

Яцуненко В.П., Русаков В.Ф.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,
email: v20viktor04r.yats@gmail.com*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАДПРОВІДНОСТІ: ВІД ВІДКРИТТЯ ДО СУЧАСНОСТІ

Анотація. *В роботі проаналізовано еволюцію фізики надпровідності від відкриття явища до сучасного стану. Акцентовано увагу на основних досягненнях, які привели до розуміння природи явища і можливості його використання як у наукових дослідженнях, так і практичному застосуванні.*

Abstract. *The paper analyzes superconductivity physics's evolution from the phenomenon's discovery to its current state. The main achievements that led to the understanding of the nature of the phenomenon and the possibility of its use in both scientific research and practical application are emphasized.*

Ключові слова: *низькі температури, надпровідність, надпровідник, змішаний стан надпровідника, критичне магнітне поле, критичний струм.*

Keywords: *low temperatures, superconductivity, superconductor, mixed state of superconductor, critical magnetic field, critical current.*

У сучасних умовах на Землі виробляється приблизно 29165,1 ТВт·г електроенергії, за оцінками 63% первинної енергії, що використовується для її вироблення втрачається до моменту надходження до споживача.

У 2021 році в індустріальній Україні вироблялось 155,5 ТВт·г і вона посідала 35 місце у світі. Втрати при передачі, накопиченні, трансформації та використанні електроенергії розподіляються приблизно наступним чином: лінії та кабелі електропередачі: $\geq 10 - 12 \%$; трансформатори: $\sim 30\%$; електропривід $\geq 30 - 35\%$ [1]. Застосування надпровідників дасть можливість, за оцінками, звести втрати до 1-2%, що еквівалентно заощадженню енергії від кількох потужних атомних електростанцій. З цього прикладу видно, яку важливу роль відіграє перспектива застосування надпровідників.

У 2021 році в індустріальній Україні було вироблено 155,5 ТВт·год електроенергії, що забезпечило їй 35-те місце у світовому рейтингу. Втрати електроенергії при її передачі, накопиченні, трансформації та споживанні розподіляються приблизно так: на лінії та кабелі електропередачі припадає

близько 10–12 %, на трансформатори – орієнтовно 30 %, на електроприводи – понад 30–35 % [1].

Застосування надпровідних матеріалів, за оцінками, дозволить зменшити сумарні втрати до 1–2 %, що еквівалентно економії електроенергії, виробленої кількома потужними атомними електростанціями. Цей приклад яскраво ілюструє важливість перспектив використання надпровідників.

Явище надпровідності, тобто повне зникнення електричного опору у матеріалів за певних умов, було відкрито у 1911 році голландським фізиком Гейке Камерлінг-Оннесом [2]. У 1908 році він вперше у світі отримав рідкий гелій, створивши передову на той час лабораторію кріогенних досліджень. У 1911 році Камерлінг-Оннес виявив, що при температурі $T = 4,15 \text{ K}$ електричний опір ртуті миттєво падає до нуля. Це явище було назване надпровідністю, а відповідні матеріали – надпровідниками.

Оцінки показують, що питомий опір металу в надпровідному стані не перевищує $10^{-23} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, за таких умов електричний струм у надпровідному кільці може існувати близько 10^5 років без згасання. Температура переходу у надпровідний стан називається критичною температурою (T_c).

Згодом було встановлено, що не всі провідники демонструють надпровідні властивості. Важливість цього відкриття була визнана світовою науковою спільнотою: у 1913 році Гейке Камерлінг-Оннес отримав Нобелівську премію з фізики.

При дослідженні надпровідників з'ясувалось, що вони мають цікаві фізичні властивості, а саме: магнітне поле, до певної величини напруженості не проникає у надпровідник, і навіть якщо охолоджувати зразок у магнітному полі, після переходу у надпровідний стан магнітне поле виштовхується зі зразка. Цей ефект був відкритий В. Мейснером і Р. Оксенфельдом у 1933 році. Надпровідність у магнітному полі зберігається, якщо напруженість поля не перевищує певного значення, яке називається критичним магнітним полем – H_c . За рахунок цього ефекту спостерігається явище левітації. (Магніт ширяє над надпровідником, або навпаки). Крім того було з'ясовано, що коли струм, що протікає по надпровіднику перевищує певне значення (воно називається критичним струмом – J_c), надпровідний стан також руйнується – ефект Сілсбі.

У 1937 році співробітник Українського фізико-технічного інституту (УФТІ, м. Харків) Л. В. Шубніков під час дослідження надпровідних властивостей сполук, зокрема PbBi і PbTl_2 , відкрив новий стан надпровідних матеріалів – так званий змішаний стан, який згодом отримав назву фаза

Шубнікова [3]. Це явище полягає в тому, що при досягненні певного значення напруженості магнітного поля (першого критичного поля H_{c1}) магнітне поле починає проникати в надпровідник, однак надпровідний стан зберігається до досягнення другого критичного поля H_{c2} , після чого він руйнується.

