку А.

2 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛІНИ

В процесі вивчення дисципліни слід опанувати такі теми:

Змістовий модуль № 1. Основи теорії надпровідності.

Історія відкриття надпровідності. Засоби вимірювання низьких температур. Класифікація надпровідників (НП). Типи НП, основні технічні характеристики НП. Низькотемпературні та високотемпературні НП. Надпровідність металів, сплавів та інтерметалічних сполук. Основні ефекти, пов'язані з надпровідністю: нульовий опір, ефект Мейсснера, ізотопічний ефект, квантування магнітного потоку. Ефект Джозефсона. НП 1-го та 2-го роду. Пояснення ефекту Мейсснера в теорії Лондонів. Лондонська глибина проникнення.

Теорія ідеального діамagnetизму. Ефект Мейсснера. Вихорі Абрикосова. Теорія куперівських пар Бардіна – Купера – Шріффера (теорія БКШ). Вплив теорії БКШ на практичне використання НП в електротехнічних установках. Феноменологічна теорія НП-сті Гінзбурга — Ландау. Квантова левітація в НП-ках. Характерні довжини в теорії Гінзбурга — Ландау. Квантування магнітного потоку. Верхнє критичне поле в теорії Гінзбурга — Ландау.

Змістовий модуль № 2. Конструктивні рішення і особливості напровідникових елементів електрообладнання

Охолодження електротехнічного обладнання. Класи нагрівостійкості ізоляції. Допустима температура нагріву окремих частин електричних машин (ЕМ). Системи охолодження ЕМ. Технології виготовлення НП. Основні положення технології виготовлення високотемпературних надпровідників (ВТНП). Конструкційні метали і сплави, які можна використовувати при низьких температурах.

Змістовий модуль № 3. Використання низькотемпературної (НТНП) та високотемпературної надпровідності (ВТНП) в електротехнічних установках

Типи НТНП та технологія отримання НТНП. Вплив зовнішніх факторів на властивості НТНП матеріалів. Використання НТНП в електротехнічному устаткуванні. Проблеми практичного використання НТНП в електротехніці.

Типи ВТНП та наукові основи високотемпературної надпровідності. Історія відкриття ВТНП. Вплив зовнішніх факторів на властивості ВТНП матеріалів: вплив магнітного поля, сили і частоти струму. Технології отримання, області використання, недоліки і переваги напровідникових елементів з використанням ВТНП. Використання ВТНП в електротехнічних установках. Перспективні області використання ВТНП для електромеханічних систем. Особливості конструкції та

обслуговування ВТНП трансформаторів та напровідникових кабелів з надпровідниковими обмотками. Порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик «теплих» турбогенераторів, кріотурбогенераторів та ТГ з НП обмотками.

Надпровідні соленоїди. Магнітні підвіски з надпровідниковими соленоїдами для електротранспорту. Надпровідні кабелі. Надпровідна електроніка.

3 КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Підготуйте індивідуальну наукову роботу згідно з номером варіанта з табл. 1.

Таблиця 1 – Назва тем завдання

Варіант	Назва контрольних питань
1	Історія появи і розвитку надпровідності. Області і приклади використання низько- та високотемпературних надпровідників
2	Типи НП, основні технічні характеристики НП I–II роду. Основні фізико-технічні характеристики НП. Області використання НП в електротехнічних установках.
3	Теорії надпровідності (теорія куперівських пар Бардіна – Купера – Шріффера і феноменологічна теорія Гінзбурга – Ландау). Переваги та недоліки цих теорій, їх вплив на практичне впровадження надпровідників в електроенергетику.
4	Особливості конструкцій НП і кріогенних турбогенераторів (ТГ). Засоби кріостатування окремих елементів НП турбогенераторів.
5	ВТНП. Основні фізико-технічні характеристики та технологія отримання ВТНП. Використання ВТНП в електротехнічних установках.
6	Основні види технологій виготовлення ВТНП. Перспективи використання ВТНП в електроенергетиці для турбогенераторів та іншого обладнання.
7	Особливості конструкції та обслуговування ВТНП трансформаторів. Засоби кріостатування ВТНП трансформаторів
8	Особливості конструкції та обслуговування ВТНП та кріогенних ТГ. Засоби кріостатування кріогенних ТГ.
9	Особливості конструкції та обслуговування, практичне використання кабелів з НП обмотками
10	Практичне використання надпровідних соленоїдів, їх конструкція, особливості обслуговування.

Продовження табл. 1

Варіант	Назва контрольних питань
11	Практичне використання надпровідності в силовій електроніці.
12	Історія відкриття ВТНП. Технології отримання ВТНП матеріалів. Вплив зовнішніх факторів на властивості ВТНП матеріалів.
13	Дослідження впливу магнітного поля, сили і частоти струму на властивості ВТНП матеріалів
14	Системи охолодження електричних машин. Конструкції кріостатів для електротехнічного обладнання.

4 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ (ТЕОРЕТИЧНІ ДОДАТКИ) ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

4.1 Історія і загальні положення теорії надпровідності.

Основи теорії надпровідності

Сучасний стан електроенергетики і відповідно всіх галузей промисловості, транспорту вимагає негайного впровадження енергозберігаючих технологій: потреба в електроенергії безперервно зростає, а класичні природні джерела палива для теплових електростанцій на межі повного виробітку (вугілля, газ, нафта, торф). Атомна енергетика для України найбільш перспективна, але також має серйозні проблеми – зберігання відпрацьованих відходів. Це загальна проблема для всього світу. Тому безупинно йде дослідження і втілення нових, відновлюємих джерел енергії: сонячна і вітроенергетика, енергія гейзерів, припливів, морських і океанічних течій, біоенергетика та ін. Крім того, десята частина всієї виробленої у світі електроенергії пропадає марно, йде на нагрів мідних і алюмінієвих проводів, кабелів, шинопроводів. Тим часом вже більш 100 років відомо, як уникнути цих втрат: слід використовувати НП, що мають нульовий опір і електричний струм, збуджений в кільці з НП матеріалу, здатний роками текти без зовнішнього підживлення. Сучасні промислові електроустановки з НТНП потребують охолодження рідким гелієм ($T_{critHe} = 4,2$ К) під азотної «сорочкою» ($T_{critN} = 77,3$ К), що необхідно для захисту самого гелію. Це нерентабельно через високу вартість і складності системи заохолодження. Тому завжди йшов пошук ВТНП матеріалів, які стають надпровідниками при охолодженні тільки рідким азотом.

Таким чином, можна зробити висновки:

1) застосування НП і криогенних режимів експлуатації ЕО – один з найбільш перспективних напрямків розвитку електротехнічних пристроїв і, в першу чергу, електричних машин (ЕМ);

2) до теперішнього часу немає остаточно сформованої фізичної теорії, що пояснює надпровідність і, в першу чергу допоможе цілеспрямовано отримувати нові ВТНП;

3) важливим напрямком практичної НП є розвиток існуючих та створення нових технологій виготовлення надпровідників;

4) найбільший економічний ефект слід очікувати від використання НП в електромашинобудуванні при виготовленні крупних ЕМ. Вочевидь, що доцільно використовувати явище НП або криогенного охолодження провідників для всього комплексу обладнання, що входить у систему забезпечення роботи електричного двигуна або генератора: струмопроводів, трансформаторів, кабелів і та ін.;

5) серед найближчих технічних завдань, що входять у коло робіт щодо практичного використання надпровідників, є встановлення областей застосування криогенного або надпровідникового електрообладнання.

Історія появи надпровідності. 10 липня 1908 р. в Лейденському університеті, великий голландський фізик Хейке Камерлінг-Оннес (1853–1926) вперше зумів зрідити гелій (He) і таким чином відкрив абсолютно нову главу в галузі фізики низьких температур. 28 квітня і 23 травня 1911 р. у доповіді в Нідерландської королівської академії наук і мистецтв Камерлінг-Оннес повідомив про можливість існування нульового опору або, як він назвав, «надпровідності». Камерлінг-Оннес показав, що перехід металу у надпровідний стан залежить від його хімічної і фізичної чистоти. Надпровідний стан матеріалу обмежується областями критичних значень температури (T_{crit}) і напруженості магнітного поля (H_{crit}).

Повсюдне впровадження НП у промисловість поки обмежується складною і дорогою технологією їх виготовлення. Але останні кілька років ціни на НП впали в 7–8 разів, причому експерти прогнозують подальше зниження.

З кінця 90-х років ХХ століття почалися спроби промислового використання НП в різних галузях. Наприклад, позитивним прикладом можна вважати підведення електроенергії НП кабелем до одного з кварталів Детройта (США), що працює вже декілька десятиріч.

За оцінками Світового банку, вже через десять років ринок надпровідникового електротехнічного обладнання становитиме 270 мільярдів USD, а через двадцять років він перевищить 240 млрд. USD, рис. 1. Планувалось, що до 2020 р. обсяг

продаж цього обладнання у всьому світі збільшиться з 1,7 до 244 мільярдів USD. Мирова економічна криза, пандемія COVID-19 заставили переглянути цей прогноз.

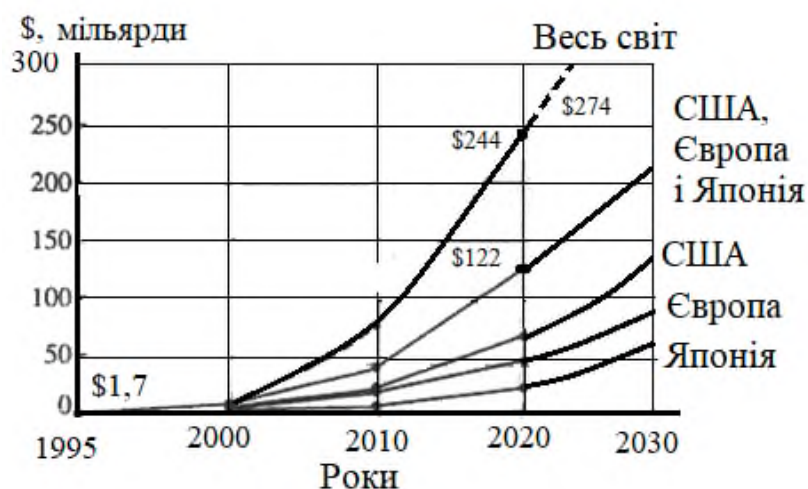


Рисунок 1 – Проект розвитку ринку електротехнічного обладнання з надпровідними обмотками за прогнозом Світового банку

Очікується, що процес входження НП обладнання в промисловість буде еволюційним, але з помітною швидкістю наростання. Особливо перспективне використання високотемпературних НП: для корабельних двигунів і для двигунів підводних човнів, для зброї направленої дії, для генераторів і накопичувачів електроенергії, для резонаторів, магнітів, електромагнітних екранів, датчиків, магнітометрів, мікропроцесорів, комп'ютерів і мікроелектронних СВЧ-пристроїв, для генераторів вітроенергетичних установок та ін.

