

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

В. Г. Данько, І. С. Полянська, Є. В. Гончаров

**ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ
НАДПРОВІДНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОМУ
ОБЛАДНАННІ**

За редакцією В. Г. Данька

Харків
«НТМТ»
2011

ББК 31.2
Д 19
УДК 621.3

Рецензенти: *О. І. Яковлєв*, д-р техн. наук, проф., Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
А. Т. Пугачов, д-р ф.-м. наук, проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Робота публікується за рішенням вченої ради університету, протокол № 4 від 08.04.2011 р.

Данько В. Г.

Д 19

Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні : монографія / В.Г. Данько, І.С. Полянська, Є. В. Гончаров; за ред. В. Г. Данько. – Х.: НТМТ, 2011. – 248 с.

ISBN 978-617-578-047-3

В монографії розглянуто велику кількість проектів, що реалізуються в найбільш технічно розвинених країнах світу, стосовно впровадження в електроенергетику високотемпературної надпровідності. Наведені технічні рішення і показані тенденції розвитку за такими основними напрямками: електричні генератори і двигуни, трансформатори, кабельна техніка, електричні апарати (в першу чергу, обмежувачі струму короткого замикання).

Призначено для студентів і аспірантів, викладачів вищих навчальних закладів, а також наукових та інженерно-технічних працівників і спеціалістів, що працюють у галузі електроенергетики.

Іл. 172. Табл. 58. Бібліогр.: 263 назв.

ББК 31.2

ISBN 978-617-578-047-3

© НТУ «ХПІ», 2011 р.
© В. Г. Данько, І. С. Полянська,
Є. В. Гончаров, 2011 р.

Вступ

В останній час науково-технічний прогрес в галузі електроенергетики характеризується появою надвисоких класів напруг, освоєнням великих одиничних потужностей, створенням енергетичних комплексів великої потужності. Подальший розвиток електроенергетичних пристроїв у ХХІ ст. буде базуватися на нових електротехнічних матеріалах з унікальними властивостями. Зараз особливого значення набувають технології, що задовольняють вимогам низького енергоспоживання, високої продуктивності і екологічної чистоти.

У цьому сенсі надпровідники розглядаються як одні з найбільш перспективних і ефективних матеріалів, здатних забезпечити новий крок в електроенергетиці [1]. За рахунок багаторазового або повного зменшення електричного опору (рис. В.1) можливо радикально знизити втрати і підвищити ККД електроенергетичного пристрою.

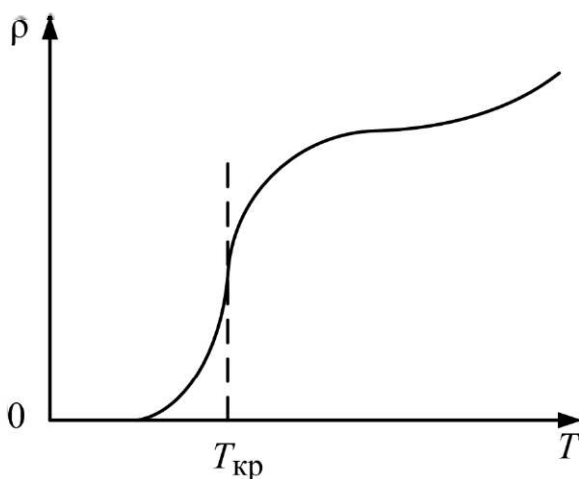


Рисунок В.1 – Залежність опору надпровідника від температури

При цьому, чим більшою буде критична температура $T_{кр}$, при якій втрачається надпровідний стан, тим меншими будуть втрати на охолодження, і відповідно вищою буде ефективність в цілому. Тому використання високотемпературної надпровідності є важливим наступним кроком на шляху використання надпровідності взагалі. Іншою надзвичайною властивістю проводів з надпровідних матеріалів є висока густина струму, що досягає декількох $\text{kA}/\text{мм}^2$, за рахунок чого можна створювати сильні магнітні поля в активній зоні, усувати ферромагнетик з магнітного кола, зменшувати масогабаритні показники і підвищувати питомі електромагнітні параметри пристрою.

За рахунок використання ефекту повного або часткового діамagnetизму за допомогою надпровідних екранів можливо формувати необхідне магнітне поле в активній зоні і зменшувати поля розсіювання.

Низькі омичні втрати і малий діаметр ВТНП кабелів роблять їх прекрасним рішенням для енергосистем з постійно зростаючим енергоспоживанням, а вивільнення і повторне використання каналів, що залишилися від звичайних кабелів, дозволить сильно спростити подальший розвиток міської інфраструктури.

Кріостатування пристрою дозволяє практично усунути градієнти температур і термомеханічні напруги, зменшити процес старіння високовольтної ізоляції. При цьому необхідно враховувати, що діелектрична міцність багатьох кріогенних рідин висока, а у рідкого азоту вона не уступає діелектричній міцності трансформаторного масла.

Про перспективність даного напрямку розвитку науки і техніки свідчить величезний інтерес вчених, фахівців і бізнес-структур у багатьох країнах світу. У ряді країн виконуються масштабні програми по створенню промислового надпровідного устаткування.

Зокрема, Міністерство енергетики США *DoE (Department of Energy)* наприкінці 90-х років XX ст. сфокусувало свою увагу на чотирьох основних програмах по практичному використанню надпровідності, на чолі яких поставлені найвизначніші корпорації і фірми. Перша програма пов'язана з розробкою автоматичних обмежувачів струму для захисту мереж від коротких замикань і очолюється корпорацією *Lockheed Martin*. Друга програма, очолювана компанією *General Electric*, спрямована на створення синхронних генераторів, ринок яких оцінюється у 30 млрд дол. Третя програма, очолювана компанією *Reliance Electric*, спрямована на розробку і широке впровадження в промисловість різних надпровідних електродвигунів. Оскільки тільки великі промислові двигуни споживають близько 30 % електроенергії США, то цей сегмент ринку оцінюється у 300 млн дол. Четверта програма, очолювана компанією *Pirelli Cables North America*, присвячена розробленню надпровідної кабельної системи. У всіх цих областях при використанні ВТНП проводів досягнуті значні успіхи.

Перед конкуруючими фірмами світу стоїть завдання першими вийти на освоєння промислового виробництва ВТНП проводів другого покоління (2G) високої якості з вартістю (до кінця десятиліття), меншою або рівною 10 дол. / 1 кА·м. Тривалий час більш значні успіхи на цьому шляху демонстрували фірми Японії, завдяки все зростаючим урядовим інвестиціям. Для того щоб перехопити ініціативу, у США на додаток до діючої програми Міністерства енергетики *Superconductive Partner Initiative (SPI)* – „Партнерська ініціатива в галузі надпровідності” відкрите фінансування програми *Accelerated Coated*

Conductor Initiative (ACCT) – „Ініціатива прискороного освоєння плівкових проводів”.

Перед Національними лабораторіями США було поставлене завдання пошуку оптимальної технології ВТНП проводів другого покоління. Кожна із трьох лабораторій – Лос-Аламоська (*LANL*), Окриджська (*ORNL*) і Аргонська (*ANL*) – розробляла незалежні методи її рішення. У результаті *SuperPower, Inc.* вибрала своїм партнером *LANL*, підписавши з нею в 1999 р. угоду про безоплатну передачу розробленої технології (відповідно до політики, проведеної Міністерством енергетики США). Зі свого боку, Міністерство енергетики виділило *LANL* в 2001 р. 2,6 млн дол. (у тому числі 1,9 млн дол. на капітальні витрати) для доведення технологічного процесу до стадії масового виробництва стрічкових проводів ітрієвої системи (YBaCuO).

Друга американська компанія *AMSC* у червні 2004 р. уклала контракт із Агентством з перспективних оборонних дослідницьких проектів (*DARPA*) на розроблення ВТНП проводів другого покоління з високими характеристиками для оборонних цілей (системи електронної протидії і електронні системи для озброєнь). Об'єм фінансування – 3,1 млн дол. на 3 роки. Мета проекту – знизити вартість проводів другого покоління при збереженні високих електричних параметрів. Хоча технологія, що фінансується, призначається для проводів спеціального призначення, заплановані поліпшення дадуть безпосередню вигоду при використанні ВТНП проводів другого покоління.

Контракт є частиною програми *DARPA „Superconducting Hybrid Power Program”*, метою якої є розроблення потужних криогенних енергосистем більш компактного об'єму і меншої ваги при кращій ефективності в порівнянні із традиційними енергосистемами. Поряд із *AMSC*, окремі контракти в рамках цієї програми укладені з Дослідницькою лабораторією ВМС США *NRL (Navy Research Laboratory)*, Окриджською і Лос-Аламоською національними лабораторіями.

Укладанню контракту з *AMSC* сприяли її помітні успіхи в досягненні рекордних характеристик проводів другого покоління в безперервному процесі.

AMSC придбала ліцензії на *RABiTS* процес підготовки текстурованої підкладки в *ORNL* і в Масачусетському технологічному інституті *MIT (Massachusetts Institute of Technology)* на *MOD* процес формування надпровідного YBCO покриття. До того ж *AMSC* самостійно розробила і запатентувала нанотехнологічний процес створення точкових дефектів (наноточок) у надпровідному покритті для посилення пінінгу магнітного потоку, що привело до значного зростання густини критичного струму.

У Японії в розробленні ВТНП проводів другого покоління зайняті фірми *Toshiba, Furukawa, Sumitomo Electric Industry, Fujikura, Showa Electric Cables*. Наукову підтримку розроблень здійснює *ISTEC-SRI* (Міжнародний центр надпровідних технологій, Лабораторія досліджень з надпровідності). При цьому центрі створений спеціальний підрозділ з розроблення покритих проводів – *Nagoya Coated Conductor Center*. На відміну від підходу, що панує у США – *PLD* та *IBAD*, – японські фірми освоїли процес осадження ВТНП покриття з парів металоорганічних сполук – *MOCVD*. Як буферний шар вони використовують $GdZrO$, а в якості ВТНП покриття досліджують сполуку $HoBaCuO$.

Японський проект *Super-ACE*, розпочатий у 2000 р. і закінчений у 2005 р., був спрямований на дослідження та розвиток фундаментальних технологій НП електроенергетичного устаткування змінного струму і просувався за фінансовою підтримкою *METI* та *NEDO*. Його метою був розвиток технологій виробництва ВТНП кабелів, струмообмежувачів, магнітів для реакторів та трансформаторів. Проект цей складався з чотирьох напрямків і був розподілений між 13 компаніями та корпораціями, членами Асоціації технічних досліджень НП обладнання і матеріалів *Super-GM (Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials)*.

Для просування надпровідних технологій у промисловість у Німеччині в 1999 р. був створений консорціум *Trithor GmbH*. Власником акцій консорціуму є *MVV Energie AG*, фірма – постачальник електроенергії у споживчій мережі Німеччини. У 2004 р. консорціум став лідером у Європі як виробник ВТНП проводів 1-го покоління. Консорціум постачає багатожильні $Bi-2223/Ag$ проводи довжиною до 1200 м в одному куску (поперечний переріз 4,1 мм x 0,22 мм) на струми 50, 60, 70, 80, 90 А (77 К, у власному полі). Наприкінці 2003 р. консорціум одержав 2 млн євро від Європейської комісії (*EU Commission*) на створення промислового виробництва ВТНП проводів 2-го покоління.

У 2005 р. у Росії був розроблений проект синхронного ВТНП генератора на 200 МВт на напругу 220 кВ (ВНДІ Електромаш). Крім того, фахівцями Інституту електрофізики і електроенергетики Російської академії наук (ІЕЕ РАН) розроблений проект високовольтного синхронного генератора з використанням високотемпературної надпровідності для вітроенергетичної установки, розташованої на платформі в океані.

Починаючи з 1995 р., у Центрі надпровідних електричних машин і пристроїв Московського авіаційного інституту (МАІ) в кооперації із провідними науковими центрами Росії і Німеччини ведуться розроблення криогенних електричних машин з масивними ВТНП елементами з $YBCO$ кераміки з охолоджен-

ням рідким азотом (77 К).

На основі цих робіт фірмою „*Oswald Elektromotoren GmbH*” у кооперації з МАІ був створений і успішно випробуваний реактивний ВТНП двигун потужністю 250 кВт. Дослідження показали, що застосування ВТНП елементів дозволяє істотно збільшити магнітну анізотропію ротора машини, недосягну при використанні традиційних електротехнічних матеріалів.

В останні роки (2004–2007) у МАІ ведуться розроблення електричних двигунів з використанням масивних ВТНП елементів і постійних магнітів на основі рідкоземельних елементів. Перші експерименти довели, що такі ВТНП двигуни будуть мати у 1,5–2 рази більш високі масоенергетичні показники в порівнянні з реактивними ВТНП електродвигунами.

У рамках німецько-російського проекту „*High Dynamic HTS Motor*” фірмою „*Oswald Elektromotoren GmbH*” разом з МАІ розроблений, виготовлений і проходить технологічні випробування високооборотний чотирьох полюсний ВТНП синхронний двигун потужністю близько 500 кВт із радіальними рідкоземельними магнітами та масивними YBCO елементами в роторі. Двигун розроблений для використання в автомобільних компаніях Німеччини як привід для випробувань і тестування кузовів нових легкових автомобілів.

За замовленням Роснауки у 2006 р. науково-дослідними колективами Санкт-Петербурга, Москви і Єкатеринбурга (Росія) було закінчено виготовлення дослідної енергетичної установки потужністю 50 кВт. Науковий керівник цих робіт – член-кореспондент РАН Чубраєва Л.І.

Електроенергетична установка складається із ВТНП синхронного генератора, ВТНП трансформатора, ВТНП кабелю і синхронного електродвигуна із ВТНП елементами. Генератор живить електродвигун через знижувальний трансформатор і напівпровідниковий перетворювач, для передачі енергії використовується ВТНП кабель. На сьогоднішній день виготовлені і випробувані в непрямих режимах усі компоненти установки. В конструкції усіх елементів електроенергетичної установки активно використовуються аморфна сталь, висококоерцитивні магніти і інші високотехнологічні матеріали.

Результати досліджень установки представляють інтерес, як для загальнопромислової, так і для спеціальної електроенергетики.

Хотілося би зауважити щодо програми з використання надпровідності в різних електромеханічних пристроях. Останнім часом до неї, крім організацій США, Японії, Німеччини, Франції, Росії, що вже давно працюють в цій галузі, активно підключилися нові – з Китаю, Південної Кореї, Індії, Бразилії, які досягли у цьому напрямку значних успіхів.

Одна з найбільш успішних країн у розробках і наступній комерціалізації надпровідникових технологій для промисловості, енергетики і транспорту, є Південна Корея. Головною рушійною силою цих успіхів є програма *DAPAS*, спрямована на розроблення в області прикладної надпровідності для потреб електроенергетики. Про початок програми *DAPAS* було оголошено ще у 2001 р. Відповідно до первісного плану, програма *DAPAS* була розбита на три фази: розроблення технології (2001–2003 рр.), створення дослідних зразків (2004–2006 рр.) та перехід до промислового виробництва (2007–2010 рр.). Програма *DAPAS* фінансується *MOST* (*Ministry of Science and Technology*) і *MOCIE* (*Ministry of Commerce, Industry and Energy*). Об'єм фінансування за 2001–2010 рр. складає – 146 млн дол. (100 млн дол. з бюджету та 46 млн дол. – промислові інвестиції). Для керування програмою *DAPAS* був створений спеціальний центр *CAST* (*Center for Applied Superconductivity Technology*).

У програмі *DAPAS* беруть участь провідні корейські інститути і університети: *KERI* (*Korea Electrotechnology Research Institute*), *KAIST* (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*), *KIMM* (*Korea Institute of Machinery and Materials*), *KPU* (*Korea Polytechnic University*), *YU* (*Yonsei University*), *SNU* (*Seoul National University*), а також компанії: *Hyundai*, *Doosan*, *LS cable*, *LSIS Co*, *CVE*, *KISWIRE*. Перша фаза програми *DAPAS* офіційно завершилася в липні 2004 р. Були виготовлені і випробувані макетні зразки 30-метрового трифазного ВТНП кабелю на 50 МВА і 22,9 кВ, однофазного ВТНП трансформатора на 1 МВА і 22,9 кВ, струмообмежувача на 6,6 кВ і 200 А на основі YBCO тонких плівок на сапфіровій підкладці, а також ВТНП електродвигуна потужністю 100 к.с.

Спочатку програма *DAPAS* не торкалася розробки технології виробництва ВТНП провідників, однак незабаром після початку робіт з'ясувалося, що реалізувати проект у повному об'ємі можна тільки на основі ВТНП провідників 2-го покоління, для чого були розпочаті відповідні технологічні дослідження. До 2007 р. у *KERI* було розроблено технологію виробництва ВТНП провідників 2-го покоління за технологією *IBAD/PLD* на підкладці зі сплаву Хастеллой (*Hastelloy*). Розроблення технології (особливо процесу *IBAD-YSZ Ion Beam Assisted Deposition Yttrium Stabilized Zirconia*) велося при активній участі європейської компанії *EHTS* (*European High Temperature Superconductors GmbH & Co. KG*, Німеччина). Незважаючи на спорідненість використовуваних технологічних процесів роботи *KERI* не є копіюванням досягнень *EHTS*. Зусилля *KERI* зосереджені на створенні високопродуктивного технологічного устаткування, що у майбутньому може скласти серйозну конкуренцію сьгоднішнім світовим лідерам. У 2004–2007 рр. на роботи зі створення ВТНП

лідерам. У 2004–2007 рр. на роботи зі створення ВТНП провідників 2-го покоління було виділено біля 11 млн дол., вся Корейська програма з розроблення технології ВТНП 2-го покоління оцінюється у 32 млн дол. Однак, розраховувати в найближчому майбутньому на промислове виробництво ВТНП стрічок 2-го покоління, порівнянне з потужностями компаній *SuperPower* і *American Superconductor*, поки не доводиться.

Для другої фази програми *DAPAS* ВТНП провідник закуповується у США, а розмір цих закупівель настільки великий, що впливає на ціни і строки поставок ВТНП матеріалів для інших споживачів.

У Китаї швидко відбувається розвиток промислового виробництва ВТНП проводів. Над створенням Ві-2223 провідників у срібній матриці працює цілий ряд наукових центрів Китаю: Пекінський фізичний інститут Китайської академії наук, Дослідницький інститут кольорових металів, Шанхайський університет, Університет електроніки і технології (м. Ченду) і т.д.

Протягом 9 років китайська компанія *InnoST* виготовляє ВТНП провідники на основі Ві-2223 у срібній матриці у промислових масштабах, річний об'єм виробництва ВТНП матеріалів у Китаї вже досяг 300 км на рік.

У 2002 р. у Китаї були розпочаті роботи зі створення та прокладення трифазного ВТНП кабелю потужністю 121 МВА на напругу 35 кВ довжиною 33,5 м. Кабель був виготовлений китайською компанією *InnoPower* з ВТНП провідника на основі Ві-2223 виробництва *InnoST*. Кабель виконаний з „теплим” діелектриком, кожна фаза у власному кріостаті (гнучки кріостати виробництва компанії *Nexans*). У 2004 р. усі роботи зі створення і прокладення кабелю були завершені, і з того часу кабель працює без перебоїв по цей час.

Інший кабельний проект – трифазний ВТНП кабель *Gansu Changtong* довжиною 75 м, виготовлений в Електротехнічному інституті (*IEE*) Китайської академії наук з Ві-2223 проводів у срібній матриці виробництва компанії *AMSC*. Цей кабель також виконаний з „теплим” діелектриком, кожна фаза розміщується у власному гнучкому кріостаті. Робоча напруга і струм кабелю складають 10,5 кВ і 1,5 кА. ВТНП кабель успішно експлуатується в мережі з 2004 р.

Заслуговує на увагу розроблений в *IEE* сумісно з китайською компанією *Terbian Electric* ВТНП трансформатор потужністю 630 кВА (10,5 кВ/400 В), виготовлений за схемою з „теплим” магнітопроводом з ВТНП на основі Ві-2223 у срібній матриці виробництва *AMSC*.

Компанія *InnoPower* розробила, виготовила і провела випробування ВТНП струмообмежувача індукційного типу з насиченим магнітопроводом з номінальною потужністю 90 МВА і робочою напругою 35 кВ. Струмообмежу-

вач установлений на тій же підстанції, що і ВТНП кабель *InnoPower* на 35 кВ і 121 МВА.

Окрім описаних вище ВТНП виробів, у Китаї ведуться роботи над цілою низкою електротехнічних пристроїв:

- ▼ судовий гребний двигун потужністю 365 кВт (сумісно з японською компанією *Fuji*);
- ▼ ВТНП струмообмежувач резистивного типу на 10 кВ і 1,5 кА;
- ▼ ВТНП індуктивні накопичувачі енергії на 35 кДж і 1 МДж;
- ▼ магнітні підвіси для транспорту і т.д.

В останні роки китайські розроблення в галузі ВТНП технологій знаходяться на підйомі, інтерес учених та інженерів до величезних можливостей цих технологій постійно зростає. У травні 2008 р. китайськими вченими були відкриті нові ВТНП матеріали на основі арсенідів заліза – оксипніктиди і сполуки цієї групи на основі Gd, Sm і Pr з критичною температурою до 52 К.

На Україні, зокрема, у Харкові свого часу була зосереджена велика навчально-науково-виробнича база в галузі криогенного електромашинобудування, до якої належали:

- Фізико-технічний інститут низьких температур (ФТІНТ) АН України та його СКБ;
- Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, що випускав фахівців з прикладної надпровідності;
- завод „Електроважмаш” та ін.

Фахівцями цих організацій розроблялася ціла низка проектів електромеханічних пристроїв з надпровідними елементами. Але, на жаль, ці роботи, і то не у повному обсязі, поновлюються тільки зараз.

За оцінками Всесвітнього банку обсяг продажів надпровідного устаткування у світі зростає з 1,7 млрд дол.

у 2000 р. до 244 млрд дол. у 2020 р. [2] (рис. В.2) [3, с.110]. В той же час широкому практичному використанню явища надпровідності в електромеханіці перешкоджають наступні фактори:

* надпровідники виявляють свої чудові властивості тільки при криогенних температурах;

* існують критичні вели-

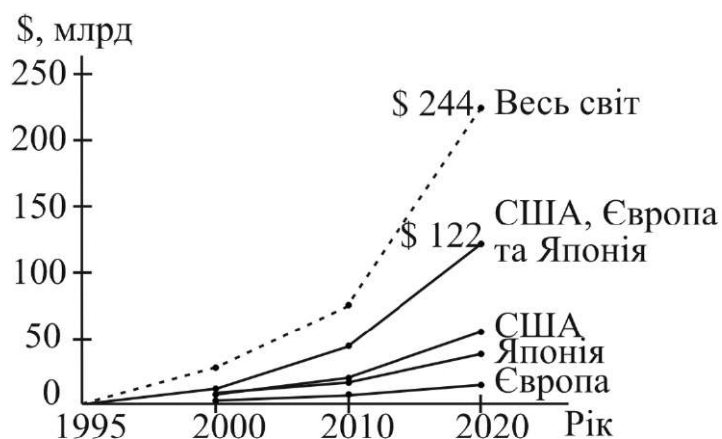


Рисунок В.2 – Розподілення ринку надпровідного електротехнічного устаткування

чини густини струму і магнітного поля, при перевищенні яких відбувається перехід у нормальний стан з появою високого опору;

- * надпровідні проводи поки що достатньо дорогі, бо виробляються з особливих матеріалів і являють собою складну конструкцію;

- * необхідне застосування спеціальних кріогенних зріджувачів і холодоагентів, кріостатів і іншого допоміжного устаткування для функціонування надпровідних елементів пристрою;

- * паралельно відбувається постійний розвиток і удосконалення електромеханічних пристроїв, що використовують традиційні провідникові матеріали, які є альтернативою надпровідниковій технології;

- * існують значні технологічні, технічні і фінансові проблеми, пов'язані з використанням надпровідників.