Подальші дослідження показали, що такі матеріали належать до іншого типу надпровідників. Надпровідники першого роду — це, як правило, чисті метали (за винятком ванадію та ніобію), тоді як до надпровідників другого роду належать ванадій (V), ніобій (Nb) та більшість надпровідних сплавів. Вони характеризуються високими значеннями H_{c2} , що зумовило їх широке застосування в техніці.

У 1962 році Браян Джозефсон теоретично передбачив можливість проходження струму через контакт типу надпровідник–діелектрик–надпровідник. Це явище отримало назву ефект Джозефсона, а сам учений був удостоєний Нобелівської премії з фізики у 1973 році.

Значний внесок у дослідження ефекту Джозефсона зробили українські фізики: академіки І. К. Янсон, І. М. Дмитренко та професор В. М. Свистунов, які першими спостерігали джозефсонівську НВЧ-генерацію – нестационарний ефект Джозефсона.

Великі зусилля науковців були спрямовані на підвищення критичної температури, оскільки використання надпровідників за гелієвих температур було нерентабельним. Тим не менш до 1985 р. найвища критична температура, яка була отримана становила 23,2 К у Nb_3Ge . Найбільш технологічним надпровідником був Nb-Ti50% з $T_c \approx 10$ К.

Значні зусилля науковців були спрямовані на підвищення критичної температури надпровідного переходу, оскільки експлуатація надпровідників за температур гелію є економічно не вигідною. Проте до 1985 року найвища досягнута критична температура становила лише 23,2 К у сполуці Nb_3Ge . Найбільш технологічно зручним надпровідником тривалий час залишалася сплавна система Nb–Ti (50 %), з критичною температурою $T_c \approx 10$ К.

Історично як умовну межу між високотемпературними (ВТНП) та низькотемпературними надпровідниками (НТНП) прийнято критичну температуру 30 К. Першу ВТНП-сполуку було відкрито у 1986 році К. Мюллером і Г. Беднорцем — це був оксид $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ з $T_c = 35$ К, за що дослідники отримали Нобелівську премію з фізики у 1987 році.

У 1987 році тими ж авторами було відкрито надпровідник $YBa_2Cu_3O_x$ з $T_c = 92$ К – перший матеріал, критична температура якого перевищила температуру

кипіння рідкого азоту за нормального атмосферного тиску. На сьогодні найвища T_c за нормального тиску становить 133 К у ртутній кераміці $HgBaCaCuO$. Однак, навіть ця температура все ще значно нижча за прагнуту мету – надпровідність за кімнатних умов.

Основні сфери застосування надпровідників включають створення потужних магнітів, електронних приладів на основі ефекту Джозефсона, систем магнітної левітації та надпровідних електродвигунів.

Зокрема, на основі ефекту Джозефсона були створені СКВІДи (SQUID – Superconducting Quantum Interference Devices), тобто надпровідні квантові інтерферометри, які відзначаються надзвичайно високою чутливістю до слабких магнітних полів. Завдяки цій властивості СКВІДи знайшли широке застосування в медицині (наприклад, у ядерно-магнітному резонансі – ЯМР-томографах), а також в інших галузях науки і техніки.

Магнітна левітація, яка реалізується завдяки надпровідності, використовується при створенні потягів на магнітній подушці (технологія MAGLEV). Використання надпровідних елементів в електродвигунах дозволяє значно зменшити їх масу при збереженні високої потужності та ефективності. Пошуки надпровідників з високою критичною температурою продовжуються. Значного розвитку набули дослідження надпровідних тонких плівок, які демонструють перспективні результати. Однак у цій галузі виникають складнощі, пов'язані з необхідністю досягнення надвисоких тисків у мільйони атмосфер для реалізації надпровідного стану, що істотно ускладнює їх технічне застосування. Як приклад можна навести відкритий у 2019 році гідрид лантану LaH_{10} з критичною температурою $T_c \approx 250$ К при тиску близько 170 ГПа.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Втрати електроенергії. (n.d.). *Bikinedia*. https://uk.wikipedia.org/wiki/Втрати_електроенергії
- [2] Kamerlingh Onnes, H. (1911). *Communications Leiden*, 81, 81–83.
- [3] Шубников, Л. В., Хоткевич, В. І., Шепелев, Ю. Д., & Рябінін, Ю. М. (1937). Магнитные свойства сверхпроводящих металлов и сплавов. *Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ)*, 7(2), 221–237.