Надзвичайно широкий спектр застосування ВТНП матеріалів обумовлений:

1) відсутністю втрат на постійному струмі і невеликими втратами на змінному, можливе екранування магнітних полів;

2) можливістю передачі сигналів з мінімальними спотвореннями, а також виконання аналогових і цифрових функцій при 1000-кратному зменшенні потужності розсіювання, при 10–20-кратному підвищенні швидкодії в порівнянні з сучасними приладами.

Найбільший інтерес для зниження втрат в енергосистемах має використання досягнень НП для електромашинобудування, як найбільш енергоємної галузі. Електромашинобудування має величезну кількість встановлених одиниць обладнання, в яких спостерігаються значні втрати. Широке застосування НП для електротехнічного обладнання при генерації електроенергії, при її транспортуванні та

споживанні дозволить підвищити енергозбереження на 5–7 %, а отже практично на цю величину скоротити споживання первинних енергоносіїв (органічного палива).

4.2 Теорії, що пояснюють надпровідність

4.2.1 Основні історичні етапи, загальні положення теорії НП

Температура T_{crit} , при якій відбувається перехід в НП-ний стан, називається критичною температурою переходу. Для талію, олова та свинцю вона дорівнює відповідно 2,35 К, 3,73 К і 7,19 К. У наступні десятиліття надпровідність була виявлена в багатьох металах, сплавах і з'єднаннях: у 1941 р. при 16 К була виявлена НП-сть в ніобій-нітриді, в 1953 році при 17,5 К – у ванадій-кремнії. У 1962 р. вчені фірми *Westinghouse* розробили перший комерційний НП-ний провід зі сплаву ніобію і титану (Nb_3Ti).

У 1933 р. В. Мейсснер і Р. Оксенфельд доказали, що НП одночасно є ідеальними діамагнетиками, тобто повністю виштовхують магнітне поле з об'єму НП (ефект Мейсснера). У 1960-х роках в лабораторії *Appleton* у Великобританії були створені НП електромагніти з обмоткою з мідного дроту в Nb_3Ti оболонці для прискорювача частинок. У 1987 р. в м. Теватрон, (лабораторія Фермі, США), групою вчених під керівництвом Ернеста Резерфорда був створений перший прискорювач з НТНП соленоїдами – елементами, що створюють потужні магнітні поля в прискорюваче. Це поклало початок практичного застосування надпровідності. Однак на шляху до втілення надпровідності в промисловість, електроенергетику і т. ін. тривалий час існувала непереборна перешкода – вкрай низька температура переходу в надпровідний стан (T_{crit}). За 75 років, що минули з часу відкриття Х. Камерлінг-Оннесом надпровідності, цю температуру вдалося підняти лише до 23,2 К в інтерметалоїді Nb_3Ge , причому загальноновизнана теорія надпровідності (теорія Бардіна–Купера–Шріффера, теорія БКШ) породжували невіру в принципову можливість подолання цього температурного бар'єру. Але вже у 1986 р. Беднорц Й.Г. і Мюллер К.А. виявили здатність кераміки на основі оксидів міді, лантану і барію ($La_{2-x}Ba_xCuO_4$) переходити в НП-ний стан при температурі більше 30 К. Аналогічні складні купрати були синтезовані в 1978 р. На жаль, електропровідність цих зразків була виміряна лише до температури кипіння азоту (77 К), що не дозволило виявити ефект ВТНП. Найважливішим досягненням відкриття ВТНП можна вважати те, що НП була виявлена не в традиційних інтерметалідах, в органічних або в полімерних структурах, а в оксидних кераміках, які зазвичай проявляють діелектричні

властивості. Це дозволило створити нові, більш досконалі покоління метало-оксидних ВТНП майже одночасно в США, Японії, Китаї, в Росії та в деяких інших країнах:

1) лютий 1987 р. – вчений Пол Чу та інші (Техаський центра надпровідності при Університеті Техаса) синтезували надпровідну кераміку з оксидів барію, ітрію і міді $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ з $T_{crit} = 93$ К, тобто вище точки кипіння азоту, використовуючи ідею «хімічного стиснення» для модифікування структури. Це відкриття наблизило вчених до мрії про надпровідність при кімнатній температурі та при тиску навколишнього середовища, що поки доступне тільки для водневих сполук під вкрай високим тиском;

2) у січні 1988 р. вчений Джон Маєда синтезував серію з'єднань $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{x-1}\text{Cu}_x\text{O}_{2x+4}$, серед яких фаза при $x = 3$ має $T_{crit} = 108$ К;

3) в лютому 1988р. вчені Шенг Л. і Херман Ш. отримали надпровідник $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ з $T_{crit} = 125$ К;

4) в 1993 р. вчені Антипів Є.В., Путілін С.Н. та ін. відкрили декілька ртуть-вмисних надпровідників зі складом $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{x-1}\text{Cu}_x\text{O}_{2x+2+d}$ ($x = 1-6$). Натепер сполука $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8+d$ (Hg-1223) має найбільше відоме значення критичної температури ($T_{crit} = 135$ К), причому при зовнішньому тиску $35 \cdot 10^4$ атмосфер температура переходу зростає до 164 К, що лише на 19 К поступається мінімальній температурі, зареєстрованої в природних умовах на поверхні Землі.

Таким чином, НП-ки «хімічно еволюціонували», пройшовши шлях від металеві ртуті (4,2 К) до ртуть-вмисних ВТНП (164 К).

До 1999 р. було відомо більше 50 ВТНП купратів. Час від часу в пресі з'являються повідомлення про створення нових НП з T_{crit} вище кімнатної температури.

І хоча НП без міді відомі досить давно, на них досі не вдавалося досягти високої температури переходу в надпровідний стан (рекордні значення T_{crit} для НП без міді досягнуті в $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ і у з'єднаннях на основі фулерену (C_{60})).

4.2.2 Надпровідники 1-го і 2-го роду

Надпровідність – це нульовий опір речовини, що супроводжується ідеальним діаманетизмом, який полягає у виштовхуванні магнітного поля з об'єму речовини. Але магнітне поле все-таки проникає в НП, но глибина цього проникнення надзвичайно мала і становить близько 100 нм. У такому тонкому шарі збуджуються незгадані струми, які допомагають НП екранувати зовнішнє магнітне поле і не давати йому заходити глибше в матеріал. У цьому і полягає причина ідеального

діамагнетизму або, як це явище називають, ефекту Мейсснера – Оксенфельда. Стан ідеального діамагнетизму в НП у науковій літературі називають також мейсснерівським, а надпровідні струми, що екранують, – мейсснерівськими. Залежно від поведінки НП у магнітному полі розрізняють НП 1-го і 2-го роду.

НП 1-го роду мають ідеальні властивості: у присутності магнітного поля в поверхневому шарі в НП виникають струми, які повністю компенсують зовнішнє поле в товщі зразка. Якщо НП має форму довгого циліндра і знаходиться в полі, паралельному його осі, то глибина проникнення може бути близько $3 \cdot 10^{-8}$ м. При досягненні критичного значення магнітного поля надпровідність зникає, і поле повністю проникає в середину матеріалу. Критичні поля для НП 1-го роду лежать у межах від 0,001 до 0,008 Тл. Хоча у НП 1-го роду глибина проникнення мала, вони мають велику довжину когерентності – порядку 10^{-4} см.

Примітка: Когерентність (узгодженість) декількох коливальних або хвильових процесів в часі, що виявляється при їх складанні. Коливання когерентні, якщо різниця їх фаз постійна в часі, і при складанні коливань виходить коливання тієї ж частоти. Довжина когерентності — характеристика хвилі, відстань, на якій вона зберігає когерентність. На відстанях, більших від довжини когерентності, здатність хвилі до інтерференції втрачається. Довжина когерентності має важливе значення в оптиці, наприклад, у голографії, у квантовій механіці та в інших галузях фізики й техніки, в яких використовується здатність хвиль утворювати інтерференційну картину.

До НП належить біля половини металів (наприклад, Al з $T_{crit} = 1,2$ К; Pb з $T_{crit} = 7,2$ К) та декілька сотень сплавів (наприклад, Ni-Ti з $T_{crit} \approx 9,8$ К), у тому числі інтерметалічні сполуки (наприклад, Nb₃Ge с $T_{crit} \approx 23$ К).

Якщо зафіксувати температуру і почати збільшувати індукцію магнітного поля B_K або силу струму, надпровідність стрибком перестає існувати, так як мейсснерівські струми вже не здатні захистити НП від входу зовнішнього поля. У підсумку речовина з НП стану переходить у нормальний стан. НП, які поведуться таким чином, називають НП 1-го роду.

До НП 1-го роду відносяться всі чисті метали з критичними температурами переходу біля 4,2 К. Низькі значення НК у надпровідниках 1-го роду істотно обмежують щільність струму, що перешкоджає їх практичному використанню. Тому більшість чистих металів для електротехнічних цілей застосувати не вдається. Ще деякі елементи проявляють надпровідні властивості при високому тиску: кремній, германій, селен, телур, сурма та ін. До НП 1-го роду також належать деякі бінарні сплави. Значення НК для НП 1-го роду зазвичай не перевищує 7 А/м.

НП 2-го – це надпровідникові матеріали, що становлять один з двох класів, на які поділяються всі НП в залежності від поведінки в магнітному полі. НП 2-го роду характеризуються більшою глибиною проникнення (близько $2 \cdot 10^{-7}$ м) і малою довжиною когерентності ($5 \cdot 10^{-9}$ м). У присутності слабкого магнітного поля (менше 0,005 Тл) весь магнітний потік виштовхується з НП 2-го роду. Але вище H_{K1} (перше критичне поле) магнітний потік проникає в зразок, хоча і в меншій мірі, ніж у нормальному стані. Це часткове проникнення зберігається до другого критичного поля (H_{K2}), яке може перевищувати 1,0 Тл. При полях, що вище H_{K2} , потік проникає повністю, і речовина стає нормальною.