Однак із часом багато з цих проблем успішно вирішуються. Так, у цей час розроблені компактні, з більшим ресурсом безперервної роботи мікроохолоджувачі широкого спектра температур, починаючи з гелієвих, на основі циклів Гіффорда-Макмагона і Стірлінга. Їхня надійність наближається до надійності побутових холодильників.

Використання рідкого азоту замість гелію багато в чому вирішує проблему комерційної привабливості надпровідних пристроїв. Так, на відведення одного вату тепла з рівня гелієвої температури (4,2 К), потрібно близько 1 кВт потужності зріджувача, у той час як для відведення одного вату тепла з азотного рівня температури (77 К) потрібно менше 10 Вт потужності зріджувача. При цьому необхідно враховувати, що вартість одного літра рідкого гелію становить приблизно 5 дол., а рідкого азоту 0,022 дол., до того ж значно спрощуються системи теплоізоляції, кріостатування, компенсації термонапруг, передачі електродинамічних зусиль із холодної в теплу зону, захисти надпровідного вузла при нестабілізованому переході в нормальний стан. Усе це сприяє зниженню вартості і підвищенню надійності електромеханічного пристрою.

Слід відзначити, що вибір матеріалу надпровідника хоча і впливає на конструкцію пристрою, але не настільки, щоб повністю визначати її і не залишати шляхів до удосконалення. Незважаючи на існуючі проблеми, багато розроблювачів надпровідних пристроїв починають орієнтуватися на ВТНП матеріали, оскільки в цьому випадку техніко-економічні переваги стають незаперечними в порівнянні із традиційними „теплыми” пристроями. Однак і НТНП, незважаючи на необхідність охолодження відносно дорогим рідким гелієм, також не втрачають привабливості для практичного застосування, у першу чергу тому, що на сьогоднішній день їхнє виробництво добре налагоджене і є значно

менш затратним. На рис. В.3 подано графік очікуваних перспектив і стадії практичного застосування як НТНП, так і ВТНП [4].

На рис. В.3 реалізовані і прогнозовані застосування НТНП і ВТНП позначені таким чином: 1 – контроль технологічних процесів; мікронакопичувачі енергії; 2 – прилади на основі сквідів; магніти для прискорювачів; магнітні томографи; 3 – обробка аналогових сигналів; 4 – обробка цифрових сигналів; обмежувачі струму КЗ; 5 – транспорт на магнітній подушці, електричні двигуни для кораблів; 6 – великі накопичувачі енергії; 7 – генератори мегавольт-амперного рівня, електродвигуни мегаватного рівня; 8 – електромагнітні двигуни для кораблів; 9 – трансформатори (1 ГВА); 10 – термоядерні реактори; 11 – магнітні екрани; 12 – СВЧ-прилади, проводи; 13 – магнітні підшипники; 14 – оброблення аналогових сигналів, проводи, силові кабелі, двигуни; 15 – обмежувачі струму КЗ, регулятори технологічних процесів, накопичувачі енергії; 16 – мікронакопичувачі енергії, оброблення цифрових сигналів, кабелі (2 ГВА); 17 – транспорт на магнітній подушці, двигуни мегаватного рівня; 18 – генератори мегавольт-амперного рівня; 19 – електромагнітні двигуни для кораблів; 20 – термоядерні реактори, накопичувачі енергії (100 кВт год); 21 – трансформатори гігавольт-амперного рівня, кабелі (5 ГВА).

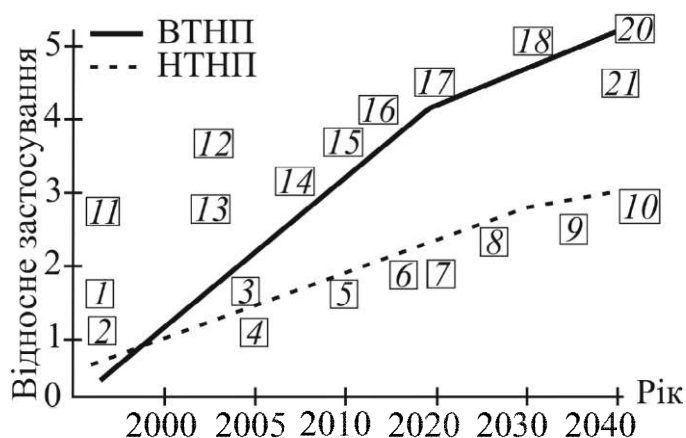


Рисунок В.3 – Реалізовані і прогнозовані застосування НТНП і ВТНП

На рис. В.4 наведено структуру існуючих і потенційних можливостей застосування надпровідникових технологій у різних галузях техніки, а також показано, на якому етапі впровадження знаходяться розробки пристроїв із застосуванням надпровідних вузлів. В електромеханіці це такі пристрої [5]:

- колекторні кріодвигуни постійного струму зі статорною надпровідною багатополусною системою збудження і „теплим” гладким ротором;
- уніполярні двигуни та генератори дискового і циліндричного типу з нерухомими надпровідними обмотками збудження і рідкометалевим струмомозніманням;
- кріотурбогенератори з надпровідним немагнітним ротором і безпазовим „теплим” статором;
- повністю надпровідні кріотурбогенератори без магнітопроводу із зовнішнім електромагнітним екраном;
- надпровідні синхронні двигуни з обертовим явнополусним ВТНП ротором;

- надпровідні гістерезисні і реактивні двигуни із ВТНП ротором;
- лінійні синхронні двигуни для високошвидкісного наземного транспорту на електродинамічному підвісі з надпровідними обмотками збудження, розташованими на екіпажі;
- лінійні електродинамічні двигуни зворотно-поступального руху з постійними магнітами і надпровідною обмоткою керування;
- двигуни, що діють на основі ефекту Мейснера;
- лінійні циліндричні асинхронні двигуни з надпровідною обмоткою статора і якорем, виконаним у вигляді внутрішнього алюмінієвого циліндра, що переміщається при кімнатній температурі;
- трансформатори та ін.

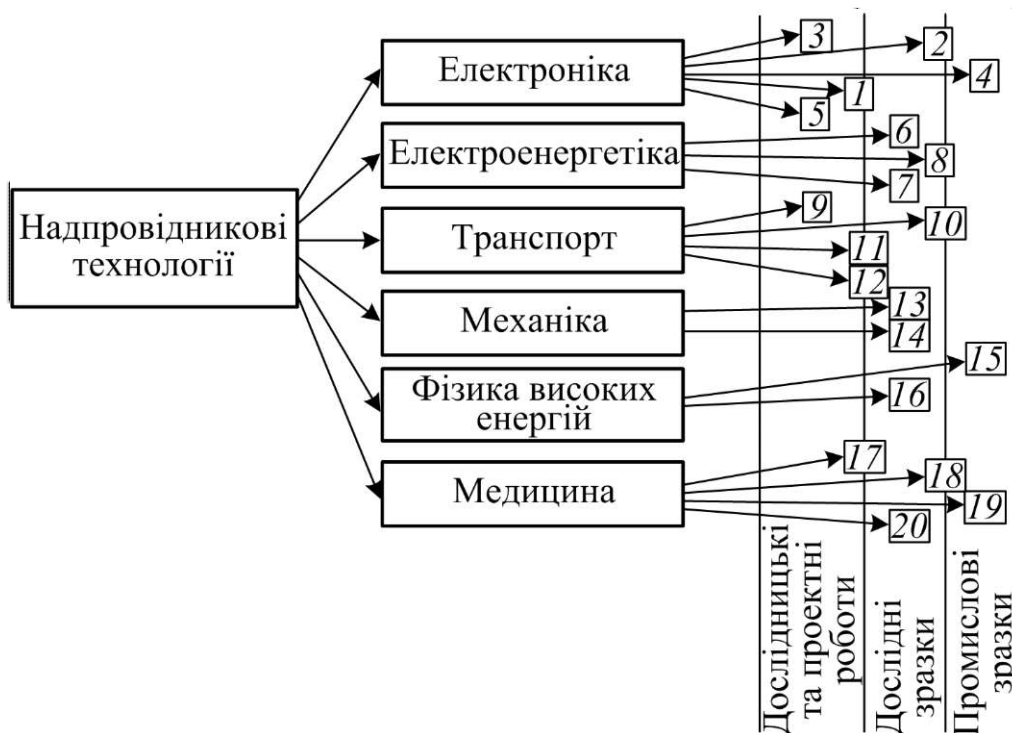


Рисунок В.4 – Стан і галузі застосування надпровідності:

1 – струмовводи; 2 – надпровідні електронні прилади; 3 – обчислювальна техніка на надпровідних елементах; 4 – сквіди; 5 – стільниковий і супутниковий зв'язок; 6 – генератори; 7 – накопичувачі електричної енергії; 8 – силові кабелі; 9 – космічні станції; 10 – транспорт на магнітній подушці; 11 – піднімальні пристрої; 12 – судові електродвигуни; 13 – електродвигуни загального призначення; 14 – магнітні підшипники; 15 – прискорювачі; 16 – синхротрони; 17 – магнітоенцефалографи; 18 – магнітні екрани; 19 – ядерні магніто-резонансні томографи; 20 – магнітокардіографи

Таким чином, із упевненістю можна сказати, що надпровідність у цей час розглядається як одна з найбільш перспективних технологій, що дозволяє істотно поліпшити параметри традиційних електромеханічних пристроїв, а також створювати нові конструкції.

Розділ 1

Надпровідні матеріали

1.1. Загальна класифікація надпровідних обмотувальних матеріалів та технологій їхнього виготовлення

Усі надпровідники умовно можна поділити на низькотемпературні (НТНП) і високотемпературні (ВТНП). До НТНП відносять чисті метали (наприклад, Hg, Pb, Va), сплави (Nb-Ti, Nb-Al) і інтерметалеві сполуки (Nb₃Sn, Nb₃Ge), які стійко працюють лише при температурі, близькій до температури рідкого гелію – 4,2 К. До ВТНП відносять різні керамічні сполуки, здатні працювати при температурі рідкого водню (LaBaCuO, LaSrCaCuO) або азоту (YBaCuO, BiSrCaCuO, TlBaCaCuO, HgBaCaCuO) (рис. 1.1).

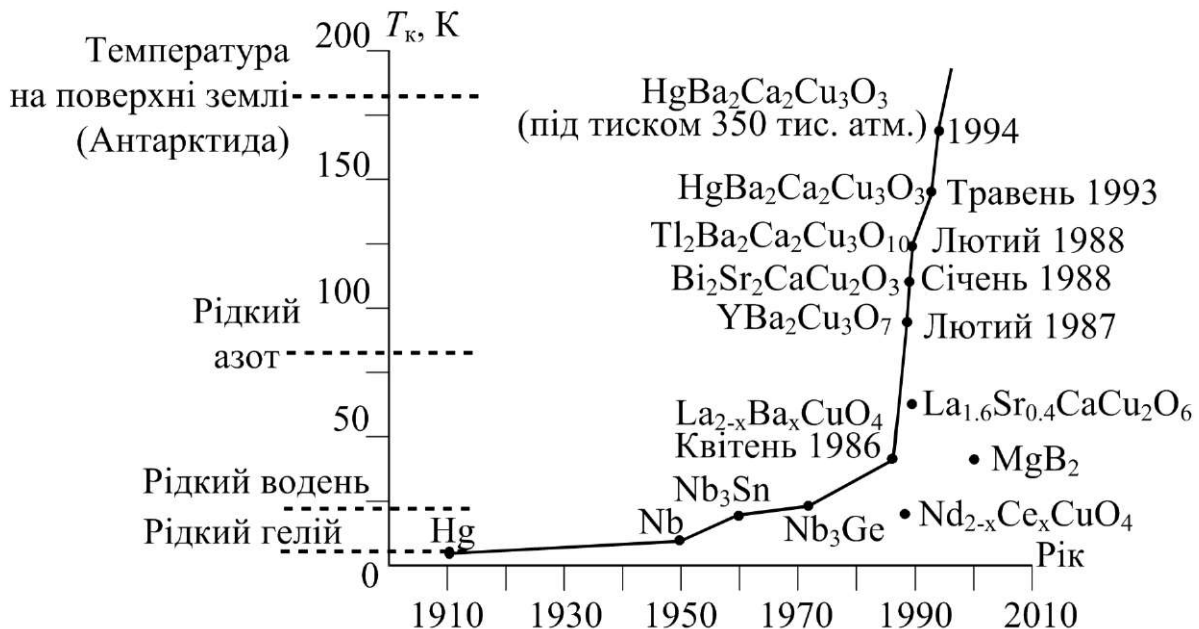


Рисунок 1.1 – Хронологія відкриття НТНП і ВТНП матеріалів

На цей час промислово випускаються комбіновані багатожилінні проводи гелієвого рівня температур, у яких безпосередньо самі надпровідники виконуються у вигляді надтонких жил, розміщених у мідній або алюмінієвій матриці. До основних НТНП проводів відносять:

- деформівний сплав Nb-Ti з такими критичними параметрами: температура $T_k = 9,6$ К при індукції магнітного поля $B = 0$; $B_k = 12$ Тл при $T = 4,2$ К і густина струму $j_k = 3$ кА/мм² при $T = 4,2$ К та $B = 5$ Тл (вартість проводу не перевищує декількох доларів за 1 кА м);

- крихка інтерметалева сполука Nb₃Sn із критичною температурою $T_k = 18,3$ К при $B = 0$; $B_k = 22$ Тл при $T = 4,2$ К; $j_k = 9$ кА/мм² при $T = 4,2$ К і $B = 10$ Тл (вартість цього проводу становить приблизно 10 дол. за 1 кА м).

Через складність і дорожнечу гелієвих систем охолодження пристроїв, в яких використовуються НТНП матеріали, спочатку не знайшли широкого комерційного застосування. Новим стимулом для розроблення з'явилося відкриття у 1986 р. високотемпературних надпровідників і створення в середині 90-х років ВТНП проводів 1-го покоління – багатожильних проводів на основі керамік вісмуткової системи у срібній оболонці, що виготовляють за методом „порошок-у-трубі” (*powder-in-tube*) – *PIT*-технології. Цей технологічний процес складається із трьох етапів:

- 1) заповнення металевої трубки (як правило, зі срібла) ВТНП порошком – прекурсором (попередником) – в основному Ві-системи;
- 2) обтиск і прокатка заповненої трубки;
- 3) багаторазові цикли „відпал – плоска прокатка”.

Стрічкові ВТНП проводи виготовляються на основі таких матеріалів:

- сполука $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ у срібній оболонці (Ві-2212/Ag); її критична температура $T_k \gg 90$ К, критичне поле і струми перевищують аналогічні показники НТНП проводів;

- сполука Ві-2223/Ag має $T_k = 107$ К; $j_k = 100$ А/мм² при $T = 77,3$ К і $B = 1$ Тл. Вартість цього матеріалу становить близько 100 дол. за 1 кА м. Найближчим часом очікується зниження його ціни до 10–15 дол. за 1 кА м, що зробить його конкурентноздатним на ринку надпровідних матеріалів.

Досягнута одинична довжина стрічки 1000–1500 м. Важливим здобутком технології „порошок-у-трубі” є можливість її промислового масштабування. Дослідно-промислове виробництво стрічкових ВТНП проводів на основі Ві-2223 організовано в ряді країн світу, у тому числі і в Росії. Наприклад, у російському ДНЦ ВНДІНМ ім. акад. А. А. Бочвара за технологією „порошок-у-трубі” отримані стрічки Ві-системи довжиною до 250 м (рис. 1.2) [6].

Пристрої на основі ВТНП матеріалів можуть працювати при азотному рівні температур (77 К), що значно спрощує і здешевлює систему охолодження. У результаті в короткий строк були розроблені, виготовлені та випробувані надпровідні прототипи усіх видів електротехнічного устаткування. Однак, експлуатаційні характеристики пристроїв на ВТНП проводах 1-го покоління (*first generation HTSC, 1G*) при температурі рідкого азоту були від-

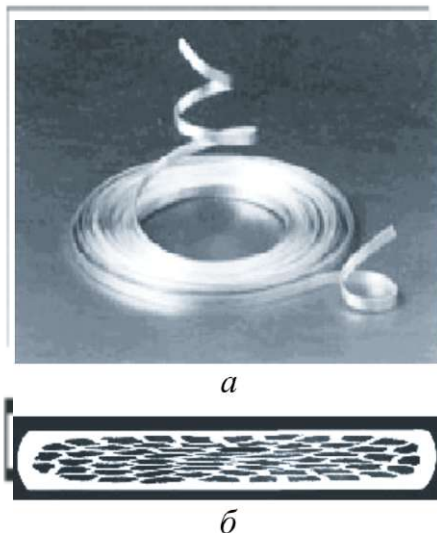


Рисунок 1.2 – Стрічка Ві-2223/Ag, отримана у ВНДІНМ: а – зовнішній вигляд; б – поперечний переріз

носно низькими, а їхня вартість – невиправдано високою (1 кА·м ВТНП проводу 1-го покоління в сотні разів перевищує вартість 1 кА·м мідного провідника). Треба відзначити, що для забезпечення конкурентоспроможності ВТНП виробів загальнопромислового призначення необхідно, щоб вартість проводу не перевищувала 20 дол. за 1 кА м. У США сподіваються вирішити цю задачу шляхом будівництва спеціалізованого заводу з річною продуктивністю 10 тис. км стрічки на рік.

Слід зазначити, що технологія „порошок-у-трубі” має низку недоліків:

1) необхідність деформувати ВТНП матеріал у процесі прокатки (звідси – багаторазові відпали);

2) синтез при високій температурі у присутності кисню;

3) висока крихкість і, як наслідок, складність обробки;

4) струмонесуча здатність отриманих проводів вісмуткової системи падає вже в магнітних полях до 1 Тл, що обмежує їхнє застосування в ряді пристроїв (у табл. 1.1 наведені параметри ВТНП проводів, які, за винятком робочої температури і вартості, справедливі і для НТНП) [7];

5) висока вартість, обумовлена у тому числі і дорожнечою срібної матриці;

6) висока чутливість характеристик проводу до орієнтації провідника через шаруватість структури.

Проте, своє завдання ці матеріали виконали – на прототипах виготовлених пристроїв (кабелів, трансформаторів, обмежувачів струму, двигунів і генераторів) доведена принципова перевага потужнострумових ВТНП пристроїв перед традиційними „теплыми”.

Паралельно з технологією „порошок-у-трубі” на провідних фірмах освоєна і у теперішній час наближається до промислового рівня технологія виготовлення ВТНП проводів 2-го покоління (*second generation HTSC, 2G*), так звана „покривна” (*coated*) технологія (у російській практиці більше затвердився термін „плівкова технологія” і, відповідно, плівкові проводи). Перший провід 2-го покоління було виготовлено в 1995 р. у США фахівцями з Лос-Аламоської та Окріджської національних лабораторій (*Los Alamos National Laboratory (LANL)* і *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*). Він був дуже коротким – усього лише 2,5 см. Тривалий час не вдавалось знайти спосіб належної орієнтації зерен $YBaCuO$ на всій довжині проводу. Тепер це завдання вирішене: ВТНП плівкові покриття (на базі ітрієвої системи, тобто ВТНП на основі сполуки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$) осаджуються на довгі металеві стрічки в безперервному процесі. У даному процесі виключається процедура деформації ВТНП матеріалу. Технологічні етапи отримання ВТНП проводів 2-го покоління подані на рис. 1.3 [8].

Таблиця 1.1 – Промислові вимоги до ВТНП проводів для застосування в різних пристроях [3, с.13]

Застосування	Вимоги до ВТНП матеріалу							
	J_k , А/см ²	B , Тл	T , К	I_k , А	Довжина, м	Деформація, %	Радіус вигину, м	Вартість, дол./кА·м
Генератор 100 МВт	$5 \cdot 10^4$ ^(а)	4–5	20–50	500–1000	500–1000	0,2	0,1	10
Обмежувач струму	10^4 – 10^5	0,3–3	40–47	10^3 – 10^4	1000	0,2	0,1	10–30
Двигун (1000 к.с.)	10^5	2–4	25–77	100–500	1000	0,2–0,3	0,05	10
Магнітний накопичувач енергії, 1 МВт·год	10^5	5–10	20–77	10^4	1000	0,2	1	2–5
Кабель	10^4 – 10^5	<0,2	65–77	25 – 30 ^(б)	100	0,4	2 ^(в)	10 – 100 ^(г)
Трансформатор	10^4 – 10^5	0,1	20–77	200–1400	1000	0,2	0,2	10

(а) густина струму для окремих надпровідних жил;

(б) струм для окремого проводу; кабель, що містить багато проводів, повинен нести струм близько 10 кА;

(в) для кабелю;

(г) ціна 100 дол./кАм припустима тільки в надзвичайних ситуаціях.

Цей технологічний підхід нанесення тонкоплівкових шарів був розроблений в *ORNL* і отримав назву *RABiTS* (*rolling assisted biaxially textured substrate* – біаксіальне текстурування підложки спеціальною прокаткою).

Для виробництва ВТНП проводів 2-го покоління поряд з технологією *RABiTS* використовують також технологію *IBAD* (*Ion Beam Assisted Deposition* – іонно-променево осадження), розроблену японською фірмою *Fujikura* і удосконалену співробітниками *LANL* (США) [9].

Найбільше розповсюдження у США отримали технології виробництва ВТНП стрічок 2-го покоління, розроблені в національних лабораторіях *LANL* і *ORNL* (рис. 1.4). Вони „взяті на озброєння” найкрупнішими фірмами (*SuperPower* і *American Superconductor*), які вже успішно почали комерційну реалізацію перших партій стрічок. Привертає до себе увагу складність буферних шарів у цих архітектурах: на сплаві Хастелой використовують п'ять різних покриттів, на текстурованому нікелевому сплаві – три.

Технологія компанії *SuperPower* застосовує у якості підложки електрополіровану стрічку з Хастелою (сплав на основі нікелю із добавками хрому, молібдену і ряду інших елементів). Хастелой є міцним, немагнітним сплавом та має високий питомий опір, що знижує втрати на змінному струмі. Міцність

сплаву дозволяє працювати на стрічці-підложці товщиною 50 мкм, отже товщина провідника складає у результаті всього 95 мкм.

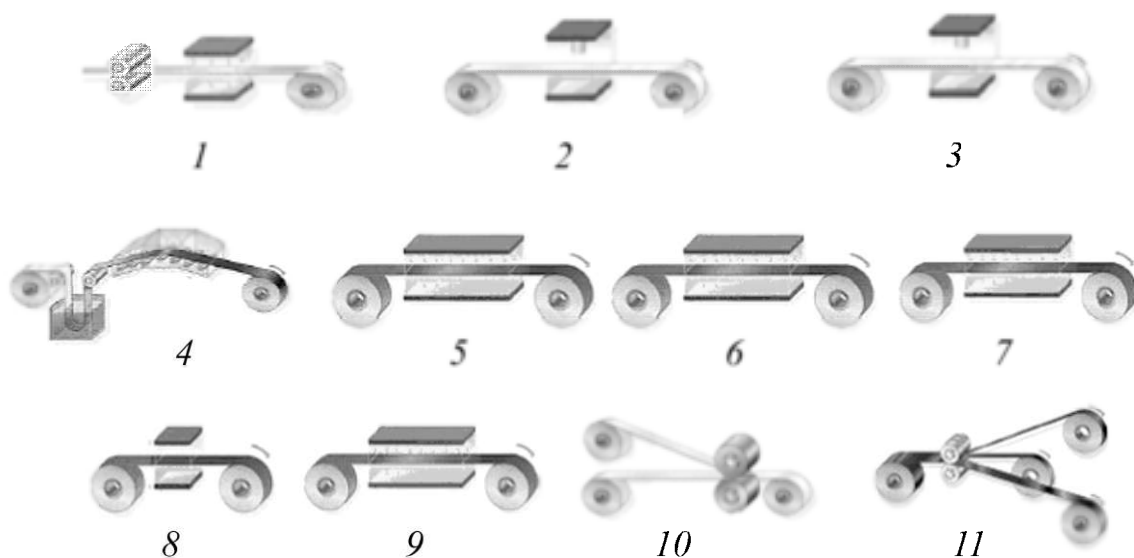
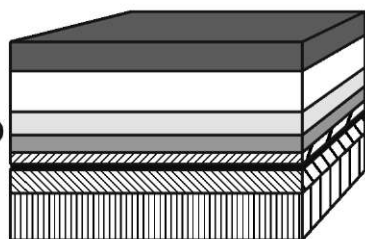


Рисунок 1.3 – Технологічні етапи отримання ВТНП проводів 2-го покоління:

1 – виготовлення стрічки – підложки; 2 – наноструктурування поверхні підложки; 3 – осадження буферного шару; 4 – покриття прекурсором YBCO; 5 – розкладення прекурсору; 6 – наноструктурування поверхні; 7 – формування надпровідного покриття YBCO; 8 – осадження срібла; 9 – термооброблення у окислювальному середовищі; 10 – вирівнювання стрічки; 11 – розрізання стрічки по довжині

LANL, SuperPower

Шунт
ВТНП
30 нм SrTiO₃
20–30 нм MgO
10 нм IBAD MgO
7 нм Y₂O₃
80 нм Al₂O₃
Хастелой С-276



ORNL, AMSC

Шунт (Ag)
ВТНП
75 нм CeO₂
75 нм YSZ
75 нм Y₂O₃
Ni-5 %W

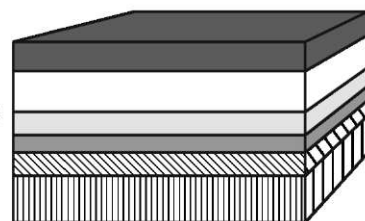


Рисунок 1.4 – Структура плівкових проводів 2-го покоління виробництва LANL і ORNL.

AMSC застосовує у якості підложки біаксіально тукстурований сплав нікелю з 5 ат. % вольфраму товщиною 50–75 мкм. Цей сплав має добрі механічні властивості, стабільну текстуру, достатньо стійку до окислювання, але через феромагнітні властивості у ньому виникають втрати на змінному струмі.

В основу технології ВТНП 2-го покоління покладені методи отримання епітаксіальних (тобто тих, що складаються з монокристалічних зерен заданої орієнтації) оксидних шарів. Епітаксіальні шари необхідно отримувати на надто великій площі: об'єм мікронного покриття на стрічці площею 1 м² становить 1 см³. Методи отримання епітаксіальних покриттів вимагають серйозного на-

укового підходу і нетривіального устаткування, а результат залежить від точності підтримки великої кількості параметрів, при чому для буферного шару і для ВТНП значущими можуть бути зовсім різні аспекти. Це стосується як зовні простої технології розкладання металоорганічних сполук *MOD* (*Metal-Organic Deposition*), так і значно більш складних фізичних методів [10].

Серед методів отримання покриттів можна виділити велику групу фізичних методів:

- ▼ *Pulsed Laser Deposition (PLD)* – імпульсне лазерне осадження,
- ▼ *Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)* – осадження за допомогою іонних пучків;
- ▼ *Inclined Substrate Deposition (ISD)* – осадження на підложку, розташовану під кутом до напрямку осадження;
- ▼ термічний випар і ін.

Усі вони характеризуються використанням досить високого вакууму, через що осадження покриття може відбуватися тільки у прямій видимості від джерела до мішені (*line-of-sight methods*).

У методі *MOCVD* (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition* – хімічне осадження з парів металоорганічних сполук), який відрізняється від інших, осадження відбувається також з газової фази, але при набагато більш високому тиску – від 1 до 20 мбар. Для перенесення летучих речовин (прекурсорів) використовуються газові потоки. Це дозволяє здійснювати осадження на поверхні складної форми і великої площі.

У третю групу входять різновиди методу металоорганічного розкладання *MOD*. Цей метод не потребує вакууму і також дозволяє відносно просто покривати великі площі. В *MOD* процесі використовують рідиннофазний прекурсор – металоорганічний трифторацетат (*TFA*), вперше застосований у Масачусетському технологічному інституті. Прекурсор – суміш розчинів трифторацетатів Y, Ba і Cu у необхідному співвідношенні з бажаною в'язкістю наносять на підложки центрифугуванням (для коротких зразків) або видавлюванням через вузьку щілину (для довгих зразків). Потім покриття проходить термооброблення в печі, де трифторацетати розкладаються і утворюється надпровідна сполука Y-123 товщиною 1 мкм. Процес формування (епітаксціальний, тобто такий, який повторює структуру буферного шару – окису церію і стабілізованого ітрієм окису церію YSZ/CeO) відбувається в 10-метровій печі з безперервною подачею стрічки. Це найбільш дешевий з освоєних на сьогоднішній день процесів отримання проводів 2-го покоління.

Які б результати не дозволяв отримувати обраний метод, згодом на пер-

ший план виходять його продуктивність, вартість покриттів і т.д. Продуктивність фізичних методів можна підвищити, наприклад, збільшуючи розміри джерела або застосовуючи одночасно декілька джерел (*multi-plume approach*) [11]. Підходи, що дозволяють максимально ефективно використовувати зону осадження, подані на рис. 1.5.

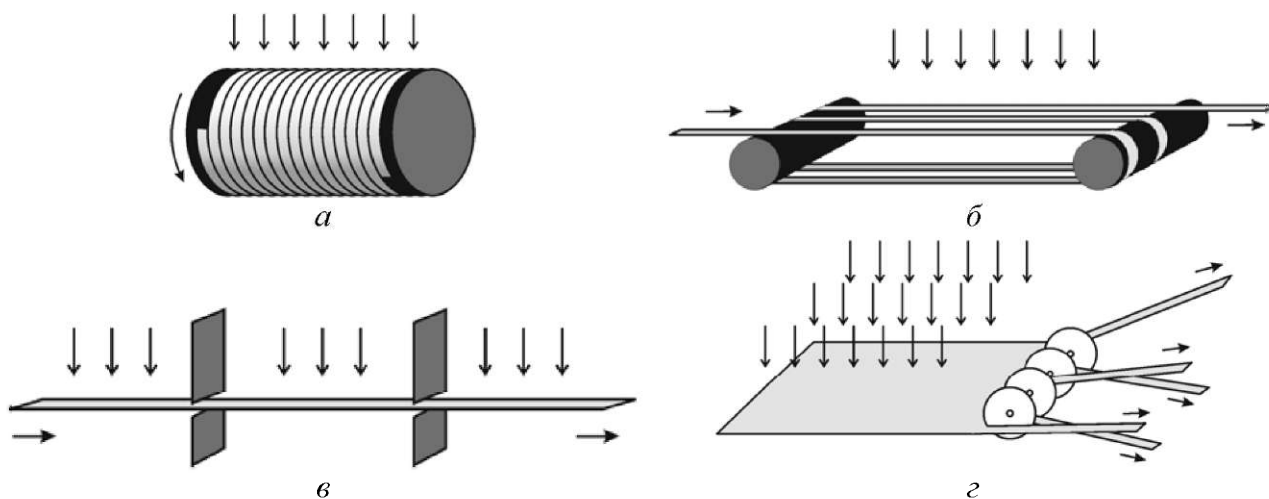


Рисунок 1.5 – Способи підвищення ефективності осадження покриттів у технології ВТНП 2-го покоління (стрілками показані осадження і напрямок руху стрічки)

Перші два способи (рис. 1.5, а, б) найбільш ефективні при використанні фізичних методів осадження. Так, осадження методом випарювання на стрічку, яка намотана на барабан, що обертається (рис. 1.5, а), використовують, наприклад, у Кореї (в інститутах *KERI* та *KAIST*) [12]. Діаметр барабана становить 40 см, довжина 70 см, а вміщає він майже 100 м стрічки. Зона рівномірного осадження становить $25 \times 50 \text{ см}^2$. Схожим чином – у намотаному на барабан вигляді – проводять текстуроутворюючий відпал металеві стрічки у Дрезденському інституті твердого тіла і матеріалів. Використання барабана з намотаною на нього стрічкою дозволяє не тільки підвищити ефективність, але і декілька спростити технологію нанесення (оброблення), тому що таку конструкцію легко рівномірно нагріти у трубчастій печі. Щоправда, максимальна довжина стрічки при цьому обмежена розмірами барабана. До того ж, металева стрічка при високій температурі може змінювати свою форму, тобто прийняти форму спіралі.

Другий спосіб (рис. 1.5, б) часто називають багатопрохідним („*multi-turn approach*”). Його використовують у США, Японії, Кореї для *IBAD*, *PLD* і *MOCVD* технологій. Саме використання цього способу дозволило багаторазово підвищити швидкість осадження покриттів у *SuperPower* (рис. 1.6) [13]. Такий спосіб протягування стрічки висуває серйозні вимоги до її механічних властивостей. За цієї причини його зазвичай застосовують для підложок з нержавіючої сталі або сплаву Хастелой.

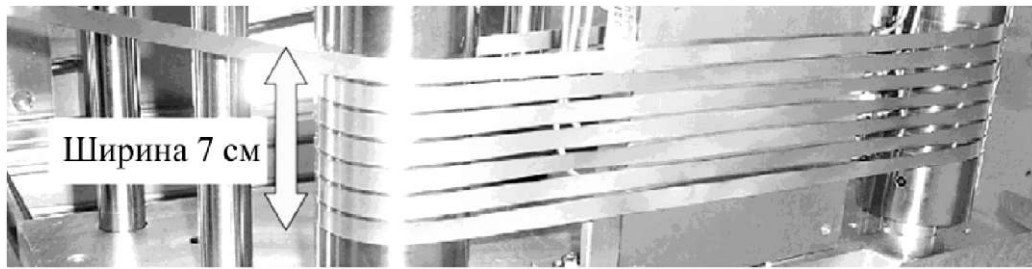


Рисунок 1.6 – Розташування стрічки для багаторазового проходження крізь реактор (*SuperPower*, США)

Третій підхід (рис. 1.5, в) полягає в багаторазовому осадженні на ту ж саму стрічку, що іноді можливо здійснювати в одній системі, якщо встановити одну за одною камери осадження, крізь які послідовно проходить стрічка. Це дозволяє отримувати більш товсті покриття в умовах, оптимізованих для тонких покриттів. Установка такого типу використовується в *Chubu Electric Power Co.* (Японія), а процес має назву „*multiple-stage MOCVD*” [14].

Четвертий підхід (рис. 1.5, г) полягає в осадженні на широку стрічку з наступним розрізанням її на вузьчі. Так, *SuperPower* осаджує покриття на стрічку шириною 12 мм із наступним її розрізанням на три стрічки, а в *AMSC* вже давно освоїли процес отримання покриттів методом *MOD* на стрічку шириною 4 см і планують перехід на стандарт 10 см [15]. Розрізання здійснюють на роликівих ножицях (рис. 1.7) [16].

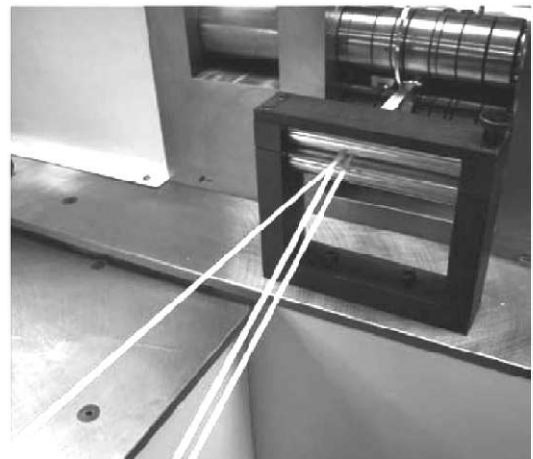


Рисунок 1.7 – Розрізання стрічки на заводі *SuperPower*.

У той час як провідні світові лідери перейшли до виробництва ВТНП 2-го покоління, японська корпорація *Sumitomo* поряд із виробництвом ВТНП стрічок 2-го покоління (на базі сполуки $\text{NbBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, осадження якої можна проводити у менш жорстких умовах, ніж YBCO) продовжує розвивати технологію виробництва вісмутових ВТНП (1-го покоління).

Компанія *Sumitomo* розробила технологію процесу виготовлення ВТНП стрічок на базі Bi-2223 „*Controlled Temperature Over Pressure*” (*CT-OP*) – синтез, що керується високим тиском. У порівнянні із параметрами стрічок, отриманих традиційними методами, критичний струм збільшився на 30 % (130 А замість 100 А), міцність – більше ніж на 50 %, досягнута довжина 1 км, випуск задовільних за параметрами стрічок збільшено у 4 рази. Проводи ці на світовому ринку відомі зараз під назвою *DI-BSCCO* (*drastically innovated BSCCO*).

У табл. 1.2 [17] наведено параметри проводів *DI-BSCCO*, виготовлених за

технологією *CT-OP*. Різниця між проводом з високим I_k та проводом з високою міцністю полягає тільки у вмісті срібла у матриці. При низьких температурах проводи *DI-BSCCO* можуть працювати у високих магнітних полях. Дослідники із *Sumitomo* працюють над проблемою підвищення струмів, що сприятиме зниженню питомої ціни за 1 кА·м. Керівництво компанії вважає, що проводи *DI-BSCCO* ще довго зможуть конкурувати із ВТНП 2-го покоління.

Таблиця 1.2 – Номенклатура проводів *DI-BSCCO* виробництва *Sumitomo* за технологією *CT-OP*

Параметр	Тип проводу	
	з високим I_k	з високою міцністю
Ширина, мм	4,3 ± 0,2	
Товщина, мм	0,22 ± 0,02	
Довжина, м	до 1500	
I_k , А (77 К, власне поле)	140 / 150 / 201	110 / 120
J_i^* , кА/см ² (77 К, власне поле)	14 / 15 / 20	11 / 12
I_k , А (20 К, 2 Тл)	275 / 313 / 375	200 / 250 / 275
J_i^* , кА/см ² (20 К, 2 Тл)	27 / 31 / 37	20 / 25 / 27
Критична міцність на розтягання ^{**} , МПа (20 °С)	100	170
Критична міцність на розтягання ^{**} , МПа (77 К)	160	230
Критичний діаметр вигину ^{**} (20 °С)	70 мм	50 мм
Оболонка	Високоміцний сплав на основі срібла	

* J_i – інженерна критична густина струму (відношення I_k до повного поперечного перерізу проводу);

** при збереженні 95 % I_k .

1.2. Металева основа ВТНП проводів

Виробництво текстурованої металевої стрічки є одним із ключових етапів у ряді технологічних підходів при виготовленні ВТНП проводів 2-го покоління. До металевої стрічки пред'являються наступні вимоги:

- матеріал стрічки повинен мати градецентровану структуру (до металів з такою структурою належать Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, Al, Pb, Rh, Ir, а також багато сплавів на їхній основі);
- технологія холодної прокатки з наступною рекристалізацією повинна приводити до утворення гострої кубічної текстури, що має бути стійкою при високій температурі (відсутність вторинної рекристалізації);
- стрічка повинна мати задовільні механічні властивості (це важливо як при осадженні на ній покриттів при високій температурі, так і при виготовленні кабелю та наступній експлуатації в криогенних умовах);
- для використання на змінному струмі бажано, щоб матеріал стрічки не

виявляв магнітних властивостей при температурі використання ВТНП;

- повинна існувати технологія отримання текстурованих шарів на таких стрічках;
- матеріал стрічки має бути доступний за вартістю.

Відзначимо деякі тенденції розвитку в розробленні текстурованої стрічки на основі нікелю [18, 19]. Оптимальними легуючими елементами для нікелю з деяких міркувань є тугоплавкі перехідні метали V і VI валентних груп періодичної системи. Найбільших успіхів (щодо змінювання магнітних властивостей) вдається досягнути, використовуючи в якості легуючого компонента вольфрам (рис. 1.8). Значна увага приділяється поліпшенню механічних властивостей стрічок, для чого використовується твердо-розчинне зміцнення і застосування біметалічних (багатошарових) стрічок, у яких один із шарів несе на собі механічне навантаження, а зовнішній шар забезпечує відповідну текстуру і стабільність до окислювання.

На цей час проблему важко назвати вирішеною, хоча більшість дослідницьких організацій і компаній-виробників, у тому числі і *AMSC*, віддають перевагу використанню сплаву нікелю з 5 ат. % вольфраму. Цей сплав є своєрідним компромісом, має добрі механічні властивості, стабільну текстуру, досить стійку до окислювання. До його недоліків можна віднести феромагнітні властивості ($T_K = 335 \text{ K}$), що викликають втрати при використанні ВТНП проводів на змінному струмі.

Альтернативою нікелю як матеріалу текстурованих підложок є мідь. Вона не виявляє феромагнітних властивостей, більш проста при обробленні, у декілька разів дешевше нікелю і до того ж чудово текстуредується (кубічна текстура, що утворюється у мідних стрічках, більш гостра, ніж у нікелю та його сплавів). До недоліків міді можна віднести її погані механічні властивості, а також можливість закруглення границь зерен при температурах, необхідних для осадження ВТНП шарів [20].

Однак, отримання ВТНП шару на мідних підложках пов'язане із серйозними технологічними труднощами, які вдалося вирішити дослідникам з *ORNL*

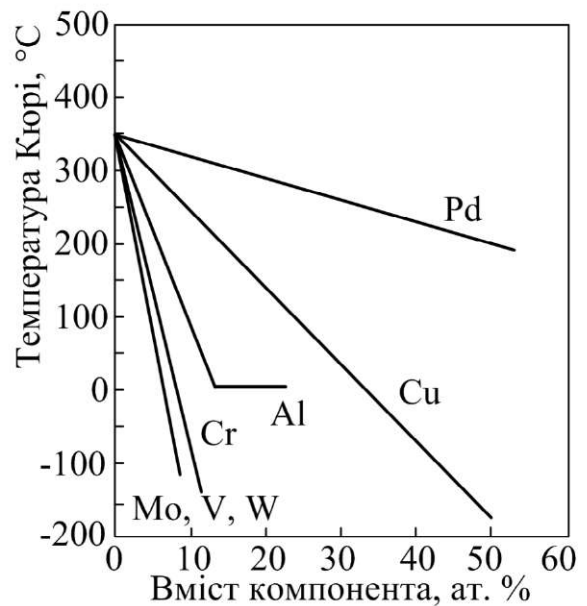


Рисунок 1.8 – Температура Кюрі сплавів на основі нікелю

[19]. Підхід, який ними розвивається (з осадженням в якості першого шару нітриду титану TiN, потім MgO і LaMnO₃), поки ще досить складний, щоб стати масштабною технологією. Властивості різноманітних буферних шарів на текстурованих мідних підложках подані в табл. 1.3 [19–23]. У якості першого буферного шару застосовано або нікель, або нітрид титану.

Таблиця 1.3 – Властивості різноманітних буферних шарів на текстурованих мідних підложках

Буферний шар	J_k (власне поле, 77 К), МА/см ²	J_k (1 Тл, 77 К), МА/см ²	Організація
LaMnO ₃ /MgO/TiN	1	0,03	ORNL
CeO ₂ /YSZ/CeO ₂ /Ni	1,9	0,2	Kagoshima University, Chubu Electric
(La,Sr)MnO ₃ /Ni	2,3	0,4	ORNL
LaMnO ₃ /Ni	1		ORNL

На сьогоднішній день роботи, пов'язані з використанням міді у якості текстурованих підложок, присвячені лабораторним зразкам, виробники ВТНП проводу віддають перевагу сплаву Ni-W.

Достатньо цікавим є розроблення з отримання текстурованих стрічок з витягнутими в напрямку прокатування зернами [24]. Спеціальні умови прокатування і термооброблення стрічки з нікелю, мікролегованого сріблом (0,01–0,05 ат. %), дозволяють отримати текстуровані стрічки з подовженим у напрямку прокатування зерном, при цьому відношення довжини зерна до ширини досягає 3–6 (рис. 1.9). Таким чином, кількість малокутових границь у надпровіднику уздовж стрічки, тобто в напрямку протікання струму, зменшується в 3–6 разів. Це призводить до значного збільшення критичного струму в магнітному полі від 0 до 2 Тл.

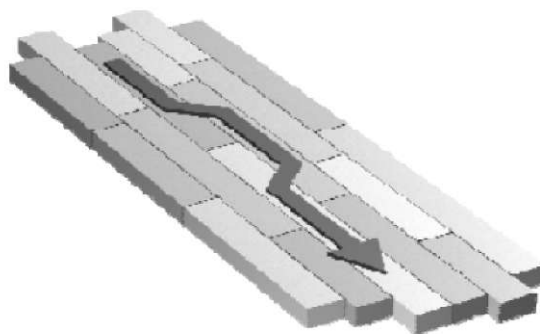


Рисунок 1.9 – Текстурована ВТНП стрічка з витягнутими зернами

Подовження зерен дозволяє зменшити кількість міжзеренних границь на шляху струму. Критичний струм у ВТНП покриттях на таких стрічках помітно анізотропний – у власному полі в напрямку уздовж стрічки він у 4 рази перевищує критичний струм поперек стрічки. Таку мікроструктуру вдалося отримати поки тільки на стрічках з міді та нікелю, мікролегованого сріблом.

Слід відмітити швидкий ріст цін на кольорові метали, що може відіграти свою роль у корекції планів компаній, які виробляють ВТНП провід. Це стосується як вибору матеріалу для стрічки, так і бажаної ціни в 10 дол/кА·м, що

вийшла з порівняння потенційної ціни ВТНП із ціною звичайного мідного провідника. Мідь подорожчала з 2000 р. у 4 рази (основне зростання прийшлося на 2006–2007 рр.), а нікель – більше ніж у 5 разів (рис. 1.10). Щоправда, зараз ціни на нікель та мідь знизились і складають, відповідно, 19 та 6,3 дол./кг.