У НП 2-го роду руйнування надпровідності йде поетапно. Поки індукція магнітного поля не перевищує B_{K1} (нижнє критичне поле), надпровідник – це ідеальний діаманетик, тобто він перебуває в мейснерівському стані.

Коли індукція поля перевищує B_{K1} , надпровідникам енергетично вигідно «впускати» поле в себе у вигляді своєрідних мікроскопічних «ниток» (характерний розмір від 100 нм до 1 мкм), витягнутих уздовж силових ліній зовнішнього поля (рис. 2).

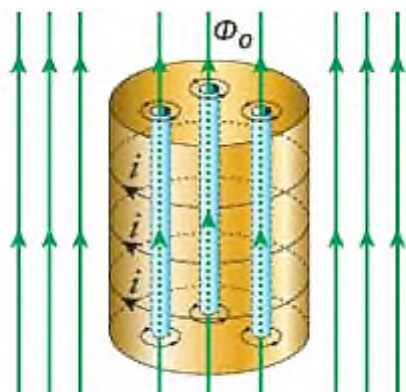


Рисунок 2 – Магнітне поле проникає в НП 2-го роду у вигляді квантових вихорів (вихорів Абрикосова), оточених циркулюючими струмами

Чим більша індукція поля, тим більше цих «ниток» буде в надпровіднику. При великому збільшенні ці «нитки» являють собою вихори, ядра яких не надпровідні («нормальні»), а навколо них циркулюють надпровідникові струми, які екранують нормальну область вихору. Вихори формуються в НП 2-го роду не випадковим чином, а утворюють однорідну трикутну вихорову решітку. Простір між вихорами є надпровідним. По ньому протікають мейснерівські струми, що екранують.

Вихори є квантовими об'єктами, оскільки містять одну силову лінію зовнішнього магнітного поля – квант магнітного потоку, $\text{Тл} \cdot \text{м}^2$:

$$\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15}.$$

Часто їх називають вихорами Абрикосова за прізвиськом вченого Олексія Абрикосова, який передбачив в 1957 р. їх існування. Він довів, що вихори повинні вибудовуватися у трикутну решітку. Тому трикутна конфігурація вихорів в НП отримала назву «решітка Абрикосова».

Можна вважати, що НП-ки 1-го і 2-го роду відрізняються наявністю вихорів.

У НП-ках 2-го роду взаємодія вихорів носить виключно характер відштовхування, що і призводить до формування вихрової решітки. Вона зникає лише тоді, коли індукція поля стає більше B_{K2} . Тоді вихорів стає так багато, що їх нормальні ядра перекриваються і з'являється нормальна ділянка. При досягненні магнітним полем величини H_{K1} починається проникнення магнітного поля в надпровідник, і електрони під впливом сили Лоренца починають рухатися по колу. Виникають вихрові «нитки». Стовбур «нитки» залишається нормальним, навколо нього рухаються електрони, забезпечуючи надпровідність. У результаті матеріал володіє надпровідною і нормальною провідністю. Тобто в таких надпровідниках струми не «вичавлюються» на поверхню зразка, а утворюють циліндричні канали, що пронизують весь об'єм.

У присутності електричного струму на «вихор» діє сила Лоренца. Якщо вихори не закріплені на дефектах або неоднорідностях матеріалу, то вони починають рухатися, в результаті чого індуктується електричне поле і відбувається дисипація енергії. У цьому випадку критичний струм дорівнює нулю. Якщо зразок не знаходиться в зовнішньому магнітному полі, то критичний струм збігається зі струмом, що створює на поверхні зразка магнітне поле, і починають утворюватися вихори. Якщо ж вихори закріплені на неоднорідностях матеріалу (пінінг), то критичний струм визначається рівністю сили Лоренца і сили пінінга, що утримує вихор. Неоднорідності матеріалу можна створювати штучно, підвищуючи критичний струм пінінга. Матеріали з великим критичним струмом пінінгу (до 10^5 А·см) називають «жорсткими» НП. Такі матеріали використовуються для виготовлення сильних надпровідникових магнітів.

Надпровідники 2 роду переходять в надпровідний стан не стрибкоподібно, як НП 1-го роду, а в деякому інтервалі температур. Значення T_{crit} і H_K у них більше, ніж у НП 1-го роду. Відповідно для НП 2-го роду розрізняють нижнє критичне поле H_{K1} та верхнє критичне значення поля H_{K2} . При зростанні магнітного поля і досягненні більш високих значень H_{K2} вихорі, розширюючись, зближуються і надпровідний стан руйнується, магнітне поле повністю проникає в об'єм надпровідника. Значення H_{K2} для таких НП, як Nb_3Sn і $PbMo_6S$, становлять величину порядку 10^5 еВ. Досить сильні магнітні поля, які здатні витримувати ці НП, дозволяють використовувати їх у різного типу пристроях для створення сильного магнітного поля: в системах магнітної підвіски транспортних засобів, в пристроях утримання плазми в термоядерних реакторах та ін. Всі інтерметалічні сполуки і сплави відносяться до НП 2-го роду.

Надпровідний стан можна зруйнувати, не тільки нагріваючи матеріал вище критичної температури T_{crit} , але і помістивши його в магнітне поле з індукцією вище критичного значення B_K . При цьому межа розділу нормальної і НП фаз має негативну енергію, на відміну від НП 1-го роду, де ця енергія позитивна. При досить великому магнітному полі (вище H_K) НП 2-го роду розбиваються на велику кількість нормальних і НП областей, причому нормальні області несуть квантоване значення магнітного потоку.

Однак поділ речовин по їх властивостям на два види не є абсолютним. Будь який НП 1-го роду можна перетворити в НП 2-го роду, якщо створити в ньому достатню концентрацію дефектів кристалічної решітки. Наприклад, у чистого олова $T_{crit} = 3,7$ К, але якщо створити в олові неоднорідну механічну деформацію, то T_{crit} зросте до 9 К, а критична напруженість магнітного поля збільшиться в 70 разів.

4.2.3 Теорія БКШ

Теорія Бардіна — Купера — Шріффера (теорія БКШ) — мікроскопічна теорія надпровідності. Вона вперше дала якісне пояснення відсутності опору надпровідників при низьких температурах, виходячи з квантових властивостей руху електронів провідності в кристалічній решітці. Теорію БКШ побудували в 1957 році Джон Бардін, Леон Купер та Джон Роберт Шріффер, за що отримали Нобелівську премію з фізики за 1972 рік.

Теорія виходить із припущення, що між електронами з енергіями близькими до енергії Фермі існує притягання. Природа цього притягання власне для теорії БКШ не суттєва, головне, щоб таке притягання існувало. Тим не менше, причиною такого притягання для низькотемпературних надпровідників є утворення куперівських пар. Тобто, згідно з теорією БКШ, виникнення надпровідності обумовлено об'єднанням електронів провідності в «куперівські пари». Взагалі, електрони, як однойменно заряджені частинки, повинні відштовхуватися, однак при температурі нижче критичної ці частинки починають обмінюватися квантами коливального руху іонів кристалічної решітки речовини – фононами. Ця взаємодія, що зветься електрон-фононою, носить характер тяжіння і з надлишком компенсує електростатичне відштовхування. Притягання призводить до появи енергетичної щілини в спектрі елементарних збуджень кристалу над рівнем електрохімічного потенціалу. Існування такої щілини призводить до того, що для розриву куперівської пари потрібно затратити скінченну енергію, а при низьких температурах тепловий рух не може надати парі електронів такої енергії. Об'єднання в пари дозволяє електронам провідності синхронно вести себе при накладанні електричного поля і без втрати

енергії рухатися через кристалічну решітку речовини. Тому куперівська пара рухається в кристалі, не розсіюючись ні на коливаннях кристалічної решітки, ні на домішках, що пояснює ефект надпровідності. Так і виникає одна з ознак надпровідності – нульовий опір, або, що те ж саме, нескінченна провідність.

4.2.4. Ідеальний діаманетизм в надпровідниках

Крім нульового опору ще одною ознакою надпровідності є ідеальний діаманетизм. Досягається це абсолютне «неприйняття» магнітного поля за рахунок його екранування за допомогою незатухаючих струмів, що циркулюють по поверхні надпровідника. Товщина шару, на яку ці циркулюючі струми проникають всередину НП, має назву «лондонівська глибина проникнення магнітного поля» λ . Як і довжина когерентності, ця характеристика унікальна для кожного надпровідника і змінюється від декількох десятків нанометрів до значень порядку мікрметра при температурі біля абсолютного нуля.

У 2001 р. колектив японських учених виявив надпровідність у MgB_2 (діборит магнію). Це відкриття привернуло величезну увагу спеціалістів, що займаються вивченням фізики надпровідності. Причини підвищеного інтересу до надпровідності MgB_2 не тільки в його простій хімічній формулі і не тільки в тому, що його T_{crit} досить висока і становить 39 К, але і в особливостях структури MgB_2 в стані надпровідності. Численні експерименти незалежних груп вчених показали, що НП в цій речовині і його висока T_{crit} обумовлені наявністю двох «сортів» куперовських пар, взаємодія між якими забезпечує істотне підвищення критичної температури. Такі НП мають назву «двозонні».

Відкриття двох «сортів» куперівських пар спонукало вчених ще раз дослідити різні явища для надпровідників в надії виявити який-небудь цікавий ефект, який не мав би місця у звичайних надпровідниках з одним видом куперівських пар. І дійсно, в 2004 році Є. Бабаєв і М. Спейт виявили, що механізм впливу магнітного поля на двозонний НП більш складний, ніж на надпровідник 2-го роду. У своїй роботі вони передбачили існування неоднорідної вихрової решітки на певних інтервалах індукції зовнішнього магнітного поля, яка може проявити себе у вигляді утворення вихрових кластерів, щільних скупчень вихорів на обмеженій ділянці поверхні або просто нерівномірний розподіл вихорів. Згідно з розрахунками цих вчених, ці вихрові структури формуються завдяки нелінійної залежності сили взаємодії вихорів від відстані між ними. В ході подальших теоретичних досліджень з'ясувалося, що дана сила є своєрідним аналогом міжмолекулярних сил, що діють між атомами. Тобто вихори в двозонних НП притягуються на великих відстанях (як в НП 1-го

роду) і відштовхуються на малих відстанях (як в НП 2-го роду). Внаслідок такого характеру зміни сил взаємодії можуть виникати незвичайні структури вихрової решітки. Ці матеріали назвали «надпровідники полуторного роду».