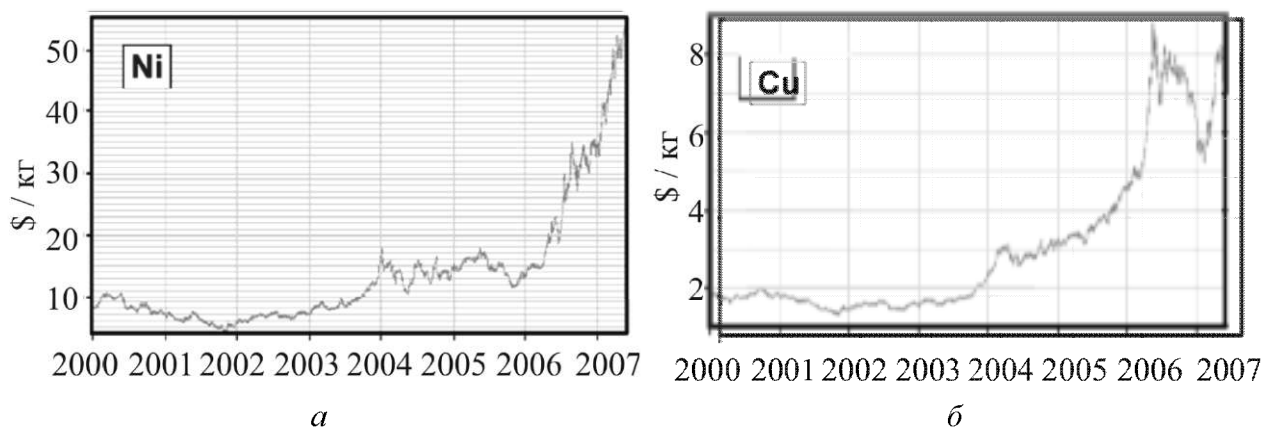


Рисунок 1.10 – Біржові ціни на покупку нікелю (а) і міді (б) за період з 2000 по 2007 роки

1.3. ВТНП обмотувальні матеріали 2-го покоління

ВТНП проводи 2-го покоління можуть забезпечити безумовну економічну вигоду. Їхні експлуатаційні характеристики (густина струму і робоче магнітне поле) при азотній температурі конкурують із низькотемпературними надпровідниками, а вартість при промисловому випуску (за деякими оцінками, більше 3000 км на рік умовного проводу шириною 4,4 мм із критичним струмом 200 А) може бути знижена до рівня вартості мідного провідника (рис. 1.11) [25].

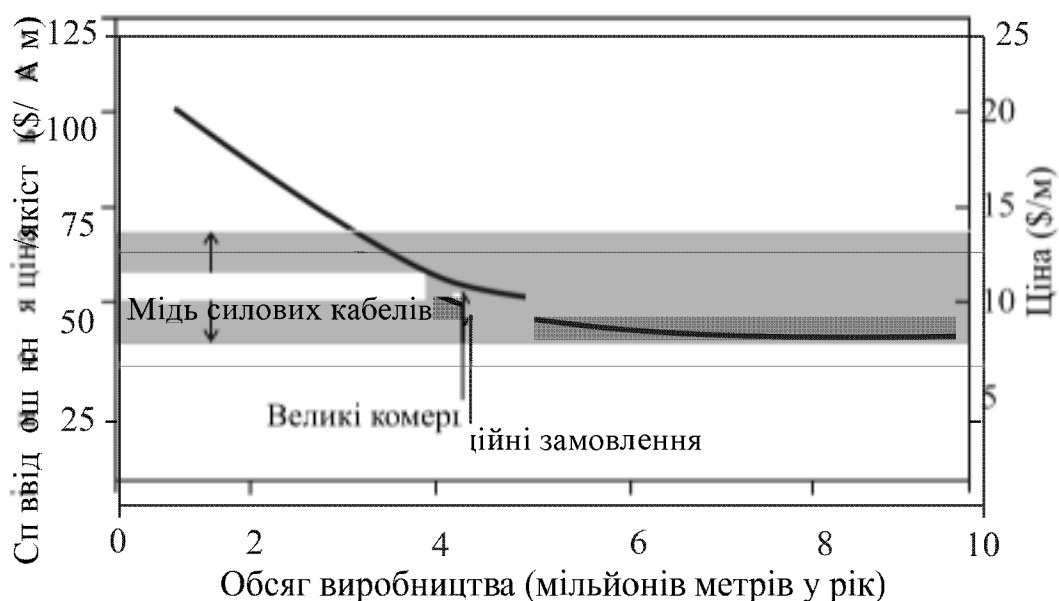


Рисунок 1.11 – Прогноз зниження вартості ВТНП проводів 2-го покоління і початку їхнього інтенсивного комерційного використання (за даними компанії AMSC для умовного проводу „344” зі струмом 200 А)

ВТНП стрічка 2-го покоління шириною 4,4 мм є найбільш популярним продуктом компанії *AMSC* і відома у світі під назвою 344S (3 шари – стабілізатор / ВТНП – стрічка / стабілізатор, ширина 4,4 мм). У якості стабілізатора використовується зміцнена мідь (при застосуванні у котушках або у кабелях) або нержавіюча сталь (при застосуванні у струмообмежувачах).

Характеристики ВТНП проводів 2-го покоління (на основі ітрієвої системи $YBaCuO$) у

порівнянні з ВТНП проводами 1-го покоління ($BiSrCaCuO$) подані на рис. 1.12: густина критичного струму в проводах на основі Y-системи більше ніж у 10 разів перевищує J_c , що досягається у проводах Bi-системи, і залишається на цьому рівні у значно більшому інтервалі магнітних полів.

До кінця 2006 р. ВТНП проводи 2-го покоління поступово перетворилися з об'єкта для відпрацювання ВТНП технології в комерційний продукт. У 2007 р. цілий ряд компаній вже перейшов від відпрацювання технології в лабораторних умовах до напівпромислового виробництва ВТНП 2-го покоління. Американські компанії *AMSC* і *SuperPower* вже тоді мали напівпромислові установки, які здатні були виготовити за добу, відповідно, до 800 м і 1200 м ВТНП стрічки шириною 4,4 мм.

У 2007 р. компанія *SuperPower* оголосила про виготовлення текстурованих підложок для ВТНП проводів 2-го покоління рекордної довжини – 1350 м [26]. Критичний струм ВТНП проводів *SuperPower* (при 77 К) складає 721 А/см – для коротких зразків і 295 А/см – для стрічок довжиною 100 м, чого цілком достатньо для більшості практичних використань (див. табл. 1.1). Поліпшення струмових характеристик проводу *SuperPower* за період з 2001 по 2008 рр. показане на рис. 1.13.

Сьогодні зусилля компанії спрямовані в основному на збільшення продуктивності технологічних процесів і зниження вартості проводів. ВТНП проводи *SuperPower* виготовляються за добре вже відпрацьованою технологією *IBAD* –

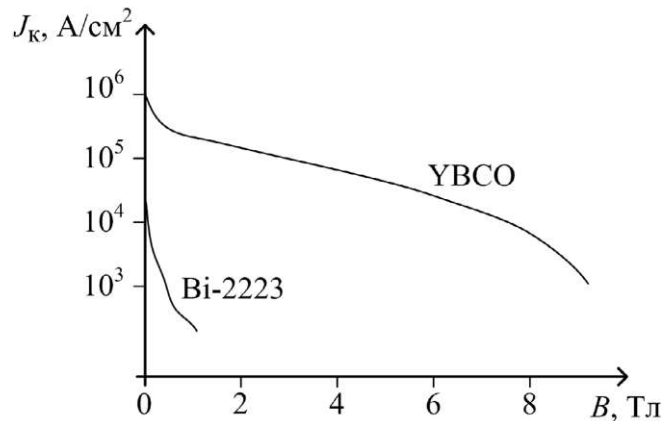


Рисунок 1.12 – Порівняння залежності густини критичного струму від магнітного поля для ВТНП проводів 1-го покоління (Bi-2223 у срібній трубі) і 2-го покоління (біаксіально-текстурованого YBCO на стрічці зі сплаву Хастелой з осадженим буферним шаром товщиною 1 мкм зі стабілізованого ітрієм окису цирконію (YSZ))

напилення на підложку зі сплаву Хастелой п'яти буферних шарів з наступним нанесенням ВТНП шару (рис. 1.14) у процесі *MOCVD*.

Продуктивність технологічного процесу в *SuperPower* (у перерахунку на стрічку шириною 4 мм) на початок 2008 р. була такою: розпилення $Al_2O_3+Y_2O_3$ – 750 м/год, *IBAD MgO* – 360 м/год, розпилення $MgO+LaMnO_3$ – 345 м/год, *MOCVD* 1 мкм $YBCO$ – 180 м/год. Дезорієнтування зерен у шарі LMO, який є основою для ВТНП, становить $6-8^\circ$ на стрічках кілометрової довжини, що є дуже гарним результатом. Зона осадження ВТНП методом *MOCVD* становить $8 \times 80 \text{ см}^2$. Для осадження шару ВТНП товщиною 1 мкм стрічка знаходиться у зоні осадження протягом усього декількох хвилин. Це підтверджує на практиці високу продуктивність методу *MOCVD*.

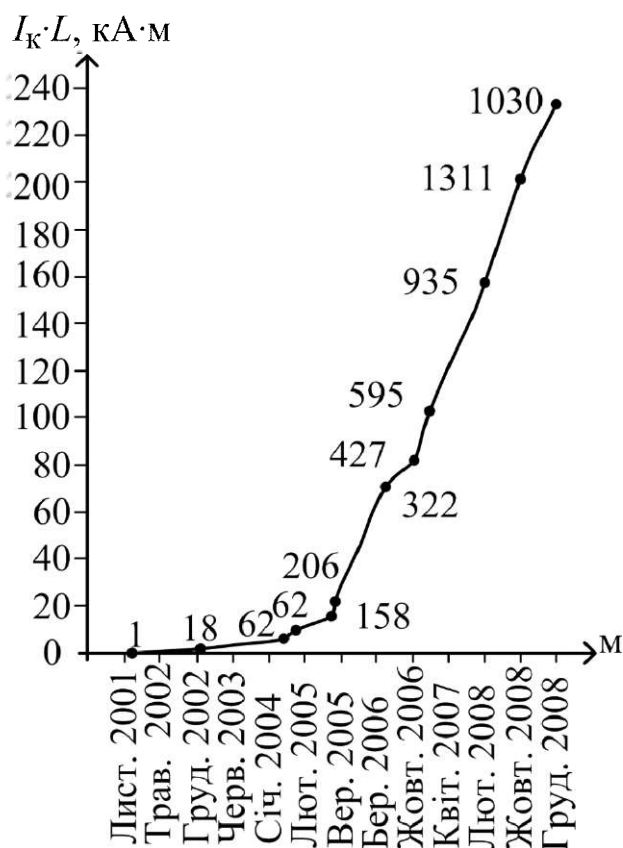


Рисунок 1.13 – Поліпшення характеристик проводу 2-го покоління *SuperPower* (з листопада 2001 р. по кінець 2008 р.)

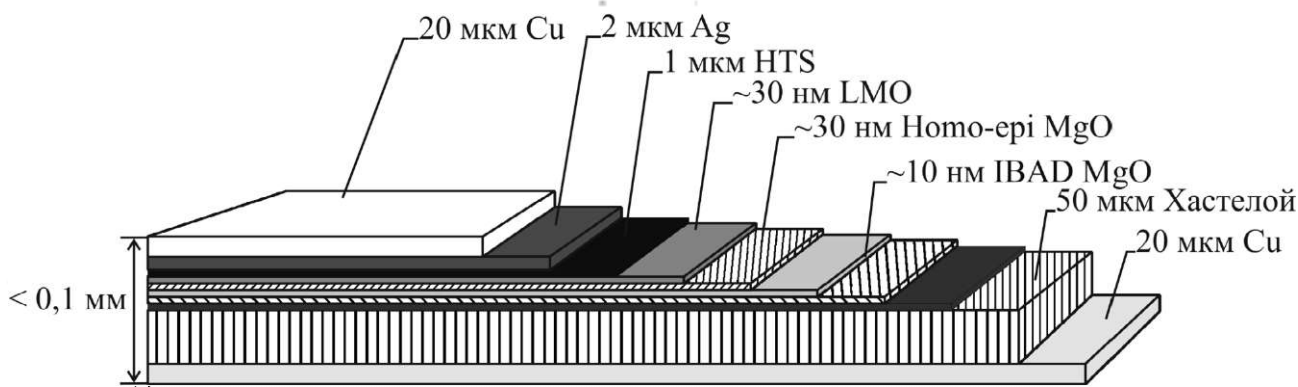


Рисунок 1.14 – Структура ВТНП проводу виробництва *SuperPower*

До кінця 2007 р. компанії *SuperPower* удалося підняти продуктивність технологічного процесу *IBAD/MOCVD* до 350 м стрічки за годину (у перерахуванні на стрічку шириною 4 мм). Якщо прийняти витрати часу на осадження за 45 %, то річна продуктивність заводу *SuperPower* складе 1400 км ВТНП стрічки 2-го покоління. Представники компанії не вважають таку продуктивність граничною і очікують її подальше зростання за рахунок оптимізації технологічного процесу та прискорення процесів осадження.

Компанія *SuperPower* продовжує дослідження заміщення ітрію у сполуці YBCO на інші рідкоземельні елементи (таку сполуку позначають RBCO) та вплив такого заміщення на надпровідні властивості. Для досягнення рекордних характеристик своїх ВТНП проводів *SuperPower* використовує не YBCO, а тверді розчини (Y,Sm)BCO і (Y,Gd)BCO (рис. 1.15) [27]. Густина критичного струму (Y,Gd)BCO відносно (Y,Sm)BCO зростає приблизно на 20 % і досягла для плівок товщиною 0,3 мкм величини 6,6 MA/cm².

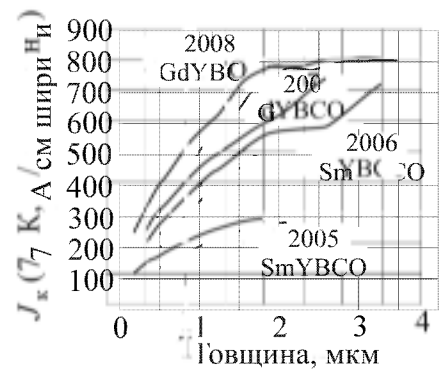


Рисунок 1.15 – Прогрес у підвищенні характеристик товстих плівок RBCO *SuperPower*

У табл. 1.4 відображена інформація про виробничі можливості найкрупніших компаній і властивості їхніх ВТНП стрічок у 2007 р.

Таблиця 1.4 – Виробничі потужності найкрупніших компаній і властивості ВТНП провідників 2-го покоління

Параметри та характеристики	<i>AMSC</i>	<i>SuperPower</i>	<i>EHTS</i>	<i>Fujikura/SRL</i>
Підложка	Сплав Ni-5ат. % W	Хастелой	Нержавіюча сталь ¹	Хастелой
Технологія буферного шару	<i>RABITS</i>	<i>IBAD</i>	<i>IBAD</i>	<i>IBAD</i>
Технологія ВТНП шару	<i>MOD</i>	<i>MOCVD</i>	<i>PLD</i>	<i>PLD</i>
Продуктивність установки за одне завантаження	100 м × 40 мм (800 м стрічки 4,4 мм) ³	600 м × 12,7 мм (1200 м стрічки 4,4 мм) ³	100 м × 40 мм (800 м стрічки 4,4 мм) ^{2,3}	немає даних
Вироблено стрічки за 2006 р. ³	6,8 км	більше 45 км	більше 4 км	немає даних
Критичний струм при 77 К, у перерахунку на стрічку шириною 1 см				
Короткі зразки	560 А	721 А	574 А	735 А
Короткі куски (1–10 м)	390 А	485 А	480 А	409 А
Довгі куски (70–100 м)	265 А	295 А	253 А	245 А
Довгі куски (600 м)	немає даних	173 А	немає даних	немає даних

¹ немагнітна нержавіюча сталь 304 або 314;

² лабораторна установка;

³ у перерахуванні на стрічку шириною 4,4 мм.

Європейська компанія *EHTS* і японська *Fujikura* ще не запустили пілотне виробництво ВТНП стрічок 2-го покоління, однак це не заважає їм виготовляти помітні об'єми ВТНП стрічки в лабораторних умовах. Наприклад, для європейського кабельного проекту *Super 3C* компанія *EHTS* виготовила 4 км ВТНП стрічки, що порівняно з обсягом виробництва *AMSC*. У грудні 2006 р. із ВТНП стрічки 344S виробництва *AMSC* були виготовлені два прототипи струмообмежувачів потужністю 2 МВА (*Siemens*) і 8,3 МВА (*Hyundai*), відповідно. Компа-

нія *SuperPower* поставила *Sumitomo* 9,7 км ВТНП стрічки для здійснення другої фази проекту ВТНП кабелю в Олбані.

ВТНП проводи 2-го покоління являють собою „бутерброд”, у якому на досить товсту (від 50 до 120 мкм) підложку нанесена тонка (менш 3 мкм) плівка ВТНП на основі YBCO. Густину струму в таких проводах можна підняти як за рахунок поліпшення властивостей ВТНП плівок, так і шляхом простого збільшення їхньої товщини. Зменшення товщини підложки також надзвичайно важливо як для збільшення конструктивної густини струму в обмотках, так і для досягнення високого питомого опору при мінімумі об’єму провідника у струмообмежувачах.

За рахунок збільшення товщини ВТНП плівок з 1 до 3 мкм і поліпшення властивостей самих плівок усі провідні виробники ВТНП стрічок 2-го покоління змогли до 2007 р. досягти в коротких зразках стрічок критичних струмів до 560 А/см і вище. Рекордно високі значення критичних струмів у коротких стрічках отримані незалежно одна від одної різними компаніями за рахунок принципово різних технологічних прийомів. На жаль, отримати такі ж високі результати на довгомірних стрічках не вдавалося. Якщо у шматках коротше 10 м критичні струми спостерігалися на рівні 400 А/см, то у кусках довжиною 100 м – на рівні 250 А/см. На той час стрічку із критичним струмом 250 А/см і вище в шматках по 100 м здатні були виготовляти всі зазначені в табл. 1.4 компанії.

Серед усіх виробників ВТНП проводів 2-го покоління варто виділити компанії *AMSC* і *SuperPower*. Розроблений *AMSC* спеціально для струмообмежувачів ламінований провідник 344S не має аналогів, покриття з нержавіючої фольги надійно захищає ВТНП шар від механічних впливів і вологи. У 2006 р. *SuperPower* успішно перейшла на підложки товщиною 50 мкм замість звичайних 100 мкм, що дозволяє в 1,5 рази підняти конструктивну густину струму в обмотках і у 2 рази скоротити витрату ВТНП стрічки у струмообмежувачах. До 2008 р. компанія *SuperPower* залишалася єдиним виробником довгомірних (500 м і більше) ВТНП проводів 2-го покоління.

У 2006 р. усі виробники ВТНП стрічок 2-го покоління провели велику роботу з поліпшення залежності критичного струму від магнітної індукції і зменшення анізотропії властивостей провідників, для чого використали різні способи створення штучних центрів піннінгу (наприклад, технологія „наноточок” *AMSC*). Стало можливим створення соленоїдів з полем до 3 Тл, що працюють при температурах, близьких до азотної (64–77 К) (рис. 1.16).

Розробляються ВТНП стрічки зі знизженими втратами на змінному струмі,

що досягається за рахунок особливого візерунка ВТНП і захисного шару.

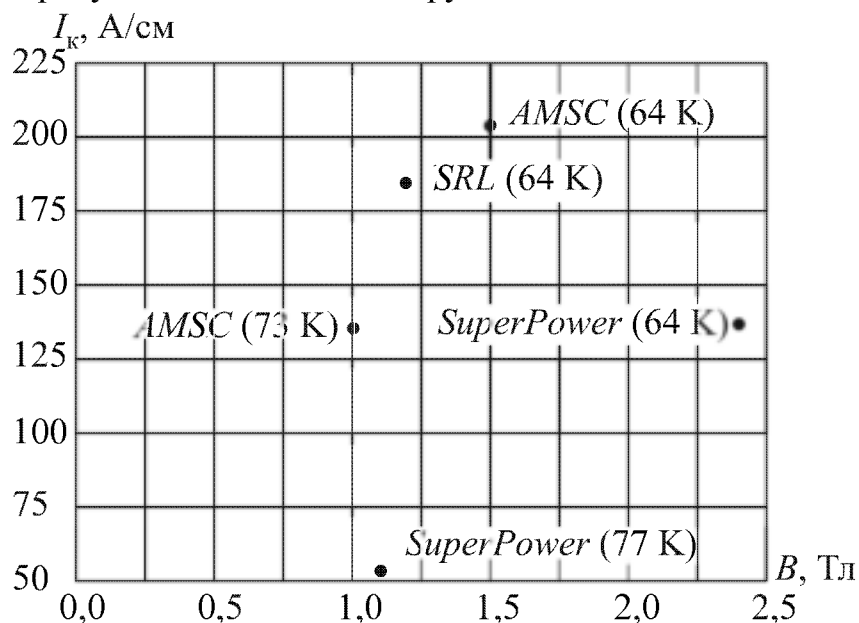


Рисунок 1.16 – Критичні струми ВТНП котушок зі стрічок 2-го покоління

У 2007 р. відбувся як кількісний ривок – у збільшенні обсягу виробництва ВТНП проводів 2-го покоління, так і якісний – у поліпшенні їхніх властивостей. На січень 2007 р. ціни на ВТНП проводи 2-го покоління становили від 600 до 1200 дол/кА·м залежно від виконання плівки, виробника і обсягу поставок.

На рис. 1.17 поданий стан робіт з виготовлення ВТНП 2-го покоління у світі на початок 2007 р. [28]. Тут (за винятком розшифрованих раніше) використано наступні скорочення:

Спосіб осадження ВТНП:

- *Evap – evaporation* (випарювання матеріалу, що осаджується);
- *COEVAP BaF – coevaporation Ba* (спільне випарювання декількох матеріалів);

Наукові організації:

- ▶ *ZFW–Goe/EHTS – Zentrum Funktionswerkstoffe GmbH* (ТОВ Центр функціональних матеріалів), Німеччина;
- ▶ *ISTEC-SRL – International Superconductivity Technology Center – Superconductivity Research Laboratory* (Міжнародний центр надпровідних технологій – Лабораторія досліджень з надпровідності), Японія;
- ▶ *BNL – Lawrence Berkeley National Lab (LBNL)* – (Національна лабораторія Лоренса Берклі), США;
- ▶ *Edison–EMS – Edison Emergency Medical Services* (Швидка медична допомога Едісона), США;
- ▶ *Theva – THEVA Dunnschichttechnik GmbH* (ТОВ Технологія тонких плівок), Німеччина.