У 2006 р з'явилися повідомлення про експериментальне підтвердження наявності в монокристалах MgB_2 надпровідності полуторного роду, існування якої було передбачене теоретиками. Відкриття було зроблено інтернаціональною командою вчених в Льовенському університеті в Бельгії. Експерименти встановили, що поки індукція зовнішнього магнітного поля не перевищує B_{K1} , НП знаходиться в мейснерівському стані, тобто «не впускає» в себе силові лінії магнітного поля. Далі, при індукції 0,0001 Тл, вихори входять в НП, утворюючи не трикутні ґрати, а павутинні. Плавне збільшення індукції магнітного поля до 0,0005 Тл призводить до перетворення павутинної вихрової решітки в смуги, що чергуються з високою і низькою щільністю вихорів. Якщо ж ще посилити зовнішнє поле, то відбудеться ще один перехід і виникають трикутні ґрати вихорів, і MgB_2 поводить себе вже, як НП 2-го роду.

НП 2-го роду, що мають структурні неоднорідності (дефекти ґратів, домішки), називають «жорсткими» НП-ками. Часто «жорсткі» НП 2-го роду виділяють у самостійний клас – НП третього роду. Для цих матеріалів характерно велика кількість дефектів структури (неоднорідності, вакансії, дислокації та ін.), які виникають завдяки спеціальній технології виготовлення, наприклад, при пластичній деформації, протяжці і т. ін. До «жорстких» НП належить велика група сплавів на основі ніобію і ванадію, наприклад, Nb-Ti, V-Ga, Nb-Ge. Тонкі плівки з металів Al, Bi, Nb також є «жорсткими» надпровідниками.

У жорстких надпровідниках рух магнітного потоку утруднений дефектами, а криві намагнічування виявляють сильний гістерезис. Слід зазначити, що в ідеальному НП, повністю позбавленому дефектів (до цього стану можна наблизитися в результаті тривалого відпалу сплаву), при непоздовжній орієнтації поля який завгодно малий струм буде супроводжуватися втратами вже при $H > H_{K1}$. Нижнє критичне поле H_{K1} зазвичай значно менше H_{K2} . Тому саме жорсткі НП, у яких електричний опір практично дорівнює нулю при дуже сильних полях, становлять інтерес з точки зору технічного використання. Наприклад, їх застосовують для виготовлення обмоток НП магнітів. Недоліком жорстких НП є їх крихкість, що сильно затрудняє виготовлення з них дроту або стрічки для обмоток. Особливо це відноситься до сполук типу V_2Ga , Nb_3Sn та ін.

4.2.5. Високотемпературні надпровідники (ВТНП)

У 1986 р. були відкриті ВТНП, у яких T_{crit} вище температури кипіння рідкого азоту ($T_{crit} > 77$ К). До них належать складні сполуки, наприклад, кераміка на основі оксиду міді (у $Tl_2Ca_2Ba_2Cu_3O_{10}$ $T_{crit} = 127$ К) та інші оксидні НП. Оксидні ВТНП є сполуками з іонно-ковалентним зв'язком і з дефектною по кисню перовскітне-подібною кристалічною структурою з упорядкованим розташуванням кисневих вакансій. У 1980–1987 рр. відкриті оксидні ВТНП ($VBa_2Cu_3O_7$ та ін.) з $T_{crit} \geq 100$ К. Сьогодні науці відомі матеріали, що залишаються НП при 160 К.

Всі відомі натеper ВТНП є оксидами, більшість з яких містять мідь, але є такі сполуки без міді. Особливе значення в оксидних ВТНП має киснева підгратка: концентрація, структурне положення і рухливість атомів кисню в кристалічній структурі. Це викликано тим, що з наявністю кисню в оксидних НП пов'язують пояснення нестабільності властивостей ВТНП матеріалів.

ВТНП є основною проблемою для теорії БКШ, тому що ця теорія не пояснює високотемпературну надпровідність. Теорія БКШ залишила без відповіді ще деякі питання: вона не змогла пояснити, чому конкретні НП мають ту або іншу критичну температуру, як маси іонів впливають на між-іонні відстані в решітці, а значить і на значення енергії Фермі. Існують інші теорії, але вони ще в стадії розробки, наприклад, теорія Гінзбурга – Ландау, теорія спінових флуктуацій, біполярна теорія та ін.

4.2.6. Теорія Гінзбурга – Ландау – Абрикосова – Горького (ГЛАГ)

Вже на відносно ранній стадії вивчення НП стало очевидно, що надпровідність є наслідком об'єднання макроскопічного числа електронів провідності в єдиний квантово-механічний стан. Теорія ГЛАГ дає кількісний опис НП 2-го роду, яка є подальшим розвитком теорії Лондонів з прив'язкою до мікроскопічної теорії БКШ. Вище було вказано, що проникнення поля в НП супроводжується зростанням щільності вихорів, що утворюють решітку з відносно великим періодом. При магнітних полях, близьких до другого критичного значення, змішаний стан характеризується правильними двовимірними ґратами Абрикосова. При збільшенні зовнішнього магнітного поля період решітки зменшується, так що при досягненні B_{K2} період зменшується до величини порядку довжини когерентності і надпровідність руйнується. При протіканні транспортного струму від зовнішнього джерела вихорі під дією сили Лоренца зміщуються до фізичної межі НП, що і визначає відносно малу величину критичної щільності струму.

Теорія Гінзбурга–Ландау (*феноменологічна теорія надпровідності*) була створена на початку 1950-х р.р:

$$L = \frac{\hbar^2}{2m} \cdot \nabla\psi \cdot \nabla\psi^* + \alpha \cdot |\psi|^2 \cdot \beta|\psi|^4,$$

де ψ — комплексне (сумісне) поле електронних пар Купера;

∇ — оператор коваріантного диференціювання відносно електромагнітного потенціалу; A ; α та β — емпіричні постійні.

Функціонал вільної енергії:

$$F = F_n + \alpha \cdot |\psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\psi|^4 + \frac{1}{2m} |(-i \cdot \hbar \cdot \nabla - 2e \cdot A) \cdot \psi|^2 + \frac{|H|^2}{2\mu_0},$$

де F_n — вільна енергія в нормальній фазі, Дж;

H — напруженість магнітного поля, А/м.

Варіюючи цій функціонал по ψ і по A , приходимо до рівнянь Гінзбурга-Ландау:

$$\alpha \cdot \psi + \beta \cdot |\psi|^2 \cdot \psi + \frac{1}{2m} \cdot (-i \cdot \hbar \cdot \nabla - 2e \cdot A)^2 \cdot \psi = 0;$$

$$I = \frac{2e}{m} \cdot (\psi^* \cdot (-i \cdot \hbar \cdot \nabla - 2e \cdot A) \cdot \psi),$$

де I — електричний струм, А.

Аналіз рівнянь Гінзбурга-Ландау веде до багатьох цікавих висновків. Одним з них є те, що існують дві характерні довжини в НП:

— перша — це довжина когерентності ξ :

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m \cdot |\alpha|}},$$

яка описує термодинамічні флуктуації в надпровідній фазі;

— друга — глибина проникнення магнітного поля λ , м:

$$\lambda = \sqrt{\frac{m}{4\mu_0 \cdot e^2 \cdot \psi_0^2}},$$

де ψ_0 — це рівноважне значення функції стану за відсутності електромагнітного поля.

Відношення $\chi = \lambda/\xi$ називають параметром Гінзбурга — Ландау.

Відомо, що у НП 1-го роду $\chi < \frac{1}{\sqrt{2}}$, а у НП 2-го роду $\chi > \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Параметр Гінзбурга-Ландау — це мікроскопічний параметр, що характеризує приналежність НП до 1-го або 2-го роду. Це відношення лондонівської глибини проникнення до довжини когерентності:

$$k = \frac{\delta(T)}{\xi(T)},$$

де k – параметр Гінзбурга-Ландау; δ – лондонівська глибина проникнення; ξ – довжина когерентності.

Усі величини залежать від температури T . Параметр Гінзбурга–Ландау можна виразити через коефіцієнт b у рівнянні Гінзбурга-Ландау:

$$k = \frac{m \cdot c \cdot b^{1/2}}{(2\pi)^{1/2} \cdot |e| \cdot \hbar'}$$

де $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг – маса електрона; $c = 300\,000$ км/с – швидкість світла; $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – елементарний електричний заряд електрона; $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – зведена стала Планка.

Теорія НП Гінзбурга—Ландау заснована на теорії фазових переходів другого роду. Відправним пунктом теорії є вираз для вільної енергії F надпровідника, як функціоналу від Ψ – комплексного параметра порядку (після побудови мікроскопічної теорії надпровідності виявилось, що параметр Ψ надпровідного стану в теорії Гінзбурга — Ландау пропорційний хвильовій функції бозе-конденсату куперівських пар електронів в НП або, іншими словами, значенню ширини щілини в енергетичному спектрі електронів НП). Відповідно до теорії Гінзбурга — Ландау, при температурі T_{crit} параметр надпровідного фазового переходу Ψ дорівнює нулю, тому поблизу T_{crit} значення Ψ мало і можна здійснити розкладання вільної енергії F НП в магнітному полі по малому параметру Ψ і його градієнтам.

$$F = F_{n0} + \int \left\{ \frac{B^2}{8\pi} + \frac{\hbar^2}{4m} \left| \left(\nabla - \frac{2i \cdot e}{\hbar \cdot c} \cdot A \right) \cdot \psi \right|^2 + a \cdot |\psi|^2 + \frac{b}{2} \cdot |\psi|^4 \right\} \cdot dV, \quad (1)$$

де F_{n0} – вільна енергія в нормальному стані в відсутності магнітного поля;

m і e – маса і заряд електрона, відповідно;

B і A – індукція і векторний потенціал магнітного поля, Тл і (В·с)/м;

a і b – феноменологічні коефіцієнти:

– якщо $a > 0$, $b > 0$, то a залежить від температури $a = \alpha \cdot (T - T_{crit})$;

– якщо $a < 0$; $b < 0$, то a не залежить від температури.

Інтегрування в (1) ведеться за об'ємом НП-ка. Наявність коефіцієнта «2» в формулі (1) – це наслідок «спарювання» електронів в надпровідникові пари (ефект Купера). Цей коефіцієнт не міг бути визначений феноменологічне і з'явився тільки після створення мікроскопічної теорії НП. В рамках моделі БКШ для чистих металів коефіцієнти a і b відповідно рівні:

$$\alpha = \frac{6\pi^2 T_C}{7\xi(x) \cdot T_F} \approx \frac{7,04 \cdot T_C^*}{T_F}; \quad b = \frac{\alpha \cdot T_C}{n_e},$$

де $\xi(x)$ – функція Рімана; $\xi(s)$ – функція комплексного змінного $s=\sigma +i\cdot t$. При $\sigma >1$, що встановлюється за допомогою ряду Діріхле функція комплексного змінного дорівнює:

$$\xi(s) = \frac{1}{1^s} + \frac{1}{2^s} + \frac{1}{3^s} + \dots;$$

$T_F = \frac{p_F^2}{2m}$ – вироджена температура електронів;

$n_e = \frac{p_F^2}{3\pi^2 \cdot \hbar^3}$ – щільність електронів, або електронна щільність, є

увявленням ймовірності знаходження електрона у певному місці навколо атома чи молекули. Загалом, електрон з більшою ймовірністю можна знайти у районах із високою щільністю електронів. Проте, з принципу невизначеності, неможливо визначити точне місце розташування електрона у часі. Для системи з одним електроном щільність електронів пропорційна квадрату її хвильової функції;

p_F – фермівський імпульс (або функція Фермі):

$$p_F = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k \cdot T}\right) + 1},$$

де E – енергія зовнішнього прикладеного електричного поля;

E_F – енергія зони, заповненої електронами;

$k = 1,380\ 649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; T — абсолютна температура, К.

Просторовий розподіл параметра порядку і магнітного поля в НП визначається мінімізацією вільної енергії за A і комплексно зв'язаними величинами Ψ і Ψ^* (при варіюванні функції $\xi(s)$ параметри Ψ і Ψ^* слід вважати незалежними).

Варіювання (1) по Ψ^* за умови $\delta F = 0$, дає рішення:

$$\frac{1}{4m} \left(-i \cdot \hbar \cdot \nabla - \frac{2e}{c} \cdot A \right)^2 \cdot \psi + a \cdot \psi + b \cdot |\psi|^2 \cdot \psi = 0. \quad (2)$$

Аналогічний вираз отримуємо при варіюванні по Ψ^* .

Варіювання (1) по A приводе до рівняння Максвелла:

$$\text{rot} B = \frac{4\pi}{c} \cdot j,$$

де щільність НП струму j визначається градієнтом фази функції Ψ :

$$j = -\frac{i \cdot e \cdot \hbar}{2m} (\psi^* \cdot \nabla \psi - \psi \cdot \nabla \psi^*) - \frac{2e^2}{m \cdot c} \cdot |\psi|^2 \cdot A. \quad (3)$$

Граничні умови до написаних рівнянь на поверхні НП – це безперервність вектора B за умовою:

$$n \cdot \left(-i \cdot \hbar \cdot \nabla \psi - \frac{2 \cdot e \cdot A \cdot \psi}{c} \right) = 0,$$

де n – нормаль до поверхні, що забезпечує перетворення на нуль нормального до поверхні компонента струму.

Рівняння (2) та (3), які називаються рівняннями Гінзбурга – Ландау, разом з рівняннями Максвелла, дозволяють визначити порядок, параметри розподілу полів і струмів, діамагнітний відгук, поверхневий натяг на межі надпровідної і нормальної фаз та інші характеристики НП. Область застосування теорії Гінзбурга – Ландау задається умовами:

$$\frac{b^2 \cdot T_{crit}}{\alpha \cdot (\hbar^2/m)^3} \ll \left(1 - \frac{T}{T_{crit}} \right) \ll 1; \quad 1 - \frac{T}{T_{crit}} \ll \chi^2. \quad (4)$$

Умова малості величини $(1 - T/T_{crit})$ в (4) відповідає вимогам малості параметра χ і повільності його зміни в просторі, а перша умова в (4) відповідає вимозі малості флуктуації параметра порядку, що зростає з наближенням до точки фазового переходу. Ці нерівності визначають загальні умови використання теорії Ландау для фазових переходів НП 2-го роду.

4.3 Конструктивні рішення і особливості створення напровідникових елементів електрообладнання

Вже доведено, що перспективним є використання напровідникових кабелів, тому що один такий кабель здатний передати потужність, яка зазвичай вимагає використання декількох кабелів великої товщини. Широкому використанню надпровідних кабелів перешкоджає вартість і складність обслуговування (через надпровідні лінії необхідно постійно прокачувати рідкий азот).

Перша комерційна надпровідна лінія електропередачі була запущена в експлуатацію фірмою *American Superconductor* на Лонг-Айленді в Нью-Йорку в 2008 р. В Південній Кореї планували втілити в енергосистему до 2021 року надпровідникові кабелі загальною довжиною 3000 км.

Хоча НТНП відразу не знайшли широке застосування в енергетиці, але щорічна потреба в НТНП електрообладнанні оцінюється в 300 млн USD. Найбільше промислове поширення набув сплав Nb_3Ti ($T_{crit} = 9,6$ К. Щорічно в світі виготовляють більше тисячі тон цієї сполуки.

Дуже перспективне використання НП в електротехніці та в енергетиці. Натепер втрати на «джоулево» тепло в проводах оцінюються в 30–40 %, тобто більше

третини всієї виробленої енергії – це втрати. Якщо ж передавати електроенергію по НП проводам з нульовим опором, це все рівно, що відразу більш ніж на третину збільшити вироблення електроенергії. На основі НП можна створювати електродвигуни та генератори з високими ККД і поліпшеними робочими характеристиками, рис. 3.

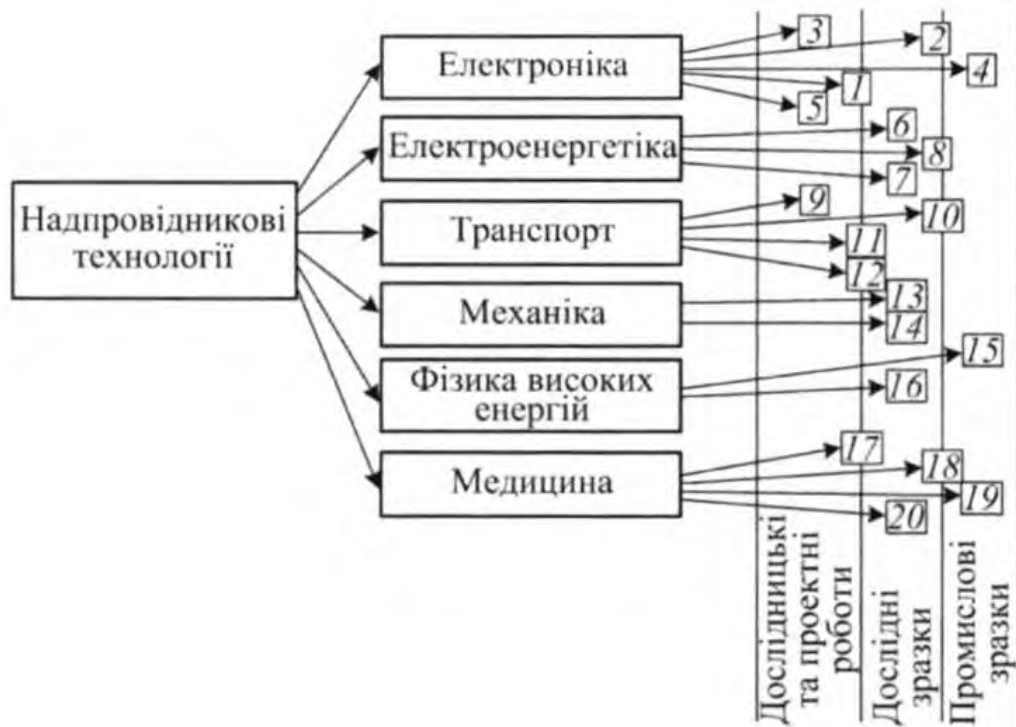


Рисунок 3 – Стан і напрямки застосування надпровідності:

- 1 – струмоводи; 2 – надпровідникові електронні прилади; 3 – обчислювальна техніка на надпровідникових елементах; 4 – СКВІД-и; 5 – стільниковий і супутниковий зв'язок; 6 – генератори; 7 – накопичувачі електричної енергії; 8 – силові кабелі; 9 – космічні станції; 10 – транспорт на магнітній подушці; 11 – пристрої, що підіймають; 12 – суднові електродвигуни; 13 – електродвигуни загального призначення; 14 – магнітні підшипники; 15 – прискорювачі; 16 – синхротрони; 17 – магнітоенцефалографія; 18 – магнітні екрани; 19 – ядерні магніторезонансні томографи; 20 – магнітні кардіографи

Для вирішення проблеми керованого термоядерного синтезу потрібно вміти утримувати гарячу плазму далеко від стінок, оскільки при зіткненні з такою плазмою будь-який, навіть самий тугоплавкий, матеріал моментально випаровується. Тому плазму утримують в сильному магнітному полі спеціальної конфігурації, в так званих, «магнітних пляшках». Сильне магнітне поле також потрібне для розробки транспорту на магнітній подушці, магнітних підшипників і пристроїв з використанням магнітної левітації. На рис. 4 наведений надпровідний кабель на основі

Nb_3Sn , що використовується для тороїдального магніту термоядерного реактора *ITER*.