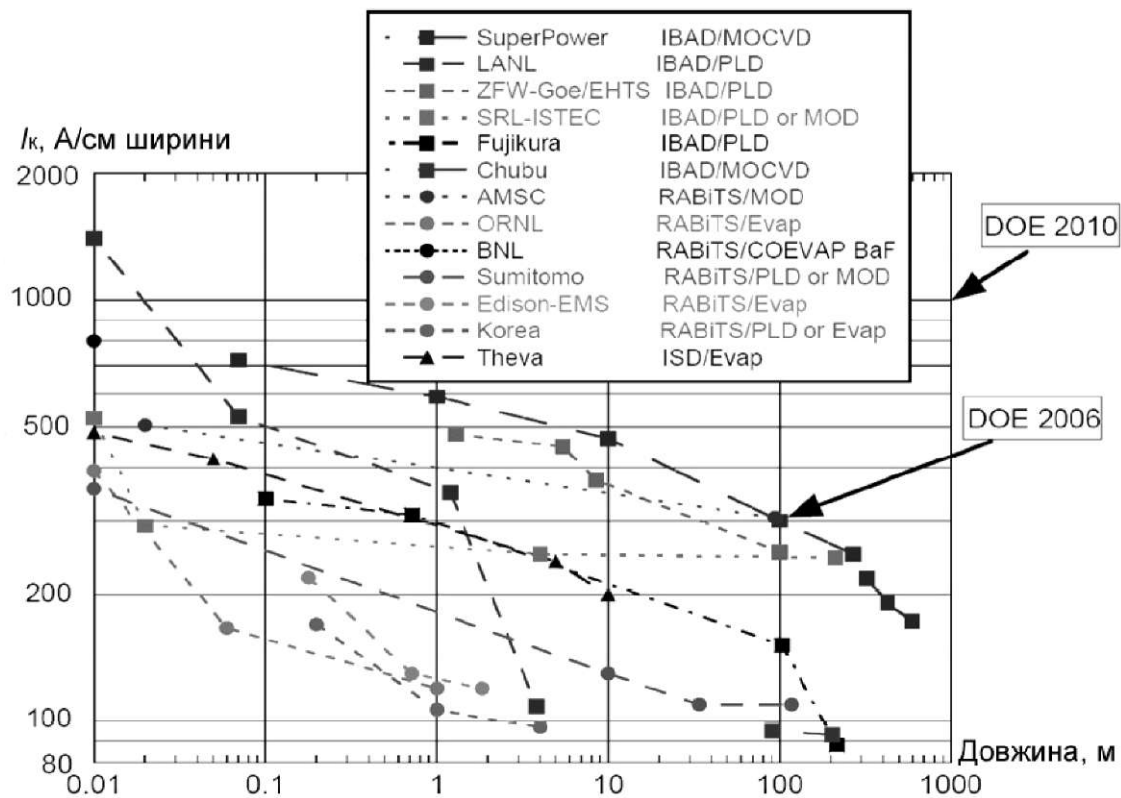


Рисунок 1.17 – Стан робіт з виготовлення ВТНП 2-го покоління у світі (на початок 2007 р.)

В 2007 р. у Японії була завершена 5-річна національна програма зі створення ВТНП стрічок 2-го покоління. Усі заявлені у програмі цілі були виконані (табл. 1.5) [29, 30].

Таблиця 1.5 – Цілі японського національного проекту зі створення технології ВТНП проводів 2-го покоління у 2003–2007 рр.

Параметри та характеристики	Провід з високим I_k	Проводи, оптимізовані за вартістю	
Вартість, дол/кА·м	≤122 (77 К, 0 Тл)	≤81,3 (77 К, 0 Тл)	≤30,5 (демонстрація можливості виробництва)
Технологічний процес	<i>YBCO (PLD)/GZO (IBAD)</i>	<i>YBCO (MOD)/GZO (IBAD)</i>	<i>RBCO/MgO (IBAD)</i> або <i>RABiTS</i>
Довжина, м	≥500	≥500	≥50
I_k , А/см (при 77 К, 0 Тл)	≥300	≥300	≥200
I_k , А/см (при 77 К, 3 Тл)	≥30	-	-
Швидкість отримання, м/год	≥5	≥5	-
Виконавці	<i>Fujikura/ SRL</i>	<i>SWCC*, SRL</i>	<i>SWCC*, SRL, Sumitomo, Chubu</i>

* – *SWCC (Showa Electric Cables)*

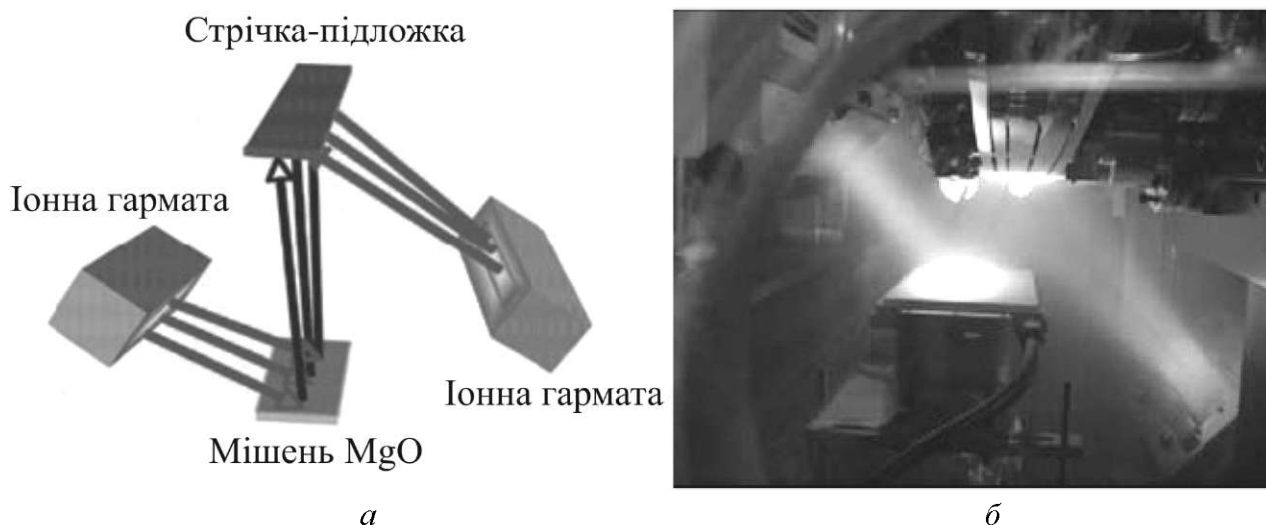
У лютому 2008 р. *Fujikura* виготовила ВТНП стрічку довжиною 503,5 м із критичним струмом 349,6 А/см. На той час це досягнення стало світовим рекордом за добутком $I_k \cdot L$. Для отримання настільки високих результатів було за-

стосовано багатокіштовні високовакуумні методи: за допомогою *IBAD* на підложку з Хастелоя осаджували $Gd_2Zr_2O_7$, а потім, методом *PLD* – CeO_2 , шар ВТНП осаджували також за допомогою *PLD*. Для прискорення процесу лазерного осадження використовувалось декілька лазерних пучків та багаторазове проходження стрічки крізь зону осадження, тому розроблювачі називають його *MPMT-PLD* (*multi-plume multi-turn*). Оцінка вартості, очевидно, є заниженою, (вартість 122 дол/кА·м менша за вартість навіть американської стрічки), до того ж ця стрічка на ринку ВТНП відсутня.

Для зниження вартості виробництва ВТНП стрічок в Японії паралельно досліджуються наступні шляхи:

- 1) застосування хімічних методів осадження *MOCVD* та *MOD*;
- 2) застосування текстурованої металічної підложки (технологія *RABiTS*);
- 3) застосування швидкого процесу *IBAD MgO* (аналогічного процесу, що використовує *SuperPower*).

Дослідники з *SRL* успішно освоїли процес *IBAD* у застосуванні до MgO (рис. 1.18). Цей процес, розроблений у *LANL* і застосовуваний сьогодні компанією *SuperPower*, вигідно відрізняється за продуктивністю від *IBAD YSZ* (що використовує *EHTS*) і *IBAD GZO* (що використовує *Fujikura*). Справа в тому, що оксид магнію добре текстурується вже при дуже малій товщині шару (10 нм), у той час як необхідну текстуру похідних оксиду цирконію вдається отримати тільки при товщині 1 мкм і більше. В *SRL* швидкість одержання першого буферного шару вдалося збільшити з 1 до 24 м/год. Отриманий шар оксиду магнію має чудову текстуру з кутом дезорієнтації всього 2–4°. Осадження оксиду ведеться при іонному бомбардуванні під певним кутом. Розмір іонної гармати в *SRL* 22×6 см².



а б
Рисунок 1.18 – Процес *IBAD MgO* (*SRL*, Японія)

Японські дослідники розробили також більш простий і економічний підхід з реактивним розпиленням MgO. У цьому випадку для здійснення процесу потрібна тільки одна іонна гармата (рис. 1.19). З використанням такого підходу отримані зразки із критичним струмом більше 200 А/см.

Влітку 2008 р. в Японії стартував новий національний ВТНП проект *MPACC (Materials and Power Application of Coated Conductor* –

Матеріали та застосування в електроенергетиці покривних надпровідників). Проект розрахований на 5 років. Він передбачає розроблення виробництва ВТНП проводу 2-го покоління у кількості 10–20 км на рік. Наявність власного ВТНП проводу дозволить японцям до 2012–2013 рр. реалізувати заплановані пілотні проекти: надпровідний індуктивний накопичувач енергії потужністю 2 МДж, трансформатор потужністю 2 МВА та кабелі 66 кВ / 5 кА і 275 кВ / 3 кА.

У табл. 1.6 наведені технічні показники ВТНП проводів 2-го покоління провідних світових виробників на кінець 2008 р.

Виробничі можливості ВТНП проводу 2-го покоління реалізовані зараз тільки у США, виробників проводу у Європі поки що немає. Заявлені виробничі потужності американських компаній (разом) складають більше 1700 км/рік.

Вважається, що суттєвого зниження вартості ВТНП проводу вдасться досягти за рахунок збільшення обсягів виробництва (див. рис. 1.11 та 1.20) [31].

Різні конкуруючі компанії – *American Superconductor, SuperPower, Fujikura, ISTEK, Sumitomo, KERI, Bruker, Theva* (Німеччина) – розвивають власні, патентно захищені методи одержання ВТНП проводів другого покоління. Вони сподіваються в найближчому майбутньому одержати переваги на ринку за рахунок зниження питомої собівартості та збільшення виходу якісної продукції.

Найбільш суттєві відмінності в конкуруючих технологіях полягають у матеріалі підложки, а також у способі нанесення надпровідного покриття. Рекордні досягнення (на осінь 2008 р.) різних технологій подані в табл. 1.6 [25], але вони, однак, не оптимізовані за собівартістю і скоріше являють собою демонстрацію можливостей конкретного методу.

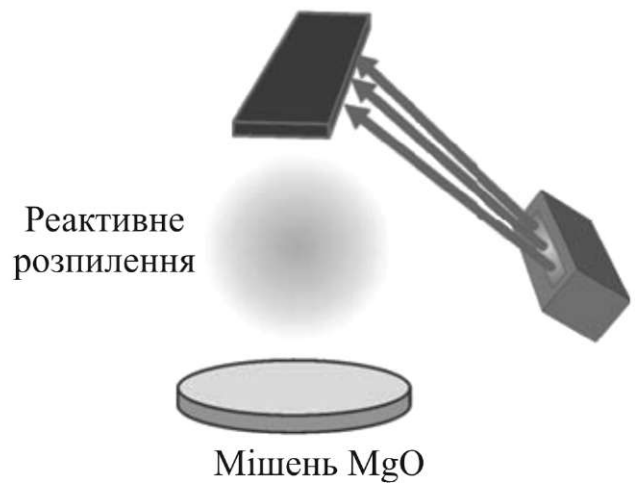


Рисунок 1.19 – Альтернативний процес *IBAD* з реактивним розпиленням MgO з однією іонною гарматою

Таблиця 1.6 – Технічні показники ВТНП проводів 2-го покоління на кінець 2008 р.

Організація	Країна	Метод отримання	Довгі зразки			Короткі зразки
			$I_{к}$, А/см-ширини	L , м	$I_{к} L$, кА м	$I_{к max}$, А/см ($J_{к}$, МА/см ²)
<i>SuperPower</i>	США	<i>YBCO (MOCVD) – MgO (IBAD)</i>	227	1030	233,81	833 (2,44)
			302	630	190,26	
<i>Fujikura</i>	Японія	<i>GdBCO (PLD) – GZO (IBAD)</i>	349,6	503,5	176,023	540 (2,2)
<i>SRL</i>	Японія	<i>YBCO (PLD) – GZO (IBAD)</i>	213	245	52,185	480 (1,2)
			250	56	14,0	735 (2,4)
<i>Sumitomo</i>	Японія	<i>HoBCO (PLD) – NiW (RABiTS)</i>	205	200	41,0	316 (1,8)
<i>SWCC</i>	Японія	<i>YBCO (MOD) – GZO (IBAD)</i>	300	500	150,2	370 (2,5)
<i>AMSC</i>	США	<i>YBCO (MOD) – NiW (RABiTS)</i>	350	94	32,9	560 (4,0)
<i>EHTS</i>	Європа	<i>YBCO (PLD) – YSZ (IBAD)</i>	253	100	25,3	574 (3,6)
<i>Chubu</i>	Японія	<i>YBCO (MOCVD) – GZO (IBAD)</i>	215	157	33,755	294 (1,6)
<i>KERI</i>	Корея	<i>YBCO (EDDC) – MgO (IBAD)</i>	305	27	8,1	500 (2,3)

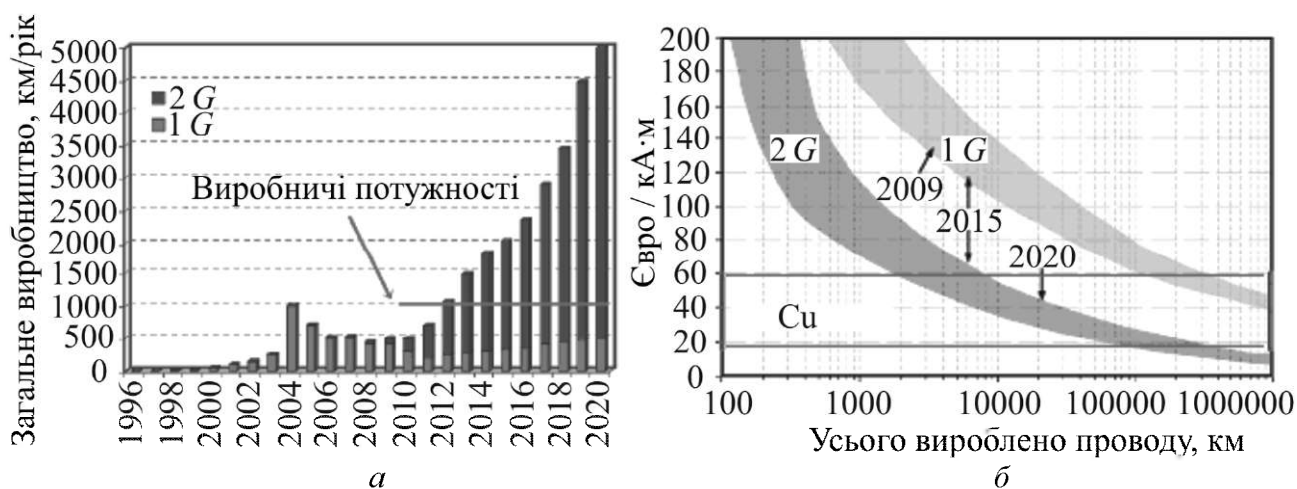


Рисунок 1.20 – Прогноз розвитку обсягів виробництва (а) і вартості (б) ВТНП проводу

Більш показовою є табл. 1.8, у якій компанія *Bruker* спробувала оцінити межу вартості на матеріали. Найбільш дешевим щодо підложок є метод імпульсного лазерного розпилення *PLD*, тому що при цьому можна використати підложки з нержавіючої сталі. Що стосується ВТНП шарів, то тут найбільш дорогим є метод *IBAD/MOCVD*, оскільки використовуються вкрай дорогі метало-органічні з'єднання, вартість яких у малих партіях сягає 15–25 тис. дол./кг. У результаті собівартість ВТНП покриття сягає 50–70 тис. дол./кг, а перераховані на 1 км стрічки – до 400–1500 дол. Більш вигідною є сировина для методу

лазерного напилення – звичайні оксиди металів, що дає ціну ВТНП покриття щодо матеріалу біля 600 дол/кг, а розраховуючи на 1 км стрічки – біля 50 дол. Метод *RABiTS/MOD* займає проміжне місце, тому що трифтороацетатні солі, що використовуються для виробництва *MOD* прекурсору надпровідного покриття, є в цілому менш складними і більш дешевими, ніж хімікати, що використовуються в конкуруючих *MOCVD* процесах.

Таблиця 1.7 – Рекордні досягнення ВТСП стрічок 2-го покоління у різних технологіях виробництва (осінь 2008 р.)

Технологія ВТНП шару	<i>MOCVD</i>	<i>MOD</i>	<i>PLD</i>	<i>PLD*</i>
Підложка	Хастелой	Ni-W (<i>RABiTS</i>)	Нерж. сталь	Хастелой
Максимальна довжина куска L_{max} , м	1311	130	510	10
I_k , А/см	153	300	403	150
$L_{max} I_k$ (кА м)	201	39	206	2
Виконавці	<i>SuperPower, ISTEK</i>	<i>AMSC</i>	<i>Fujikura, Bruker, ISTEK, Sumitomo</i>	<i>Theva, KERI</i>

* – Напилення з парової фази за допомогою електронного пучка (*electron beam physical vapor deposition*)

Таблиця 1.8 – Мінімальні витрати на матеріали для ВТНП стрічки (дол/км)

Технологія ВТНП шару	Хімічне розилення (<i>IBAD/MOCVD</i>)	Лазерне розилення (<i>IBAD/PLD</i>)	Напилення з парової фази за допомогою електронного пучка (<i>PLD*</i>) (<i>RABiTS/MOD</i>)
	420	50	100
Підложка	Ni-W (<i>RABiTS</i>) >500	Нерж. сталь 60	Хастелой >700
Шунтуючий шар	<i>E-plating</i> 70	<i>Lamination</i> 70	<i>PLD</i> 150
Разом	>990	180	>950
Разом, дол/кА·м	25–30	12–20	20–25

Слід зазначити, що метод лазерного розпилення вимагає істотних витрат на поточне відновлення елементів ексимерного лазера – газу і камер, тому що вони мають обмежений ресурс з кількості імпульсів. Отже, ці елементи фактично є витратним матеріалом (з витратами вище, ніж витрати на матеріал підложки та ВТНП шарів). Надія на зниження цих витрат залишається тільки на вдосконалення лазерної техніки.

Отже, мінімальна собівартість виробленої стрічки по *IBAD/MOCVD* процесу може скласти до 25–30 дол/кА м, по *RABiTS/MOD* процесу – 20–25 дол/кА м і по *IBAD/PLD* процесу – 12–20 дол/кА м.

Внесок у собівартість виробництва може бути розділений на декілька

складових: вартість сировини і матеріалів, вартість робочої сили, капітальні витрати на устаткування, на спорудження будинків, поточні витрати на електроенергію і воду.

Витрати на сировину визначаються встановленою ринковою ціною одиниці виміру матеріалу, а також витратою цього матеріалу на 1 м готового проводу. Перетин проводу 2-го покоління визначається в основному підложкою і стабілізуючим шаром.

Буферні шари дуже тонкі і тому фактичні витрати на матеріал буферних шарів не вносять істотного внеску в собівартість проводу.

Надпровідний шар може включати дуже дорогі компоненти, тому його внесок у собівартість суттєвий. Об'ємна частка застосовуваного захисного срібного шару незначна, але срібло є достатньо дорогим металом, відмовитися від якого в технології повністю неможливо.

Трудові витрати можуть бути мінімізовані за рахунок автоматизації устаткування і росту обсягу одиничної партії продукції. На цей час гарним показником є виробничий цикл, що працює із кусками ВТНП стрічок довжиною до 1 км.

Оптимізація капіталовкладень в устаткування стосовно швидкості виходу продукції вкрай важлива для зменшення витрат на амортизацію в кінцевій ціні проводу. Швидкість виходу в цьому випадку – це добуток лінійної швидкості руху стрічки у процесах на число паралельних проводів, які можуть бути оброблені устаткуванням. Швидкість руху стрічки залежить від геометричного розміру зони обробки і зростає зі збільшенням величини цієї зони.

Зі зростанням обсягів виробництва співвідношення між категоріями витрат (структура ціни) змінюється. На рис. 1.21 показана структура ціни, розрахована *Sandia National Laboratories* для проводу 2-го покоління, виготовленого методом *TFA-MOD*, залежно від продуктивності процесу. У розрахунках передбачалася величина питомого критичного струму у 200 А на сантиметр ширини стрічки, ціна підложки у 2 дол/м,

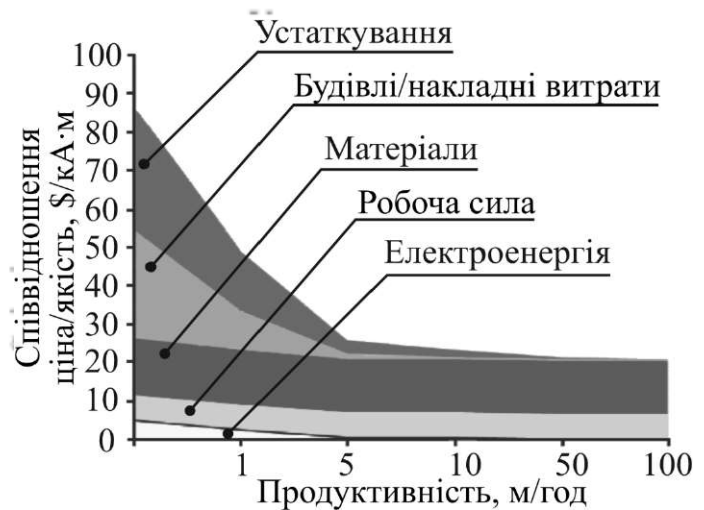


Рисунок 1.21 – Структура ціни ВТНП проводу залежно від продуктивності установки

при річному виробництві 1200 км/рік. Видно, що, починаючи з деякої швидко-

сті, фактична собівартість ВТНП стрічки визначається лише витратами на матеріали і робочу силу. Тому перспективи зниження собівартості при досить високому рівні розвитку будь-якої технології в першу чергу залежать від ціни застосовуваної сировини і матеріалів, причому найбільш важливими тут є витрати на підложку, надпровідний шар і стабілізуюче покриття (що становить у деяких випадках до 40 % від товщини проводу), при невеликому відсотку вартості срібла.

1.4. Надпровідні проводи на основі дібориду магнію

У 2001 р. професором японського університету доктором *Akimitsu* була відкрита нова надпровідна сполука – діборид магнію MgB_2 із критичною температурою $T_c = 39$ К. Йому властива відносно низька анізотропія, простий хімічний склад і дешевизна вихідних складових для його синтезу.

Діборид магнію – тугоплавка речовина, що практично не спікається при атмосферному тиску аж до температури 1100 °С. Ця обставина ускладнює повну реалізацію потенціалу цього надпровідника: наприклад, поки невирішеним завданням є одержання об'ємних зразків з достатнім контактом між частинками (хоча останнім часом повідомляється про різні варіанти рішення цієї проблеми). Як наслідок, критичний струм і критичне поле об'ємних зразків MgB_2 поки нижче рекордних величин, отриманих на високоякісних плівках цього надпровідника: $\mu_0 H_{k2} > 60$ Тл, $J_c > 10^5$ А/см² (при 4,2 К, 8 Тл), $J_c > 3 \cdot 10^7$ А/см² (при 4,2 К, 0 Тл) [32].

Процес одержання плівок MgB_2 ускладнений високою летючістю магнію. Одержання покриттів дібориду супроводжується рядом обмежень – при підвищеному тиску магнію відбувається конденсація твердого або рідкого магнію, а при зниженому тиску – розкладання MgB_2 на інші бориди (рис. 1.22) [33, 34].

Існує три групи методів одержання плівок MgB_2 – високотемпературні, середньотемпературні та низькотемпературні.

1) *Високотемпературні* методи зводяться до оброблення в парах Mg попередньо нанесених плівок бору в замкненому об'ємі при температурі 850 °С і вище. Плівка бору може бути при цьому отримана будь-яким зручним способом (лазерне осадження, випар, *CVD* і т.д.). Висока температура забезпечує високу кристалографічну досконалість плівок MgB_2 , T_c близько 39 К і густину критичного струму $J_c > 10^7$ А/см².

2) *Середньотемпературні* методи передбачують оброблення при температурі близько 600 °С плівок-попередників (прекурсорів). Плівки-прекурсори одержують також різними способами при температурах від кімнатної до 300 °С,

вони можуть містити суміш Mg, B та MgB_2 або бути складеними пошарово із цих компонентів. Надлишковий магній при температурі близько $600\text{ }^\circ\text{C}$ випаровується, а у плівці утворюється надпровідник. У такій технології потрібен точний контроль часу і температури відпалу, тому що втрата занадто великої кількості магнію приводить до розпаду MgB_2 . Отримані цим способом зразки істотно поступаються у якості високотемпературним, нерідко є аморфними, а T_k у них сягає лише 34 K .

3) У *низькотемпературних* методах зростання кристалів плівок дібориду магнію реалізується при температурі нижче $300\text{ }^\circ\text{C}$. При цих умовах летучість магнію істотно знижена, однак велику увагу доводиться приділяти забезпеченню досить високого вакууму, у протилежному разі магній легко окислюється до оксиду (MgO). T_k плівкових зразків, отриманих при низьких температурах, сягає 36 K .

Цікавою модифікацією високотемпературного процесу є так зване гібридне фізико-хімічне осадження з парової фази (*hybrid physical-chemical vapor deposition (HPCVD)*), розроблене американськими дослідниками [35]. Осадження при цьому здійснюється на підложку, поруч із якою розташований металевий магній, що створює необхідний тиск пари (рис. 1.23). Осадження проходить при $700\text{--}760\text{ }^\circ\text{C}$ у потоці водню при тиску 100 Торр . Бор у плівку надходить з діборану (B_2H_6), як у методі *CVD* (метод назвали „гібридним”, тому що магній фактично випаровується термічним нагріванням). Таким чином, осадження плівки проводять безпосередньо в парах летучого компонента.

На початку 2000-х плівками MgB_2 зацікавилися, в першу чергу, для застосування у надпровідній електроніці, у пошуках альтернативи ніобію. Плівки для електроніки одержують, як правило, на монокристалічних підложках. У якості матеріалу підложки для дібориду магнію добре зарекомендував себе карбід кремнію (SiC), що не вступає з ним в хімічну взаємодію.

Велику увагу при синтезі діборидмагнієвих плівок приділяють якості границь зерен надпровідника. Чутливим критерієм тут є відношення величини електричного опору плівки при кімнатній температурі до опору при 50 K RRR

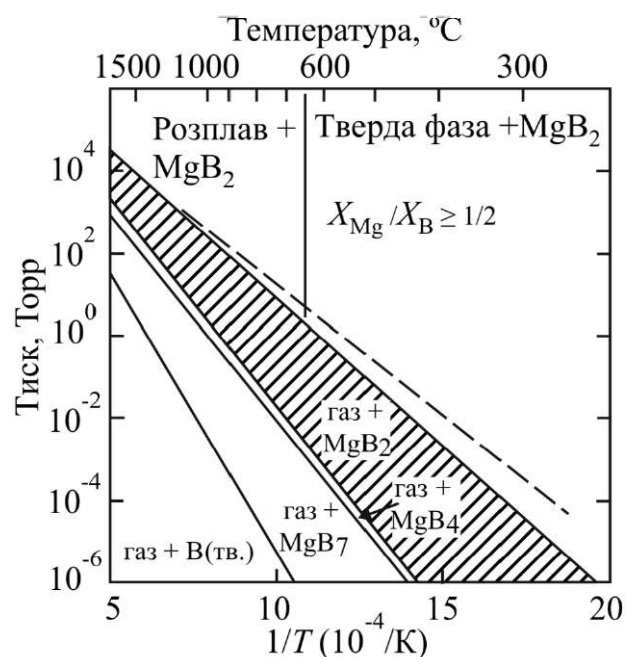


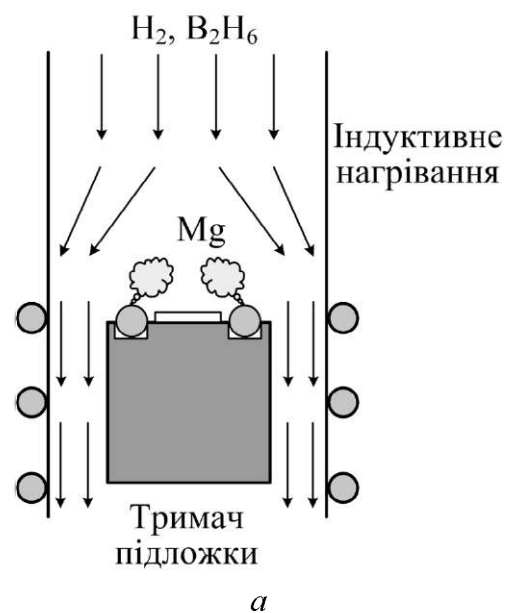
Рисунок 1.22 – Умови росту кристалів стехіометричних плівок MgB_2 (заштрихована зона)

(*residual resistivity ratio*). У плівок з належним контактом значення RRR досить велике (продемонстровані величини $RRR > 80$). У таких зразках (а це, як правило, чистий діборид магнію) отримані рекордні критичні струми у власному полі (близько 3,5 Тл) 10^7 А/см² при 4 К, але польова стійкість порівняно невисока. Критичне поле досягає ~ 5 Тл (у поперечному напрямку) і 20 Тл (у продольному напрямку) при 10 К. Такі ж величини характерні для монокристалів дібориду магнію. Плівки з високою величиною RRR мають найменший поверхневий опір R_s , що важливо для надвисокочастотних застосувань надпровідників.

Останнім часом усе більше уваги приділяють одержанню покритих провідників на основі дібориду магнію. Полікристалічні покриття товщиною в декілька мікрон отримані на під-ложках з нержавіючої сталі, міді [36], гнучких стрічках з $ZrO_2(Y_2O_3)$, волокнах карбіду кремнію [37] (рис. 1.24). Отримано високі T_c , H_c , а в деяких випадках і J_c . У більшості випадків мова поки йде про демонстраційні зразки сантиметрової довжини, осаджених методом *HPCVD*. Більшу активність у цій галузі виявляють американські вчені та дослідники з Пекінського університету.

На даний момент на світовому ринку надпровідних проводів на основі сполуки MgB_2 присутні дві компанії – *Hyper Tech Research, Inc.* (США) і *Columbus Superconductors Spa* (Італія). Вони пропонують широку номенклатуру проводів з інженерною густиною струму близько 20 кА/см² при температурі 20 К у полі 2 Тл [38, 39]. Пристрої з таких порівняно дешевих надпровідників можуть працювати з використанням мікроохолоджувачів (кріокулерів).

Компанія *Hyper Tech* розробила і запатентувала процес безперервного



а



б

Рисунок 1.23 – Схема процесу *HPCVD* (а) [34, 35] і фотографія тримача підложки (б)

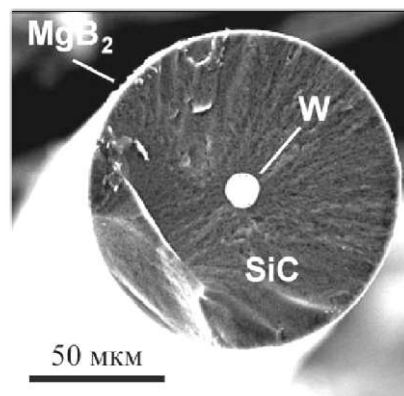


Рисунок 1.24 – Покриття MgB_2 на волокні з кристалів карбіду кремнію (SiC), вирощених на вольфрамовій нитці

формування і заповнення труб *CTFF* (*Continuous Tube Forming and Filling process*) для створення надпровідних діборидмагнієвих проводів. Цей процес включає виготовлення проводу, починаючи з металевих стрічок, які, простягаючись через систему валків спеціальної форми, одночасно у безперервному режимі наповнюються порошком дібориду магнію, формуються у вигляді труби і витягаються до необхідної товщини. Традиційно виробники заповнюють трубу фіксованої довжини і вже потім витягають її до необхідного діаметра, однак такий спосіб має два недоліки:

1) труба заповнюється матеріалом неоднорідно за щільністю;

2) для одержання проводу великої довжини необхідно брати трубу все більшого і більшого діаметра.

Причини, з яких компанія *Hyper Tech* вибрала діборид магнію для виготовлення проводів, наступні:

▼ проводи можуть бути виготовлені як круглого, так і прямокутного перерізу, і мають невелику вагу;

▼ витрати на їхнє виготовлення значно нижчі у порівнянні із ВТНП стрічками (як BSCCO, так і YBCO тонкоплівковими провідниками).

Hyper Tech виробляє моножилінні (рис. 1.25) та багатожилінні [40, 41] діборидмагнієві проводи в мідно-нікелевій (CuNi) оболонці довжиною від 1 до 4 км і діаметром 0,7–0,9 мм із 7, 19, 37 або 61 жилами (рис. 1.26, *а, б, в*). Густина критичного струму $J_k = 175 \text{ кА/см}^2$ (20 К, 2 Тл). Для збільшення критичного струму в магнітному полі діборидмагнієві проводи легують карбідом кремнію, вводячи добавки у вихідний порошок. У легованих проводах J_k досягає 200 кА/см^2 при 10 Тл і 4,2 К.

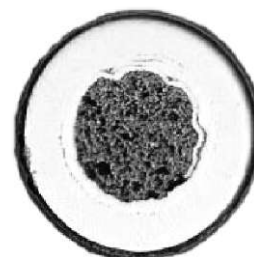


Рисунок 1.25 – Поперечний розріз моножилінного діборидмагнієвого проводу діаметром 1,0 мм

До кінця 2006 р. *Hyper Tech* досягла продуктивності 250 км проводів у рік і планує збільшити її до 2009 р. до 10–15 тис. км/рік (при довжині куска – 30–60 км).

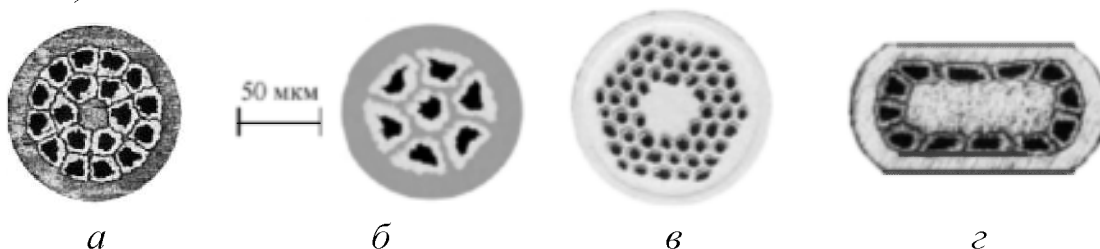


Рисунок 1.26 – Поперечний розріз багатожилінних діборидмагнієвих проводів різних типів, виготовлених *Hyper Tech* з використанням Nb хімічного бар'єра у мідній матриці: *а* – 19 жил, діаметр 0,834 мм; *б* – 7 жил, діаметр 0,834 мм; *в* – 61 жила, діаметр 1,01 мм; *г* – прямокутного перетину

З використанням довгомірного багатожильного проводу компанія *Hyper Tech* виготовляє серію соленоїдів та котушок типу „рейстрек” методом „реакція–намотування” (*react-and-wind*) та „намотування–реакція” (*wind-and-react*).

Окрім розроблення та виготовлення діборидмагнієвих проводів та котушок, компанія *Hyper Tech* працює за контрактами над проектами зі створення пристроїв на їх основі (табл. 1.9) [33].

Таблиця 1.9 – Проекти компанії *Hyper Tech*

Проект	Замовник
Магніт для ЯМР томографії	Національний інститут здоров'я (<i>NIH</i>)
Трансформатор та індуктор для живлення корабельного двигуна	ВМС США
Котушки для електродвигуна та генератора	<i>NASA</i>
Статор	<i>NASA</i>
Рефрижератор за принципом адіабатичного розмагнічування	<i>NASA</i>
Магніти для прискорювачів	Міністерство енергетики (<i>DOE</i>)
Струмообмежувачі	<i>Cambridge Univ.</i> , <i>Rolls Royce plc</i> (Великобританія)

Переваги діборидмагнієвих магнітів.

Цей матеріал забезпечує у порівнянні з існуючими магнітами переважні характеристики і надійність при більш низькій вартості, а у порівнянні з постійними магнітами переваги MgB_2 наступні:

- можливість досягнення типових магнітних полів до 1,5–2,0 Тл при нижчих капітальних витратах на устаткування та з нижчою вартістю експлуатації;

- можливість досягнення більш високих магнітних полів і більшого розміру зони однорідності магнітного поля.

Якщо ж порівнювати діборидмагнієві магніти із НТНП магнітами, то вартість експлуатації діборидмагнієвих котушок також нижча через більш високу робочу температуру (20–30 К) і пов'язану із цим вартість системи охолодження.

Компанія *Columbus Superconductors Spa* (Генуя, Італія) проводить дослідження, розроблення, виробництво і продаж проводів, стрічок та кабелів на основі дібориду магнію [39].

На сьогоднішній день компанія виробляє:

- 1) транспоновані багатожильні стрічки для застосування в умовах змінного струму (рис. 1.27, а);

- 2) стабілізовані міддю багатожильні стрічки для застосування в умовах постійного струму (рис. 1.27, б, табл. 1.10) [42].

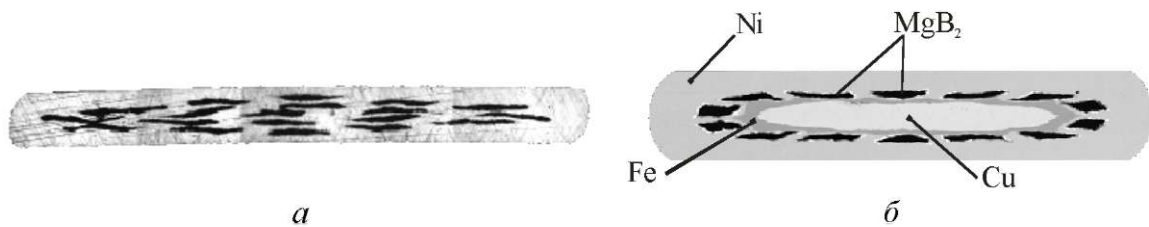


Рисунок 1.27 – Стрічки виробництва *Columbus Superconductors Spa*

Таблиця 1.10 – Параметри та експлуатаційні характеристики діборидмагнієвих стрічок, стабілізованих міддю, виробництва компанії *Columbus Superconductors* з поперечним перетином $3,6 \times 0,65 \text{ мм}^2$ (рис. 1.27, б)

Параметр	Значення
Кількість жил MgB_2	14
Технологія виготовлення	<i>PIT (ex-situ)</i>
Ширина, мм	3,65
Товщина, мм	0,65
Товщина Ni шару, мм	1,54
Товщина Cu шару, мм	0,35
Матеріал дифузійного бар'єра	Fe
Загальна товщина НП шару, мм	16
Експлуатаційні характеристики	
I_K , А (30 К, власне поле)	460
J_c , А/мм ² (30 К, власне поле)	200
I_K , А (20 К, 1 Тл)	380
I_K , А (16 К, 1 Тл)	500

Columbus Superconductors виготовляє діборидмагнієві проводи різної форми (круглі, квадратні, прямокутні), різних поперечних розмірів і довжин, з різною оболонкою (немагнітною, з високим електричним опором). Провідники дозволяють виготовляти котушки методом „реакція–намотування”. Стандартна довжина кусків провідників – 1,6 км. На сьогоднішній день компанія виготовила і поставила замовникам понад 200 км діборидмагнієвих проводів і стрічок, які були успішно випробувані. Продуктивність ще у 2005 р. становила 20 км/міс; а згодом була збільшена до 100 км/міс. при максимальній довжині проводу в одному куску до 7 км.

У Росії в РНЦ „Курчатовський інститут” була розроблена концепція магнітного обтиснення порошку дібориду магнію в гарячому стані і при високому тиску, створити яке при традиційному волочінні не вдається. Перші зразки проводу (не більше 1 м довжиною) були отримані за допомогою установки високих імпульсних магнітних полів [43].

На даний час є всі підстави вважати, що ВТНП матеріали виходять на шлях промислового виробництва, і незабаром, коли ціни стануть прийнятними для виробників електротехнічного обладнання, використання надпровідних матеріалів стане для електротехнічної промисловості буденною справою.

Розділ 2

Кабелі, лінії електропередачі

2.1. Перші проекти потужних надпровідних кабельних ліній електропередачі постійного та змінного струмів

З відкриттям надпровідності деяких матеріалів з'явилась теоретична можливість передавати електричну енергію без витрат активної потужності. На жаль, низькі критичні параметри цих матеріалів, а також відсутність достатньо потужної і надійної холодильної техніки (а це був рівень температури рідкого гелію) унеможлилювали реалізацію надпровідникової електропередачі. Тільки в 60-х роках ХХ-го ст. з'явилися можливості для розроблення і дослідження надпровідних кабельних ліній. Було запропоновано низку цікавих проектів, створювались дослідні кабельні лінії невеликої довжини, на яких відпрацьовувались високовольтні струмовводи, способи надійного кріостатування і охолодження.

Ще в 1966 р. співробітники *IBM* (США) *Richard Garwin* та *Juri Matisoo* досліджували перспективу використання одного з найбільш багатобічючих на той час надпровідних матеріалів – Nb_3Sn ($T'_k=18$ К) для створення потужних електричних кабелів [44]. Масштаб їхньої пропозиції був величезний – передавати по кабелю постійного струму потужність 100 ГВт (+/-100 кВ, 500 кА) на відстань близько 1000 км, з охолодженням рідким гелієм по всій довжині кабелю. Такий кабель міг би нести половину всієї електроенергії, яка вироблялась у той час у США, якби виникла потреба у такому сконцентрованому енергопоточі.

Аналогічні проекти розглядались у Росії, Німеччині і ряді інших розвинених країн світу [45–47].

Але виявилось, що технічна можливість створення низькотемпературних надпровідних (НТНП) кабельних ліній ще не є достатньою умовою для їхньої реалізації. Значні капітальні витрати на НТНП матеріали, прокладання та кріостатування кабельної лінії, холодильну техніку, яка до того ж потребувала великих експлуатаційних витрат, робила НТНП кабельні лінії економічно не вигідними, якщо потужність лінії електропередачі становила менше 100 ГВт. На той час (та навіть і зараз) таких енергопотоків не спостерігалось. Тому дослідні роботи, що проводились на рівні гелієвих температур, можна розглядати як своєрідну підготовку для майбутніх упроваджень, і поява ВТНП матеріалів суттєво їх наблизила.

У США, Японії, Росії та інших країнах ведуться інтенсивні розробки тех-

нологій виробництва довгомірних ВТНП кабелів. У табл. 2.1 подані деякі дослідні проекти щодо надпровідних силових кабелів, а також досягнуті на наш час параметри [48]. Більшість схем охолодження для ВТНП кабелів використовує простий рефрижератор для рідкого азоту із замкненим циклом циркуляції.

Таблиця 2.1 – Проекти з розроблення силових ВТНП кабелів, 1992–2003 рр.

Організація	Місцезнаходження	Тип системи	Параметри
<i>Tokyo Electric Power Co.</i>	Токіо, Японія	Гнучкий, холодний діелектрик	100 м, 66 кВ, 1,25 кА
<i>NKT Denmark</i>	Данія	Гнучкий, теплий діелектрик	30 м, 36 кВ, 2 кА
<i>Pirelli-EDF</i>	Франція	Гнучкий, холодний діелектрик	50 м, 225 кВ, 2,6 кА
<i>Pirelli-ENEL/Edison Sp</i>	Італія	Гнучкий, холодний діелектрик	30 м, 132 кВ, 3 кА
<i>Southwire Co.</i>	Карроллтон, Джорджія, США	Гнучкий, холодний діелектрик	30 м, 12,5 кВ, 1,25 кА
<i>Pirelli-EPRI</i>	США та Італія	Гнучкий, теплий діелектрик	50 м, 115 кВ, 2 кА
<i>Pirelli-DOE SPI</i>	Детройт, Мічиган, США	Гнучкий, теплий діелектрик	120 м, 24 кВ, 2,4 кА

Надпровідні трансформатори і кабелі сформують основу повністю надпровідної підстанції майбутнього, найважливішого енергетичного об'єкта [49]. В цю систему можна встановити блоки надпровідних накопичувачів енергії та надпровідні обмежувачі струму КЗ. Сьогодні здатність обмежувати максимальний струм у підсистемі під час ушкодження звичайно забезпечується рядом механічних обмежувачів, які працюють протягом декількох циклів і на короткий період вимагають нульового струму.

2.2. Надпровідні кабелі як трубопроводи для енергоносіїв

Споживання як електричної, так і теплової енергій постійно збільшується. У майбутньому, внаслідок зростання чисельності населення планети, можна очікувати тільки збільшення споживання енергії. Очевидно, що при сучасному рівні споживання викопних ресурсів і обмеженості їхніх світових запасів, необхідні нові способи видобування, ошадливого використання та транспортування енергоносіїв. Використання традиційних енергоносіїв (нафта, природний газ, вугілля) призводить до значних викидів вуглекислого газу в атмосферу, що негативно позначається на екосистемі планети і змушує замислитися про істотне обмеження або про повну відмову від використання вуглеводневого палива, альтернативою якому може стати водень.

Уперше ця концепція почала розроблятися ще в епоху НТНП, однак вона

не отримала розвитку далі пілотних проектів [50]. З появою ВТНП і початком робіт з водневої енергетики інтерес до неї відродився в багатьох країнах світу. Водень може зберігатися і транспортуватися як у газоподібній, так і у рідкій фазі. Температура кипіння водню при атмосферному тиску становить 20,13 К, що дозволяє використовувати його як холодоагент для надпровідних кабелів із ВТНП [51–53] або дібориду магнію MgB_2 [53–55]. Такі кабелі є одночасно як лініями електропередач (ЛЕП), так і криогенними трубопроводами [56]. Була запропонована також конструкція комбінованого НП кабелю [51, 52], що одночасно доставляє до споживача газоподібний водень або природний газ.