Рисунок 4 – Надпровідний кабель на основі Nb_3Sn для тороїдального магніту термоядерного реактора *ITER*

Важливими напрямком вирішення проблем енергозбереження є впровадження НП в потужні турбогенератори (ТГ). Сьогодні межа потужності сучасних ТГ становить 1500–2000 МВт (при частоті обертання 1500–3000 об/хв). Зі збільшенням потужності ТГ збільшуються діаметри роторів, зростає напруженість в механічних конструкціях настільки, що відцентрові сили зможуть розірвати вузли з найміцнішої сталі. Тому більш потужні машини зможуть працювати тільки на інших фізичних принципах, наприклад, з використанням можливостей надпровідності. Застосування НП в електромашинобудуванні дозволяло зменшити масу і габарити ЕМ, збільшити граничну потужність і ККД, отримати електродвигуни з мінімальним моментом інерції, часом реверсу, зі спеціальними характеристиками. Значення робочих магнітних полів і щільності струму для електротехнічного і електроенергетичного обладнання наведені в табл. 2.

В 2019 р. вчені з Національної лабораторії високого магнітного поля (*MagLab*) при Університеті штату Флорида (США) створили найпотужніший в світі на той час надпровідний магніт. Пристрій діаметром не більше 1 см і розміром не більше 10 см здатний генерувати магнітне поле з індукцією в 45,5 Тл. Для цього магніту НП-ки були виконані з нового з'єднання, що отримав назву REBCO (в його основі використовується оксид барію міді) і здатного пропускати в два рази більше струму, в порівнянні з іншими НП. Завдяки цьому новий магніт здатний створювати набагато більш сильне магнітне поле.

Таблиця 2 – Значення струму і магнітної індукції для різних сфер застосувань НП

Використання	Щільність струму, А/м ²	Магнітна індукція, Тл
Кабель змінного струму	10 ⁹ –10 ¹⁰	< 1
НП-й індуктивний накопичувач енергії	10 ⁹	5–8
Магніти	10 ⁸ –10 ⁹	10–20
Магнітогідродинамічний генератор і термоядерний реактор с магнітним утриманням плазми	10 ⁹	6–16
Електричні генератори (ТГ)	10 ⁸	2–5
Електродвигуни	10 ⁸	2–5
Обмежувачі струму	10 ⁹	1–3
Трансформатори, перемикачі	10 ¹⁰	< 2
Потяги на магнітному підвісі	10 ⁸ –10 ⁹	5
Магніторезонансні томографи	10 ⁹	0,5–4

4.4 Технології виготовлення надпровідників

В усіх країнах велика увага приділяється вдосконаленню технологій виготовлення НП, а також особливостям роботи конструкційних, ізоляційних і провідникових матеріалів при глибокому охолодженні. Синтез НП матеріалів зазвичай складається з двох стадій. На першій стадії при температурі 700–900 °С формується основна структура, яка, однак, не містить достатньої кількості кисню для того, щоб набути властивості надпровідності. Друга стадія включає відпал в кисневому середовищі при температурі до 500 °С.

Для отримання провідникових ВТНП матеріалів використовуються три основні види технології:

- 1) завантаження порошкового НП матеріалу в срібну трубку з подальшою многократною витяжкою, плющенням і термообробкою в кисневому середовищі;
- 2) отримання тонких ниток ВТНП матеріалу з розплаву з наступною термообробкою в кисневому середовищі і скручуванням в багатожильний провідник;
- 3) різні методи напилення плівок на підкладку з наступною термообробкою.

По першому методу виготовляють багатожильні НП дроти в срібній матриці діаметром 1,5 мм, що містять до 1330 жил мікронного розміру; в деяких випадках додатково проводиться плющення і провідник набуває форму тонкої стрічки. Заключна операція – відпал в кисневій атмосфері. Багаторазова деформація в процесах витяжки та плющення сприяє орієнтації кристалів і призводить до збільшення критичної щільності струму. При необхідності додання провіднику певної форми,

наприклад під час намотування котушки, відпал повинен бути заключною операцією, оскільки ВТНП матеріал крихкий.

В даний час для провідників, отриманих таким способом на основі ітрію та вісмуту, досягнуті значення щільності струму порядку $4,7 \cdot 10^4$ А/см² в магнітному полі 1 Тл при $1,1 \cdot 10^4$ А/см² та при температурі рідкого азоту (77,4 К).

При температурі 4,1 К в поле 30 Тл досягнута критична щільність струму $2,1 \cdot 10^5$ А/см². Такі провідники можуть замінити традиційні металеві надпровідники в сильних магнітах при охолодженні їх рідким гелієм, забезпечити отримання більш високих значень індукції магнітного поля.

Другий спосіб – це витягування з розплаву тонких ниток. На осінній конференції 1990 р. по прикладній надпровідності (США) фахівці відділення *General Atomic* фірми "*Pacific Superconductors*" повідомили про отримання гнучких проводів в мідній оболонці з тонкими нитками з ВТНП, що забезпечують при 50 К струм до 6 кА/см² в слабкому магнітному полі. Шляхом плазмового напилення на підкладку товстих плівок ВТНП досягнуті покриття з критичною щільністю струму біля 10^4 А/см², які дуже чутливі до зовнішнього магнітного поля. Перевагою такого способу є можливість формування ВТНП шару на елементах різної конфігурації. При цьому дуже важливим є правильний вибір підкладки та її обробка.

Успішно розвиваються роботи з отримання тонких плівок з ВТНП матеріалів, застосування яких перспективне в області електроніки. Розробляються і освоюються електронно-променеві і магнетронні напилення, імпульсне лазерне випарування і осадження на підкладки, хімічне осадження з парової фази та ін. Тут надзвичайно важливий підбір відповідної підкладки, кристалічна структура якої повинна бути близька до структури ВТНП плівки.

В даний час розроблені НП, які відрізняється тим, що як основа використовується мідна, а не срібна поверхня. Даний підхід вимагає значно менших витрат і дозволяє оперативне вносити необхідні конструктивні і технологічні зміни для коригування параметрів виробів. Стрічкові дроти виготовляються на основі $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ в срібній оболонці (Bi-2212/Ag). Цей матеріал має реальну перспективу для застосування в НП пристроях з сильними магнітними полями при робочих температурах поблизу температури рідкого H_2 або Ne. Вартість цього матеріалу близько $100 \text{ USD}/(\text{kA} \cdot \text{m})$.

Зростання масштабів його виробництва, вдосконалення технології і розкриття потенційних можливостей дають підставу очікувати, що в найближчі роки його ціна знизиться до $10\text{--}15 \text{ USD}/(\text{kA} \cdot \text{m})$. Тоді ВТНП пристрої стануть конкурентоспроможними. Розпочато випуск масивних матеріалів на основі сполуки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

(або $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), які конкурують з такими постійними магнітами, як Nd-Fe-B . Ці сполуки перспективні для створення довгомірних струмопровідних елементів (кабелів) з високою щільністю струму ($\sim 10^9 \text{ А/м}^2$) при $77,3 \text{ К}$ в полях до 5 Тл , табл. 3.

Таблиця 3 – Вимоги до ВТНП матеріалів для електрообладнання

Вид обладнання	Щільність струму, кА/см^2	Індукція магнітного поля, Тл
Кріотурбогенератори	15–22,5	5–7
Трансформатори	10–20	0,5–3
Силові кабелі	10–20	0–1
Індуктивні накопичувачі енергії	3–60	5–10
Магнітні сепаратори	10	2–5
ЯМР діагностичні апарати (томографи)	10	0–2
Магнітні системи фізики високих енергій	50–250	3–10

4.5 Використання надпровідності в електротехнічних установках

З огляду на перспективи застосування НП-ного обладнання у всіх областях електротехніки, найбільш важливими завданнями є технічні проблеми, пов'язані з правильним вибором матеріалів для виготовлення НП-ного обладнання. Застосування НП в електромашинобудуванні дозволяє зменшити масу і габаритні розміри ЕМ, збільшити граничну потужність і ККД ТГ, отримати електродвигуни з мінімальним моментом інерції, з малим часом реверсу, зі спеціальними характеристиками. Синхронні генератори для ТЕС, АЕС і ГЕС будуть мати на $0,5\text{--}0,8 \%$ вищий ККД і на 30% менші масо-габаритні показники. Застосування НП в турбогенераторах великої потужності перспективне тому, що для них вдається досягти того, що при інших технічних рішеннях отримати практично неможливо: зменшити масу і габарити машини при збереженні потужності. У звичайних машинах це зменшення завжди пов'язане зі збільшенням втрат і труднощами забезпечення високого ККД. І навпаки, перші промислові випробування показали, що в НП ТГ масу можна збільшити в $2\text{--}2,5$ рази, але при цьому, в зв'язку з відсутністю втрат в роторі, ККД збільшується приблизно на $0,5\%$ і наближається у великих ТГ до $99,3 \%$. У цих умовах економія енергії, що отримується за рахунок зниження втрат, швидко виправдовує ті витрати, які вкладаються в створення нових НП машин.

Для ЕМ задача вибору матеріалу є першочерговою, тому що в обертових машинах до температурних навантажень додаються механічні. Застосовані конструкційні матеріали повинні забезпечувати надійну роботу машин і механізмів в заданих температурних режимах. Високолеговані сплави на основі нікелю, алюмінію, титану, композиційні матеріали і пластики набувають все більшого поширення поряд із існуючими зазвичай конструкційними сталями. Щоб вибрати найбільш підходящий для заданих робочих умов матеріал і правильно визначити надійність і довговічність виробу, потрібні знання фізичної природи процесів, що відбуваються при експлуатації, а також точні дані про зміни основних характеристик матеріалів під впливом зовнішніх умов. В індустріально розвинених країнах існують спеціальні програми з розвитку і застосуванню НП в різних областях діяльності, що фінансуються урядом.

Обмеження промислового застосування НТНП, крім необхідності охолодження, також обмежується дефіцитом гелію (He) на світовому ринку.

Гелій є супутнім продуктом при видобутку природного газу. Найбільшим світовим виробником He вважається США. Гелій добувають також в Алжирі, Катарі, Росії і в Польщі. Уже в 2007 р. на світовому ринку виник і постійно зростає дефіцит He, що відразу призвело до росту на 10 % його ціни. Якщо витрачання He буде продовжуватись в тому ж темпі, то весь резерв He буде вичерпаний протягом найближчих 10–15 років.