Подібний підхід зможе задовольнити споживача як в електричній, так і у тепловій енергії, він сам зможе обрати найбільш зручний енергоносіє. Слід зазначити, що деякою мірою водень і електрика взаємозамінні: водень можна легко отримати за допомогою електролізу води, а електрика легко виробляється у паливних елементах або іншим способом. У роботі [52] розглядається конструкція однофазного надпровідного кабелю-трубопроводу (рис. 2.1), що передає 1 ГВт електроенергії та охолоджується рідким воднем, потік якого несе 1 ГВт енергії в хімічному еквіваленті. Основні характеристики кабелю-трубопроводу:

- діаметр труби з рідким воднем $D_1 = 15$ см;
- швидкість течії водню $V = 3,39$ м/с;
- напруга 5000 В;
- струм 100 кА;
- густина струму 250 А/мм².

У роботі [53] запропонована більш традиційна система: охолоджуваний рідким азотом ВТНП кабель-трубопровід, що несе газоподібний водень як джерело хімічної енергії (рис. 2.2). Газоподібний водень при температурі 77 К і тиску 12,8 МПа (робочий тиск сучасних газопроводів) передає удвічі менше енергії в хімічному еквіваленті порівняно з рідководневим трубопроводом при 20 К, але це можна компенсувати більш високим тиском у трубопроводі.

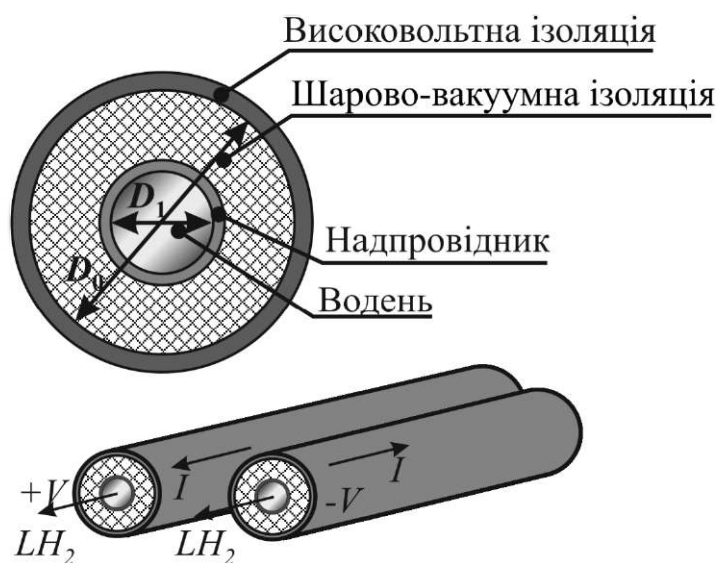


Рисунок 2.1 – Поперечний розріз надпровідного кабелю-трубопроводу, що охолоджується рідким воднем

У роботі [53] також запропонована конструкція комбінованого кабелю-трубопроводу зрідженого природного газу (рис. 2.3). Оскільки температура кипіння природного газу недостатня для охолодження надпровідників, в якості холодоагенту використовується рідкий азот.

Ідея НП кабелю-трубопроводу достатньою мірою дискусійна. Реалізація описаних вище моделей надзвичайно складна і багато з її положень вимагають ретельної перевірки. Зокрема, необхідно оцінити можливий ризик від близького сусідства великих струмів і високих напруг з вибухонебезпечними речовинами. Проте, можна сподіватися, що конструкції, які поєднують надпровідний кабель і криогенний трубопровід, знайдуть своє місце в енергетиці майбутнього.

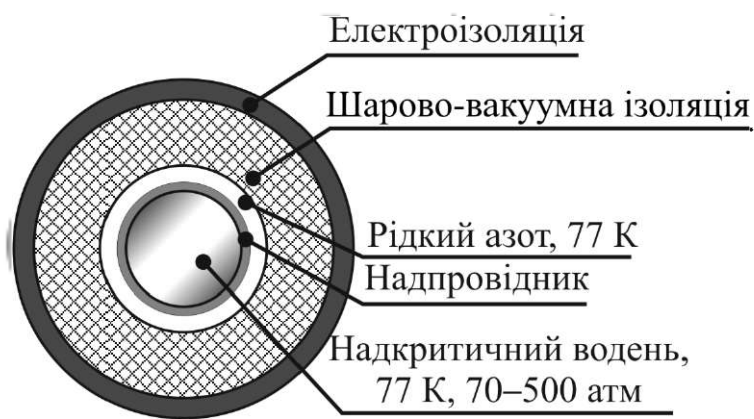


Рисунок 2.2 – Поперечний розріз надпровідного кабелю-трубопроводу, що переносить водень та охолоджується рідким азотом

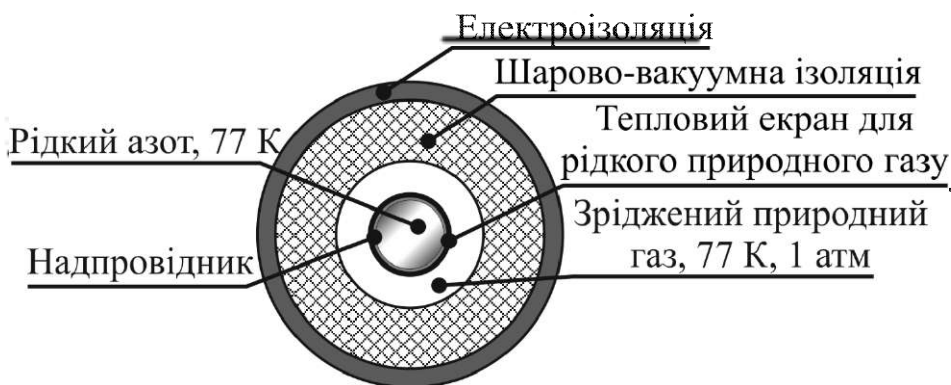


Рисунок 2.3 – Поперечний розріз надпровідного кабелю-трубопроводу, що несе зріджений природний газ із додатковим охолодженням рідким азотом

2.3. Найзначніші ВТНП кабельні проекти

На цей час відразу декілька масштабних проектів ВТНП кабелів або вже знаходяться у стадії експлуатаційних випробувань у складі енергосистеми, або упритул наблизилися до цього. В достатній мірі відпрацьована технологія прокладання ВТНП кабелів, розроблені спеціальні з'єднувальні муфти та струмовводи на великі напруги і струми. Для напруг до 35 кВ вже існує декілька конструкцій трифазних кабелів із загальним криостатом. Більшість ВТНП кабелів зроблено за схемою з холодним діелектриком, що значно спрощує конструкцію кабельних муфт і струмовводів. У табл. 2.2 подано дані з наймасштабніших

проектів ВТНП кабелів [57–78], на рис. 2.4 – їхній загальний вигляд.

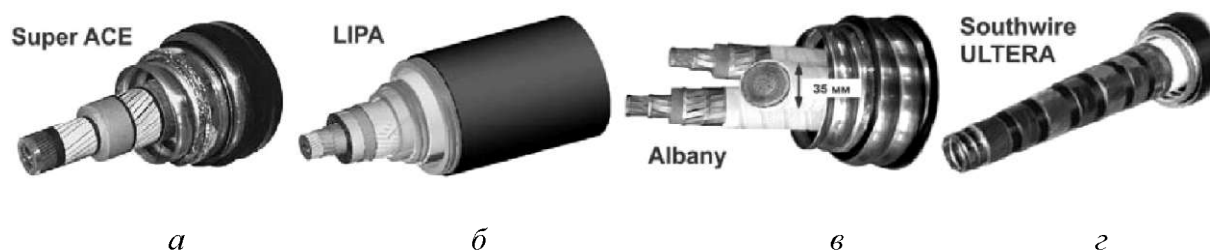


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд кабелів *Super-ACE* (а), *LIPA* (б), *Albany* (в) та *Southwire – ULTERA* (г)

Таблиця 2.2 – Найзначніші проекти ВТНП кабелів

Параметри	Назва проекту / країна			
	<i>Super-ACE</i> Японія	<i>Project LIPA</i> США, Німеччина, Франція	<i>Albany Project</i> США, Японія	<i>Southwire - ULTERA</i> США, Данія
Строки виконання	2000–2005 рр.	2003–2007 рр.	2003–2006 рр.	2003–2006 рр.
Строки випробувань	Закінчені в 2005 р.	Розпочаті в 2007 р.	Розпочаті в липні 2006 р.; закінчені влітку 2008 р.	Розпочаті в серпні 2006 р.
Матеріал	Bi-2223 стрічка <i>Furukawa</i>	Bi-2223 стрічка <i>AMSC</i>	Bi-2223 стрічка <i>Sumitomo</i> *	Bi-2223 стрічка <i>AMSC</i>
Тип кабелю	Однофазний	Три окремі фази в індивідуальних кріостатах	„Три в одному” плюс з’єднувальна муфта	Триаксіальний
Робоча напруга, кВ	77	138	34,5	13,8
Потужність, що передається, МВА	133	574	48	69
Номінальний робочий струм, А	1000	2400	800	до 3000
Критичний струм I_K , А	1400			
Число фаз	1	3	3	3
Довжина, м	500	660	350 (320+30)*	200
Зовнішній діаметр, мм	133	-	135	143
Максимальний струм КЗ, кА	-	69	23	20
Максимальна тривалість КЗ, с	-	0,25	0,63 (випробувано при 0,13)	
Температура холодоагенту, К	65–77	65–71	67–77	65–80
Холодопродуктивність кріогенної установки, кВт	6 (при 77 К)	більше 12	5 (при 77 К)	2
Максимальна витрата холодоагенту, л/хв	50	-	50	-
Тиск холодоагенту, атм.	10	2,6 – 7,5	1 – 5	-

* Вставка довжиною 30 м із стрічки Bi-2223 була замінена влітку 2007 р. вставкою, виготовленою із ВТНП стрічки 2-го покоління виробництва *Superpower*.

Наведені проекти та ще деякі розглянемо більш детально.

2.3.1. Однофазний ВТНП кабель *Super-ACE*

Японський проект *Super-ACE* (2000–2005 рр.), який був спрямований на дослідження та розвиток фундаментальних технологій НП електроенергетичного устаткування змінного струму, просувався за фінансовою підтримкою *METI* та *NEDO*, складався з чотирьох напрямків і був розподілений між 13 компаніями та корпораціями, членами Асоціації технічних досліджень НП обладнання і матеріалів *Super-GM*. Одним з напрямків проекту *Super-ACE* було створення потужних ВТНП кабелів.

Для того щоб продемонструвати практичну можливість створення довгомірних ВТНП кабелів, у рамках проекту *Super-ACE* протягом 2000–2005 р. був створений і випробуваний однофазний ВТНП кабель довжиною 500 м (табл. 2.2) [58–64]. Довжина кабелю вибрана не випадково: в існуючих японських енергосистемах максимальна відстань між люками (для підземних ділянок кабелів) складає 500 м, тобто кріокулери можуть бути встановлені на відстані 500 м один від одного.

Номінальна напруга та струм складають, відповідно, 77 кВ та 1 кА. Кабель виконаний за схемою „з холодним діелектриком” (рис. 2.5), складається з наступних компонентів:

- багатожильний мідний полий формер площею 250 мм² (Ø 28 мм);
- ВТНП провідник (один шар Ø 30 мм), навитий з 22-х ВТНП стрічок 4×0,25 мм² (із критичним струмом близько 70 А кожна) із кроком спіралі 300 мм;
- багат шарова електроізоляція товщиною 8 мм з поліпропіленового ламінованого паперу *PPLP* (*Polypropylene Laminated Paper*), імпрегнованого рідким азотом, стандартною товщиною 1,25 мм (Ø 48 мм);
- ВТНП екран (один шар Ø 58 мм), навитий з 36 стрічок Ві-2223 із кроком спіралі 300 мм;
- внутрішня (Ø 92 мм) та зовнішня (Ø 124 мм) труби кріостата, у проміжку між якими розташована багат шарова суперізоляція;
- оболонка з полівінілхлориду (ПВХ) (Ø 133 мм).

Зовнішній діаметр кабелю складає 133 мм, що дозволяє встановити його у підземному каналі із внутрішнім діаметром 150 мм – стандартним для кабелів напругою 66–77 кВ у японських енергокомпаніях.

Охолодження кабелю здійснюється по двох каналах – усередині мідного формера та між внутрішнім кріостатом і ВТНП екраном.

ВТНП кабель, вироблений компанією *Furukawa Electric Co.* зі стрічки Ві-2223 власного виробництва, проходив випробування в лабораторії Цен-

трального дослідницького інституту електроенергетики *CRIEPI* (*Central Research Institute of Electric Power Industry*) у м. *Yokosuka* із березня 2004 р. по березень 2005 р.

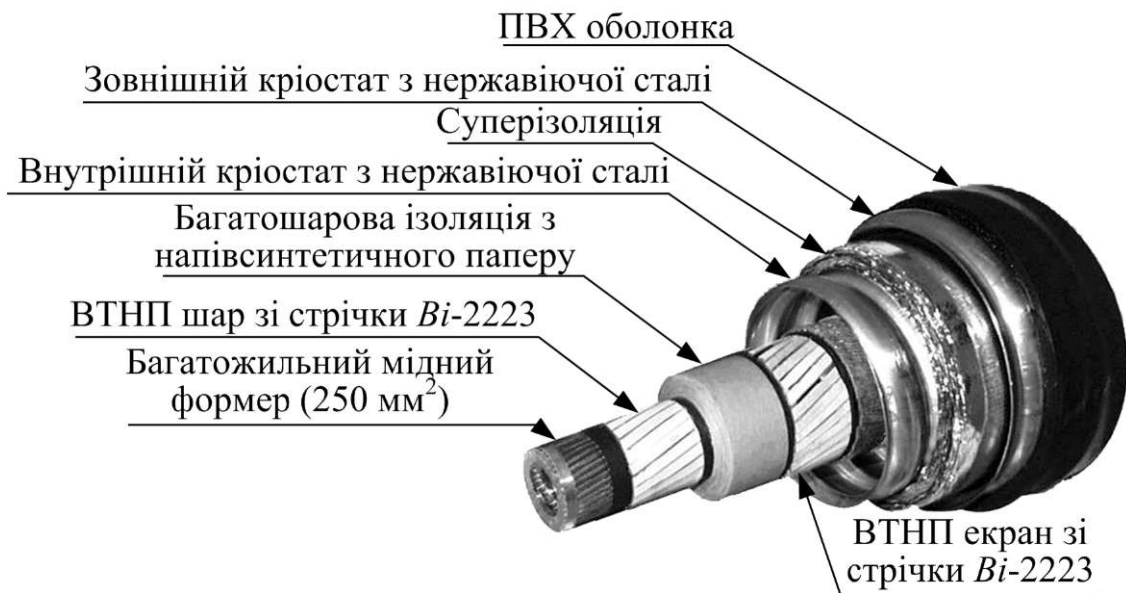


Рисунок 2.5 – Конструкція ВТНП кабелю *Super-ACE*

Розташування ВТНП кабелю є тривимірним, кабель містить декілька характерних ділянок (рис. 2.6):

- 1) підземну секцію довжиною 80 м, заглиблену на 60 см, що імітує фактичне підземне прокладання кабелю (рис. 2.7, ділянка *C12*);
- 2) висотну секцію (рис. 2.8, *a*) довжиною 10 м, розташовану на висоті 10 м, що імітує міст над рікою (рис. 2.7, ділянки *C2 – C6*);
- 3) компенсуючу секцію (рис. 2.8, *б*) довжиною 15 м з відгалуженням для поглинання теплового стиску та розширення кабелю протягом заохолодження та відігрівання (рис. 2.7, ділянка *C9*); оскільки при заохолодженні рідким азотом кабель стає коротшим, компенсуюча секція розташована посередині між прямими секціями 8 та 10, з тієї ж причини конструкція струмовводів є рухомою;
- 4) дві секції *U*-подібної форми з радіусом вигину 5 м (рис. 2.7, ділянки *C7, C11*).

Система кріогенного забезпечення (табл. 2.3) містить шість кріокулерів *Stirling* (4 для кабелю і 2 для струмовводів), азотний резервуар, який утримує рідкий азот у переохолодженому стані, та 2 насоси, які просувають рідкий азот у кабель та струмовводи [58].

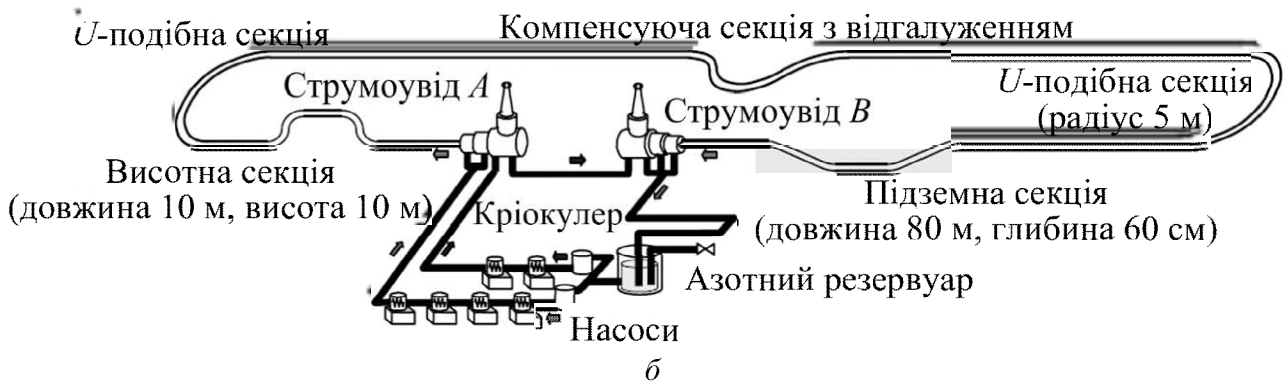
Струмоувідні муфти (1 кА / 77 кВ) були розроблені та виготовлені компаніями *Furukawa Electric Co.* та *Chubu Electric Power Co.*

У ході випробувань [61–63] були визначені теплоприпливи (1,21 Вт/м), падіння тиску (100 Па/м при витратах холодоагенту 50 л/хв), критичний струм (табл. 2.4), проведені дослідження при відключенні системи кріогенного забезпечення

ня на декілька годин, досліди при двократному перевантаженні з напруги, досліджена електрична міцність ізоляції. Втрати на змінному струмі складають 1,34 Вт/м при струмі 900 А та середній температурі 73 К. Було виявлено, що при перевищенні значення струму 900 А втрати на змінному струмі різко зростають.



а



б

Рисунок 2.6 – Тривимірне розташування ВТНП кабелю *Super-ACE* довжиною 500 м: а – фотографія полігону; б – схема із позначенням характерних ділянок

Були проведені випробування термомеханічних властивостей при заходженні та відігріванні кабелю [64] – за допомогою рентгенівського випромінювання (*X-ray*) досліджувався рух кабелю у шістнадцяти контрольних точках, позначених на рис. 2.7.

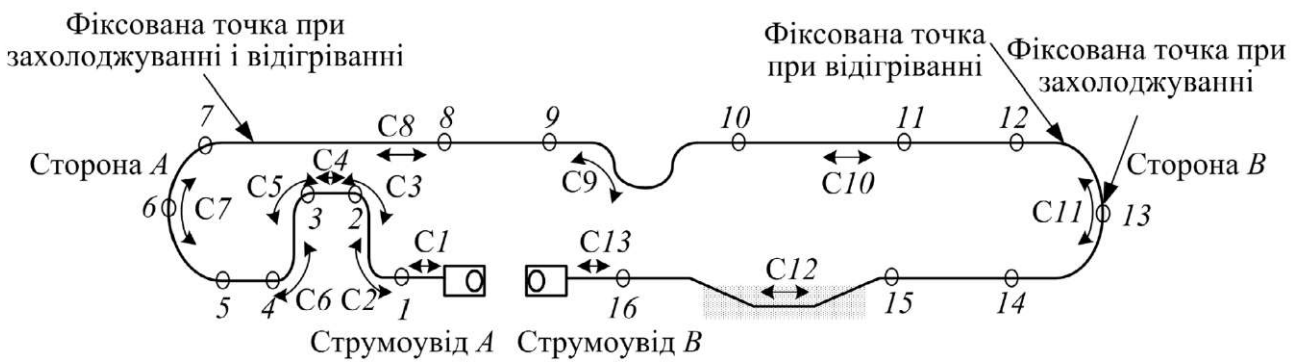


Рисунок 2.7 – Секції (C1–C13) для вилучення зразків для остаточного тесту ВТНП кабелю *Super-ACE* із позначенням контрольних точок (1–16) для дослідження термомеханічних характеристик



а

б

Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд висотної секції (а) ВТНП кабелю *Super-ACE* та компенсуючої секції з відгалуженням (б)

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики системи криогенного забезпечення ВТНП кабелю *Super-ACE*

Параметр	Значення
Об'єм азотного резервуара, л	1000
Об'єм рідкого азоту для ВТНП кабелю, л	2000
Продуктивність кріонасоса, л/хв	10–50 (різниця у тиску < 0,5 Па)
Потужність кріокулерів <i>Stirling</i> , кВт	1,0 (при 77 К) 0,8 (при 65 К)
Робоча температура, К	65–77
Максимальний тиск, МПа	1

Таблиця 2.4 – Критичний струм ВТНП кабелю *Super-ACE* довжиною 500 м при різних значеннях температури

Параметри	69 К	73 К	77 К
I_k ВТНП провідника, А	2290	1910	1570
I_k ВТНП екрана, А	1965	1620	1350

Перше заохолодження кабелю від кімнатної температури до температури рідкого азоту зайняло 340 год. Протягом цього заохолодження фіксована точка на стороні *A* була розташована близько 7 м праворуч від контрольної точки № 7, фіксована точка на стороні *B* була розташована біля контрольної точки № 13, і відстань між ними складала близько 230 м (рис. 2.9). Скорочення довжини кабелю між фіксованими точками склало 690 мм, що вплинуло на поведінку компенсуючої секції (рис. 2.10). Причина, з якої фіксована точка на стороні *A* була розташована не біля контрольної точки № 6, а на 15 м далі, полягає у тому, що висхідна ділянка висотної секції не була закріплена, отже висхідна ділянка також виконувала роль компенсуючої секції.

Під час відігрівання фіксована точка на стороні *A* залишилась майже на тому ж місці, проте фіксована точка на стороні *B* опинилась на 8 м ліворуч від контрольної точки № 13. Відігрівання від температури рідкого азоту до кімнат-

ної температури зайняло 120 год.