За оцінками аналітиків ринок залишиться напруженим, постійно зростають ціни. Для стабілізації ринку необхідно розробляти нові родовища, вживати заходи щодо збереження запасів He, шукати рішення з виключення його використання в ряді менш важливих технологічних процесів.

4.6 Способи охолодження електричних машин.

Розвиток систем охолодження електричних машин

До складу НП машини змінного струму входить НП-вий індуктор (оборотний або нерухомий) і осердя статора (якорь) з обмотками з нормального металу. Обмотка статора повинна бути сконструйована таким чином, щоб максимально використовувалося сильне поле, створюване НП обмотками збудження. Феромагнітний матеріал (якщо він є в конструкції машини) служить тільки зовнішнім магнітним екраном. У синхронних машинах занадто сильне магнітне поле реакції якоря призводить до появи настільки високої реактивності обмотки, що вона виходить із синхронізму під час перехідних процесів. Натепер відомі дані успішних випробувань

електротехнічного обладнання з ВТНП обмотками: ЕМ потужністю в кілька МВА, трансформатори потужністю до 1,5 МВА, ділянки кабельних ліній електропередачі, розраховані на потужність до 440 МВА і т. ін.

В НП дроті допустима щільність струму в 10-50 разів перевищує щільність струму в звичайному електрообладнанні. Магнітні поля в ЕМ можна буде довести до значень порядку 10 Тл, в порівнянні з 0,8–1 Тл в звичайних машинах. Якщо врахувати, що розміри електротехнічних пристроїв обернено пропорційні добутку допустимої щільності струму на величину індукції магнітного поля, то очевидно, що застосування НП дозволяє зменшити розміри і масу електрообладнання в багато разів.

Важливим критерієм оцінки придатності матеріалу для роботи при низьких температурах є знання межі текучості в залежності від температури. Аустенітні нержавіючі сталі натепер є основними конструкційними матеріалами в криогенній техніці. У них висока міцність, а пластичність і в'язкість зберігається до гелієвих температур. Основний сталлю цього класу, що випускається серійно, є хромонікелева сталь Х18Н10Т, що має вказані характеристики і після багатьох років роботи (понад 15 років), мають малу теплопровідність. Сталь Х18Н10Т має задовільну зварюваність, шви мають хорошу вакуумну щільність і їх міцність становить не менш 90 % від міцності основного металу. Зварні шви мало чутливі до низьких температур і залишаються досить пластичними до гелієвих температур.

Застосування НП для обмоток збудження ТГ-рів дозволяє отримати практично яку завгодно велику потужність збудження і при цьому не буде втрат на збудження. Характерною особливістю турбогенераторів з НП обмоткою збудження є істотне зниження інерційної постійної генератора (на 50–60 % в ТГ на 3000 об/хв і 60–70 % в ТГ на 1500 об/хв), що призводить до повільного згасання хитань ротора і труднощів із забезпеченням міцності валопроводу блоку в неномінальних режимах. Ці труднощі можуть бути подолані за рахунок застосування, наприклад, пристрої автоматичного регулювання моменту турбіни, а також відповідного підбору параметрів валопроводу і зниження величин перехідних моментів в генераторі. Істотні техніко-економічні переваги турбогенераторів з НП обмоткою збудження обумовлюють доцільність проведення великого обсягу дослідницьких робіт зі створення нових типів генераторів і пов'язаних з цим витрат.

Хоча переваги ТГ з надпровідниковими обмотками збудження в найбільшій мірі проявляються в ТГ великої одиничної потужності, підвищення техніко-економічних показників при застосуванні НП-мости можна отримати навіть в генераторах середньої потужності. У ТГ потужністю 200–300 МВт з НП обмоткою

збудження, в порівнянні з ТГ з традиційним охолодженням ротора, вдається зменшити вагу приблизно в 3 рази, активну довжину – на 60–70 %, зовнішній діаметр ротора можна зменшити на 10–20 %, загальну довжину ротора приблизно – на 50 % при підвищенні ККД на 0,5 %. Приблизно такі ж результати дають розрахунки і турбогенераторів на 1500 об/хв, табл. 4.

Таблиця 4 – Порівняння традиційного і надпровідникового турбогенератора потужністю 1200 МВА

Дані, розмірність	Надпровідниковий ТГ	Традиційний ТГ
Міжфазна напруга, кВ	26–500	26
Лінійний струм, кА	27–1,4	27,0
Активна довжина, м	2,5–3,5	6–7
Повна довжина, м	10–12	17–20
Зовнішній діаметр статора, м	2,6	2,7
Діаметр ротора, м	1,0	1,
Довжина ротора, м	4,0	8–10
Потужність збудження, кВт	6,0	5000,0
Вага генератора, т	160–300	600–700
Повні втрати, МВт	5–7	10–15
Індукція магнітного поля, Тл	5,0	2,0

Це особливо важливе для генераторів вітроенергетичних установок.

Необхідність кріостування НП обладнання створює сприятливі можливості для підвищення його надійності. При кріогенних температурах відсутні температурні градієнти і відповідні термомеханічні напруги (в мідних обмотках градієнти температури досягають 80–100 К), практично відсутня старіння високовольтної ізоляції. Оскільки НП електротехнічні пристрої часто працюють в поєднанні з НП перетворювачами, то можна поліпшити робочі параметри останніх при азотних температурах, розташували обидва пристрої в єдиному кріостатованому об'ємі.

4.7 Використання ВТНП в промисловості і енергетиці

У багатьох розвинених країнах існують державні програми розвитку поновлюваних джерел енергії, в тому числі вітроенергетики, яка для України становить найбільший інтерес. Для вирішення цих програм необхідно розглядати науково - технічні, енергетичні, екологічні, соціальні та освітні завдання. Особливо цей процес

був активізований після того, як багато країн переглянули ставлення до атомної енергетики після аварії на АЕС в Японії в березні 2011 р.

Згідно з прогнозом, складеним на підставі аналізу темпу приросту встановленої потужності різних видів поновлюваних джерел енергії в країнах ЄС, 16 % від загального виробітку енергії буде забезпечувати вітроенергетика. Щорічно в Європі встановлена потужність ВЕУ збільшується на 200 МВт. При сприятливих умовах щорічний приріст встановленої потужності ВЕУ в світі може скласти 800 МВт. Найбільш ефективними з нарощування встановленої потужності вітростанцій є програми країн Європи, Китаю, Індії, США, Канади. Компанії *American Superconductor (AMSC)* і *TECO-Westinghouse Motor Company (TWMC)* оголосили про об'єднання зусиль в області розробки ВТНП генераторів великої потужності для прибережних вітряних електростанцій. AMSC і TWMC отримали державне фінансування в рамках *NIST's Advanced Technology Program*, що дозволило додати ще 3,4 млн. USD до вже витрачених 6,8 млн. USD.

Створення ВТНП синхронних генераторів потужністю 10 МВт вимагає проведення цілого ряду робіт, спрямованих як на створення нових ВТНП проводів, так і на розробку нових технологій їх вироблення та намотування. Ці проблеми виникають через фізичні процеси, що протікають в НП електричних машинах, а також внаслідок особливостей їх конструкції. До них відноситься наявність кріостату, в якому при «гелієвих» температурах в діапазоні 4,2–5 К реалізуються умови, необхідні для виникнення надпровідності.

Особливостями якоря з обмотками змінного струму, є відсутність феромагнітного осердя в зубцевій зоні, наявність або відсутність феромагнітного екрана, інтенсифікація електричних і теплових навантажень, внаслідок «ущільнення» зубцевого шару, що викликало необхідність створення методики розрахунку магнітних полів у зоні обмотки статора і в екранах, розробки нових конструктивних вузлів обмоток змінного струму, схем охолодження і методики теплових розрахунків. Криогенний ТГ з надпровідною обмоткою збудження наведений на рис. 5.

ТГ складається з двох основних, вузлів: статора і ротора з надпровідною магнітною системою збудження, що розміщується в обертовому кріостаті. Ротор 1 – це кріостат, що складається з системи співвісних циліндрів з вакуумними проміжками, теплового екрана 2, теплообмінників 3, теплових мостів і двох напіввалів для обертання кріостату в підшипниках. У внутрішній посудині кріостату знаходиться надпровідна система збудження генератора 4.

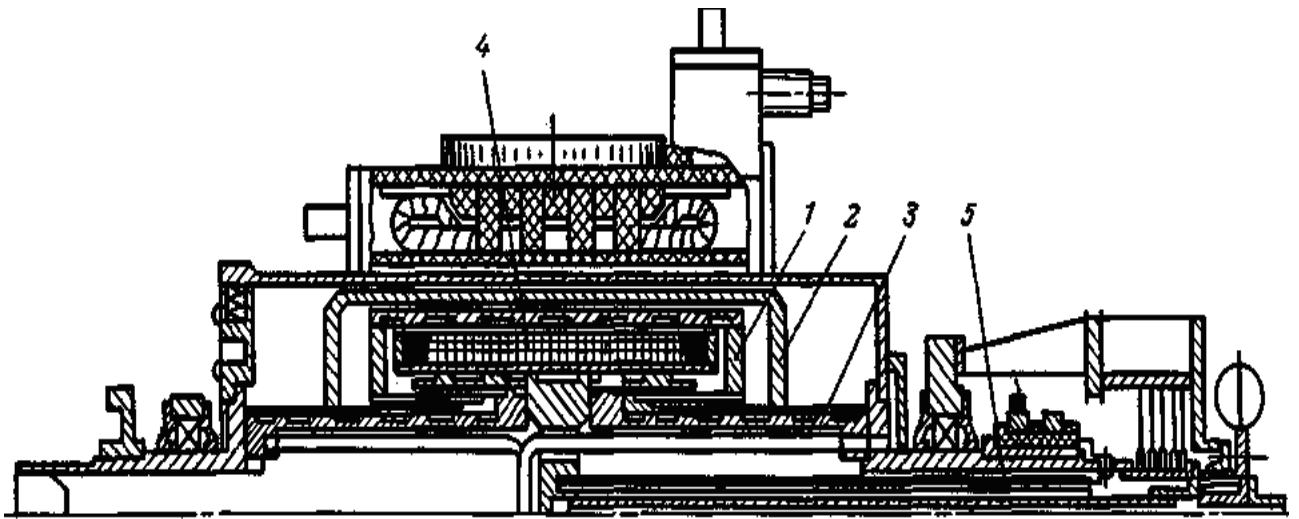


Рисунок 5 – Конструктивна схема кріотурбогенератора:
 1 — ротор; 2 — тепловий екран; 3 — теплообмінники;
 4 — надпровідна система збудження; 5 — струмоввод

Температура, необхідна для роботи надпровідної обмотки, підтримується шляхом подачі рідкого гелію і відведення парів з посудини через систему концентричних трубок, розташованих в центральному отворі напіввалів і з'єднаних з зовнішніми гелієвими лініями через магніторідинні ущільнення. Обмотка збудження складається з двох сідлоподібних котушок, намотаних з надпровідного проводу. Живлення обмотки збудження струмом проводиться через контактні кільця на валу ротора і далі через пластинчастий струмоввод 5, що охолоджується парами гелію. При створенні нових конструкцій обертового кріостата вирішують задачі забезпечення мінімального споживання холодоагенту. Було виготовлено і досліджено генератор з охолодженням обмоток статорів трансформаторною оливою та зі склотекстолітовим корпусом; обмотка статора – з гнучких проводів прямокутного перерізу.

У процесі теплових випробувань встановлені межі такої конструкції при потужності 2–5 МВт і при щільності струму в обмотці 9–10 А/мм². Разом із склопластиковим був спроектований і виготовлений феромагнітний статор з безпосереднім охолодженням порожнистих провідників обмотки водою. Порівняльні випробування двох статорів з одним і тим же ротором показали, що гранична потужність генератора з феромагнітним статором може бути підвищена приблизно в 2,5–3 рази при однакових струмах збудження (в 1,2–1,4 рази по напрузі і 2,0–2,2 рази по струму). Для генераторів з неметалічними і феромагнітними статорами з двома типами обмоток збудження: з ніобій-титановою та ніобій-олов'яною, – були виготовлені і досліджені обертові кріостати. Обидва ротора мали ідентичну конструкцію і

відрізнялися тільки матеріалом обмотки збудження, що дало можливість безпосередньо порівняти характеристики генераторів. Порівняння проводилося для генератора з феромагнітним статором.

Результати випробувань показали, що основні переваги генератора з ніобій-олов'яною обмоткою полягають в зниженні витрат кріоагенту і в можливості підвищення стабільності НП обмотки при стрибкоподібній зміні струму збудження. При однакових вихідних параметрах витрати кріоагенту в генераторі з обмоткою з ніобій-олова приблизно в два рази менші, ніж у генератора з ніобій-титаном, і становить 10–12 л/годину.

При розробці обертових кріостатів особлива увага приділялася створенню надійного вузла подачі рідкого гелію в ротор і евакуації газоподібного холодоагенту, вимогам герметичності ущільнення (що зазвичай задовольняється магнітно-рідинними ущільненнями), надійності при раптові підвищенні тиску в умовах переходів обмоток в нормальний стан, роботі в широкому діапазоні температур в режимах заохолодження і кріостатування, забезпеченню відсутності механічного контакту між обертовими і нерухомими елементами і мінімальними втратами.

При дослідженні різних модифікацій генераторів створена система кріо-забезпечення синхронного кріотурбогенераторів із замкнутим циклом циркуляції холодоагенту. Для беспазових статорів ярмо набирається з листової електротехнічної сталі. Стяжка ярма здійснюється за допомогою натискних кілець традиційної конструкції. Ротор генератора – екранований, його конструкція схожа з конструкціями роторів НТНП машин. Проте, слід зазначити, що застосування тільки рідкого азоту значно спрощує конструкцію ротора. Об'єми статора і ротора заповнюються рідким азотом окремо один від одного (конструкція з роздільними кріостатами). Заповнений азотом об'єм статора обмежений корпусом, щитами і циліндром зі склопластику (склотекстоліту). Корпус статора виконують з вакуумною ізоляцією. Внутрішня поверхня корпусу покрита нейловою плівкою з алюмінієвою фольгою. Основні параметри криогенного високовольтного ТГ потужністю 220 МВт представлені в табл. 5. Надпровідні котушки обмотки збудження синхронного генератора можуть бути виконані у вигляді як сідлоподібних котушок, так і у вигляді набору трекових модулів (рис. 6). Сідлоподібні котушки більш складні у виготовленні, але вони краще забезпечують охолодження лобових частин. Для котушок використовують НП на основі Ві-2223 перерізом $10,8 \times 0,32 \text{ мм}^2$. Він являє собою жилу Ві-2223 на срібній матриці.

Таблиця 5 – Основні параметри трифазного криогенного високовольтного ТГ

Параметр	Значення
Загальні данні	
Потужність, МВт.	220
Напруга, кВ	220/110
Струм, А	680/1358
Частота обертання ротора, об/хв	3000
Частота змінного струму, Гц	50
cosφ, в.о.	0,85
Основні розміри	
Діаметр розточки статора, мм	1200
Діаметр розточки ротора, мм	800
Активна довжина, мм	2400
Довжина машини, мм	5050
Зовнішній діаметр корпусу, мм	2880
Повітряний зазор, мм	20

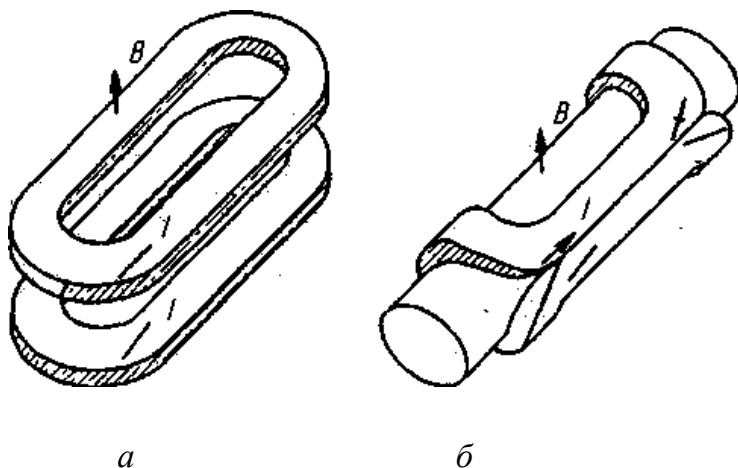


Рисунок 6 – Котушки обмотки збудження надпровідного синхронного генератора:

a – трекові; *б* – сідлоподібні

Після закінчення намотування котушка покривалася фторопластовою стрічкою, остаточно спресовується, а на робочий каркас наноситься анти-адгезійне покриття. Застосування НП для обмоток збудження ТГ дозволяє отримати значно більшу потужність без втрати на збудження.

Попередні оцінки показують, що широкого застосування ТГ з надпровідної обмоткою збудження

в енергетиці можна очікувати вже в ХХІ столітті.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ В ІНТЕРНЕТІ

1. Будущее энергетики – сверхпроводниковые электрогенераторы, трансформаторы и линии электропередачи. URL: <http://elektrik.info/main/fakty/55-budushhee-jenergetiki.html>
2. Черноплеков Н. А. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы практического применения. // С.-Пб.: Вестник РАН. – 2001, том 71. – № 4. – С. 36–78.
3. Глебов И.А., Данилевич Я. Б., Шахтарин В. Н. Турбогенераторы с использованием сверхпроводимости. – Ленинград: Наука, 1981. – 231 с.
4. Максимов Е. Г. Проблема высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние // Ленинград: Успехи физ. наук, 2000, т. 170, № 10. – С. 1033–1061.
5. Сверхпроводимость в электроэнергетике: настоящее и будущее. URL: <http://elektrik.info/main/fakty/445-sverhprovodimost-v-elektroenergetike-nastoyaschee-i-budushee.html>
6. Эксплуатация генераторов – Сверхпроводниковые турбогенераторы. URL: <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/ekspluataciya-generatorov-23.html>
7. Шевченко В. В., Минко А.Н. Развитие систем охлаждения и оптимизация конструкций турбогенераторов: монография. – Харьков: Изд-во Иванченко И. С., 2013. – 242 с. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/elmas/wp-content/uploads/sites/108/2019/02/Book_2013_Shevchenko_Razvitie_sistem_okhlazhd.pdf
8. Шевченко В.В. Основы электроэнергетики: учеб. пособие / В. В. Шевченко. – НТУ "ХПИ". – Харьков: ФОП Панов А. М., 2019. – 338 с. orcid.org/0000-0002-9557-9849
<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/42266>
9. Сытников В. Е. Перспективы применения сверхпроводимости в электроэнергетике. // Ленинград: Энергия единой сети. – 2012. – № 1. – С. 29-37.
10. Сверхпроводники: революция в энергетике. URL: <https://www.porpmech.ru/technologies/12617-sverkhprovodniki-revoljutsiya-v-energetike/>
11. Шевченко В. В., Гавриш А. Ю. Современное состояние и перспективы использования сверхпроводников в электроэнергетике. //Харків: ХУПС. – Системи обробки інформації. – 2005. – Вип. 5(45). – С. 194–203.
12. Сверхпроводниковые технологии в электроэнергетике. URL: <https://kosmi.ru/sverhprovodnikovye-tehnologii-v-elektroenergetike.html>
13. Superconducting rotating machines: A review of the past 30 years and future perspectives // 30th International Symposium on Superconductivity. – 2018. – Series 1054.

ДОДАДОК А

Приклад оформлення титульного аркуша контрольного завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Кафедра «Електричні машини»

ЗВІТ

про виконання контрольного завдання

з дисципліни

**ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НАДПРОВІДНОСТІ
В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ**

Виконав студент гр. _____
(підпис) (ПІБ)

Керівник _____
(ПІБ)

Оцінка _____
(підпис) (дата)

Харків – _____
(рік)

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ТА КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ
з дисципліни «Перспективи застосування надпровідності
в електромеханіці»
для студентів денної форми навчання
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціалізації «Електричні машини»

Укладачі:

ШЕВЧЕНКО Валентина Володимирівна

ШАЙДА Віктор Петрович

ШИЛКОВА Лариса Василівна

Відповідальний за випуск проф. Мілих В. І.

Роботу рекомендував до друку проф. Любарський Б. Г.

Редактор М. П. Єфремова

План 2021 р., поз. 237

Підп. до друку _____.

Гарнітура *Times New Roman*. Обсяг – 2,0 др. арк.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