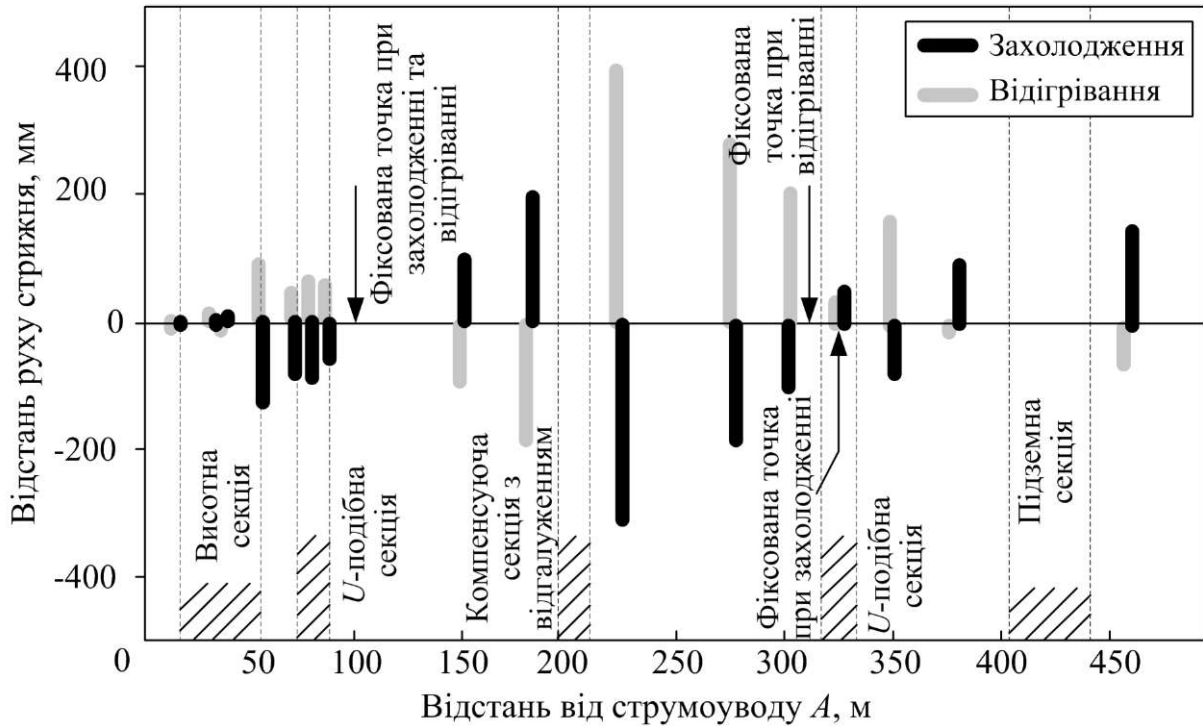


Рисунок 2.9 – Рух стрижня кабелю *Super-ACE* у контрольних точках під час заходження та відігрівання

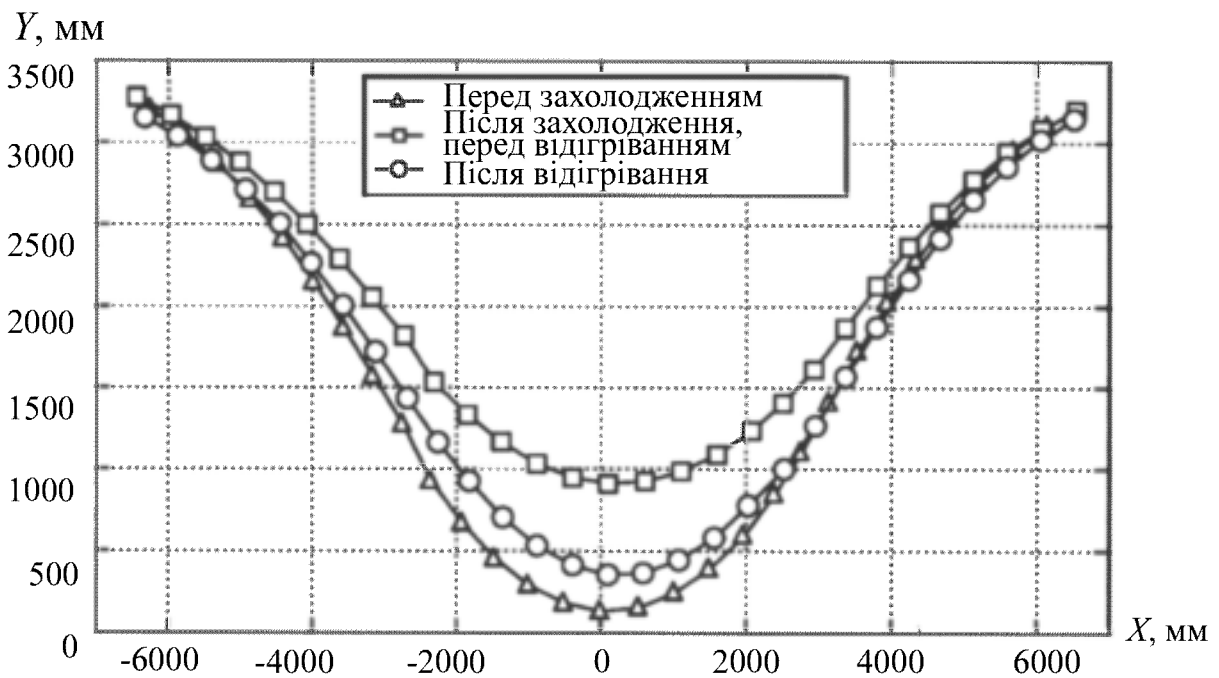


Рисунок 2.10 – Поведінка компенсуючої секції кабелю *Super-ACE* під час заходження та відігрівання

Компенсуюча секція – єдина, що була розташована у приміщенні. Спостереження за нею було досліджено за допомогою шістьох цифрових камер, які фотографували її з відстані 2,6 м кожні 30 хв. На оболонці кабелю був нанесений ряд променевідбиваючих відміток діаметром 10 мм з інтервалом 500 мм. На рис. 2.10 позначено розташування цих відміток, з'єднаних плавною лінією,

яка повторює розташування кабелю для трьох випадків – до першого заохолодження, після заохолодження і після відігрівання. Під час першого заохолодження рух вершини параболи компенсуючої секції склав 780 мм вгору і 95 мм праворуч, а кабель скоротився на 690 мм. Під час відігрівання рух вершини параболи компенсуючої секції склав 560 мм вниз, а кабель розтягнувся на 490 мм, тобто кабель не повернувся у вихідний стан.

Отже, наявність компенсуючої секції полегшує умови роботи ВТНП кабелю, зменшує механічні перенапруження та імовірність появи механічних ушкоджень.

Після закінчення усіх тестів був проведений остаточний тест – кабель був демонтований і декілька зразків довжиною по 6 м кожний (з різних секцій) були вилучені з нього та ретельно досліджені. Ніякої деградації критичного струму у ВТНП провіднику не було визначено, але локальна деградація ВТНП екрана була виявлена у секціях *U*-подібної форми (рис. 2.7, ділянки *C7*, *C11*), у компенсуючій секції (ділянка *C9*) та у підземній секції (ділянка *C12*). Деградація ця могла виникнути під час випробувань на струмове перевантаження і була вона у межах припустимого діапазону близько 5 %. Ділянки, де спостерігалась деградація, були настільки малими, що її неможливо було б виявити при тестуванні цілого кабелю довжиною 500 м.

2.3.2. Трифазні ВТНП кабелі в індивідуальних кріостатах

ВТНП кабель LIPA

Компанії *American Superconductor*, *Nexans* (Німеччина), *Long Island Power Authority (LIPA)* та *Air Liquide* вже декілька років займаються створенням високовольтного ВТНП кабелю для установлення в мережі *LIPA* у Нью-Йорку [65–69].

У 2007 р. були виготовлені і доставлені до місця монтажу три фази ВТНП кабелю в індивідуальних кріостатах, струмоувідні муфти разом з їхніми кріостатами, ізолятори струмовводів та інше устаткування. Одна з фаз кабелю одразу була встановлена в кабельному каналі, монтаж інших фаз та остаточне складення ВТНП кабелю були завершені наприкінці 2007 р. Система кріогенного забезпечення також була перевезена і змонтована на місці установлення кабелю. Протягом декількох місяців проходили приймальні випробування кріогеніки, які продемонстрували прийнятні результати. Виконано більшу частину робіт з підготовки площадок під розподільні пристрої на кінцях кабелю.

Найпотужніший на сьогоднішній день трифазний ВТНП кабель для проєкту *LIPA* (потужністю 574 МВА, 138 кВ / 2400 А, довжиною 660 м), виготов-

лений компанією *Nexans*, яка є світовим лідером у розробленні гнучких кріостатів.

Для виготовлення кабелю було використано 155 км ВТНП стрічкових проводів 1-го покоління Ві-2223. Скрутка кабелю здійснювалась на заводі компанії *Nexans* у Норвегії.

На заводі компанії *Nexans* у Німеччині були виготовлені гнучкі кріостати для фаз ВТНП кабелю. Між внутрішніми і зовнішніми оболонками гнучких кріостатів наносилося кілька шарів суперізоляції – алюмінієвої фольги із прокладкою зі скла-волокна. Через кожні 100 м до кріостатів приварювалися порти для утворення вакууму у внутрішньому просторі.

Конструкція кабелю базується на коаксіальних гнучких трубах з нержавіючої сталі. У просторі між ними розташована фольга з відбиваючим алюмінієвим покриттям і фіксатори з низькою теплопровідністю (рис. 2.11) [68, 69, 79]. Повітря у просторі між сильфонами відкачане, тиск становить 10^{-5} мбар, усі кріостати проходять тест на герметичність на гелієвому течешукачеві. Це перший у світі ВТНП кабель з потужністю, порівнянною з потужністю стандартної лінії електропередач на 380 кВ. Отримані цікаві дані щодо втрат у цьому кабелі: основний відсоток припадає на теплові втрати (71,5 %), за ними йдуть діелектричні, пропорційні $\tan \delta$ діелектрика – ламінованого поліпропілену (18 %) і гістерезисні втрати (8,4 %). Резистивні витрати і витрати на вихрові струми складають, відповідно, 1,8 та 0,3 %.

Струмоувідні муфти і ізолятори для ВТНП кабелю були виготовлені і випробувані на заводі *Nexans* у Кале (Франція). Крім шести штатних струмоувідних муфт було також виготовлено три запасних. Конструкція струмоувідної муфти зображена на рис. 2.12 [68, 69].

Після протягання кабелю через гнучкі кріостати і монтажу всіх струмо-



Рисунок 2.11 – Конструкція високовольтного ВТНП кабелю виробництва *Nexans* для проекту *LIPA*

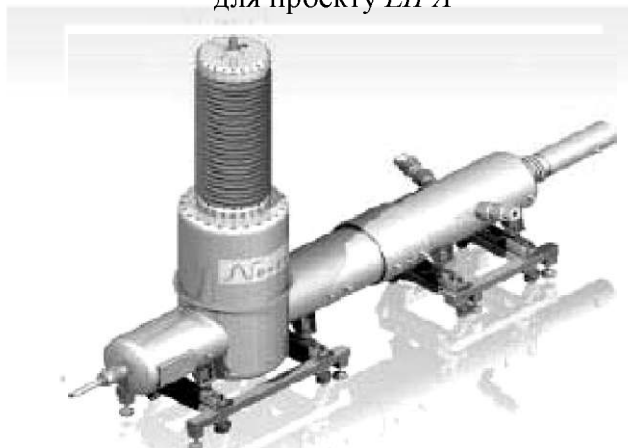


Рисунок 2.12 – Струмоувідна муфта виробництва *Nexans*, зібрана із ізолятором

увідних муфт усі вузли були з'єднані між собою, було проведено вакуумне відкачування і установлення вимірювальної техніки. ВТНП кабель має бути здатний витримувати струми короткого замикання величиною до 69 кА протягом 200 мс. На рис. 2.13 подана криогенна схема ВТНП кабелю *LIPA* виробництва *Air Liquide* [80].

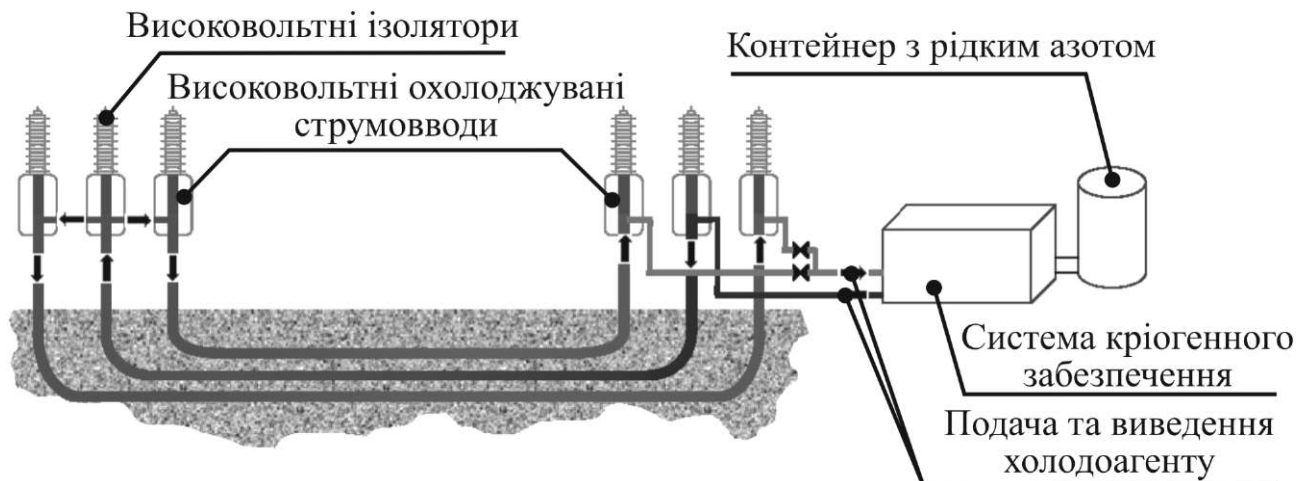


Рисунок 2.13 – Криогенна схема ВТНП кабелю *LIPA*

Відповідно до теплоприпливів і тепловиділень у кабелі на рівні 1–2 Вт на погонний метр, холодопродуктивність криогенної установки складе від 2 до 10 кВт залежно від конструкції та довжини кабелю. Холодоагент (рідкий азот з температурою від 66 до 77 К) циркулює під тиском по замкненому контуру. Криогенна установка розташована на одному з кінців кабелю, і якщо всі фази кабелю знаходяться у загальному криостаті, має бути передбачений канал для повернення рідкого азоту. Якщо ж кожна фаза кабелю укладена у свій власний криостат, подача азоту здійснюється через одну фазу, а повернення до криогенної установки відбувається через криостати двох інших фаз (рис. 2.13). Варто звернути увагу на те, що гідравлічний опір ВТНП кабелю зростає пропорційно квадрату збільшення його довжини; якщо у ВТНП кабелі в Олбані довжиною 350 м тиск холодоагенту становить близько 6 атм, то вже в кабелі у Лонг-Айленді (*LIPA*) довжиною 660 м робочий тиск досяг 20 атм, що робить створення ВТНП кабелів довжиною понад 1 км проблематичним без використання додаткових криогенних насосів.

У квітні 2008 р. змонтовану кабельну лінію (рис. 2.14) було підключено до навантаження, а у червні – в комерційну мережу. Це було перше у світі введення підземної ВТНП кабельної лінії електропередачі в комерційну експлуатацію. Установлений в електромережі ВТНП кабель здатний проводити у 150 разів більший струм, ніж мідні проводи аналогічного перетину. Це дозволяє використовувати набагато меншу кількість проводу, передаючи у 5 разів більшу

потужність при суттєво меншій ширині смуги відчуження для прокладення кабелю.

При повному навантаженні ВТНП кабель *LIPA* здатний передавати до 574 МВА електроенергії, і потужності цієї достатньо для енергопостачання близько 300 тисяч будинків.

Паралельно з роботами за проектом *LIPA* компанія *AMSC* розробляє проект високовольтного кабелю *LIPA-2* на базі ВТНП провідників 2-го покоління [66, 67]. Основними відмінностями *LIPA-2* від попереднього проекту будуть:

- ▼ легкорозбірний кріостат, що дозволяє за необхідності здійснювати ремонт кабелю без повного демонтажу фази;
- ▼ розроблення з'єднувальної муфти на напругу 138 кВ;
- ▼ обмеження струму КЗ самим ВТНП кабелем за рахунок використання ВТНП проводів типу 344S з високим питомим опором після втрати надпровідності;
- ▼ відповідність вимогам *Secure Super Grids* на обмеження струму КЗ;
- ▼ здійснення охолодження високоекономічним азотним зріджувачем, що працює за зворотним циклом Брайтона з холодопродуктивністю 20 кВт.

Завданням компанії *AMSC* буде створення однофазного кабелю довжиною 600 м на основі ВТНП проводу 2-го покоління типу „344”. Для виготовлення кабелю з такою довжиною *AMSC* має виробити 60 км провідника, покритого стабілізуючим покриттям з високим питомим опором. Такий провідник здатний обмежувати струми КЗ.

При струмі менше критичного ВТНП провідник має нульовий опір, а при перевищенні струмом у мережі критичного значення I_k у ВТНП провідника практично миттєво з'являється високий питомий опір.

Виготовленням кабелю і системи криогенного забезпечення буде займатися колишня команда – компанії *AMSC*, *Nexans* та *Air Liquide*.

Це завдання є частиною проекту загальною вартістю 106,3 млн дол., націленого на модернізацію національної енергосистеми США, затвердженого *DOE* 28 червня 2007 р. і розрахованого на 5 років (2007–2012 рр.). Керівником проє-

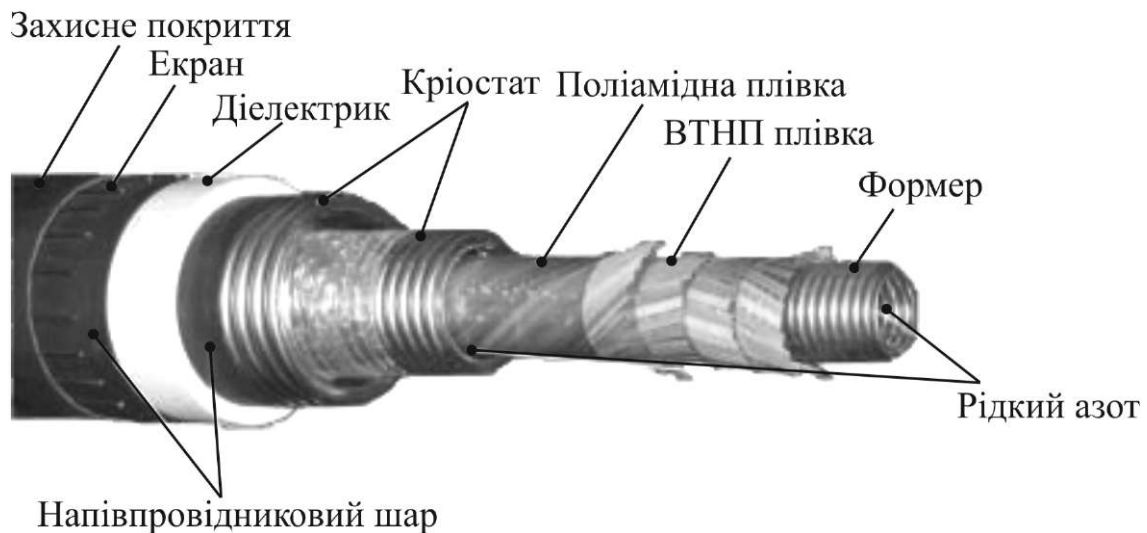


Рисунок 2.14 – Струмоувідні муфти та початкова частина ВТНП кабелю *LIPA* на площадці

кту призначена *National Energy Technology Laboratory*, фінансова частка участі *DOE* у проекті складає 50 %. Фінанси розподіляються між трьома окремими проектами, три з яких присвячені розробленню НП обмежувачів струму, а два – подальшому вдосконалюванню ВТНП кабельних мереж.

Китайські кабельні проекти InnoPower, Changtong та SECRI.

У Китаї достатньо успішно реалізовано декілька проектів зі створення дослідних зразків ВТНП кабелів. У 2002 р. були розпочаті роботи зі створення і прокладання трифазного ВТНП кабелю (рис. 2.15, табл. 2.5) довжиною 33,5 м (35 кВ / 121 МВА) [81–83]. Кабель був виготовлений китайською компанією *InnoPower* з ВТНП проводу на основі Ві-2223 виробництва *Innova Superconductor Technology Co. (InnoST)*, Китай.



a



б

Рисунок 2.15 – Трифазний ВТНП кабель виробництва *InnoPower* довжиною 33,5 м: *a* – конструкція однієї фази; *б* – зовнішній вигляд трьох фаз кабелю та струмоуводів

Таблиця 2.5 – Специфікація ВТНП кабелю виробництва *InnoPower*

Параметр	Значення
Довжина (від фланця до фланця), м	33,5
Номинальна напруга, кВ	35
Номинальний струм (діюче значення), кА	2
Максимальний короткочасний струм, кА	20 (протягом 2 с)
Зовнішній діаметр кабелю, мм	112
Потужність кріокулера при 75 К, Вт	2000
Температура на вході, К	70–72
Температура на виході, К	74–76
Маса погонного метра кабелю, кг	9,2
Втрати на змінному струмі, Вт, на фазу (виміряні при струмі 1500 А)	≈30

Кабельна система складається з трьох окремих фазних кабелів довжиною 33,5 м кожний, шести струмоводів, виконаних з оплетених мідних проводів, і станції охолодження рідким азотом, що працює за замкненим циклом.

Кабель містить нержавіючий формер, на який навиті чотири шари ВТНП стрічок Ві-2223 – 21, 24, 24, 21 стрічки відповідно, отже загалом на кожну фазу витрачено 90 стрічок. Кожна фаза кабелю розміщена у власному кріостаті, кабель виконаний за схемою з „теплим” діелектриком. Гнучкі кріостати виготовила компанія *Nexans*, їх зовнішній і внутрішній діаметри складають 43 та 70 мм відповідно. Рідкий азот прокачується крізь порожній формер із внутрішнім діаметром 30 мм і проміжок між ВТНП кабелем та внутрішньою стінкою гнучкого кріостата. Електрична ізоляція ВТНП кабелю виконана з поліетилену *XLPE* товщиною 11,9 мм.

У 2004 р. кабель був установлений на підстанції *Puji* Китайської південної енергомережі (*Chinese Southern Power Grid*) поблизу м. *Kunming* провінції *Yunnan*. Кабель замінив частину лінії напругою 35 кВ, що розподіляє електроенергію у місто із сотисячним населенням та чотирма промисловими споживачами, у тому числі двома металургійними комбінатами. При прокладанні кабель був вигнутий під кутом 90°. З тих пір ВТНП кабель працює без перебоїв. За цей час кабельна система передала більш ніж 300 млн кВт-год електроенергії. В ході експлуатації кабелю трапилось декілька аварій, майже усі вони були пов’язані із системою кріогенного забезпечення. Періодичність обслуговування системи кріогенного забезпечення ВТНП кабелю складає 6 місяців, полягає воно у перевірці та заміні підшипників насосів, перевірці тиску компресорів рефрижератора та перевірці вакууму у кабелі та кріостатах струмоводів.

Інший кабельний проект – трифазний ВТНП кабель *Gansu Changtong* довжиною 75 м (10,5 кВ / 1,5 кА), виготовлений у Електротехнічному інституті *IEE (Institute of Electrical Engineering)* за підтримки Китайської академії наук

CAS (*Chinese Academy of Science*), програми „863”, спрямованої на розвиток та дослідження високих технологій, у тому числі застосуванні надпровідності в електроенергетиці, та енергокомпанії *Changtong Power Cable Company Ltd.*

Кабель виконаний з Bi-2223 проводу у срібній матриці виробництва компанії *AMSC* за схемою з „теплим” діелектриком, кожна фаза кабелю знаходиться у власному гнучкому кріостаті. Параметри кабелю наведені у табл. 2.6 [81, 82].

Таблиця 2.6 – Специфікація ВТНП кабелю виробництва *IEE* довжиною 75 м

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр формера, мм	32,7
Зовнішній діаметр струмонесучого елемента, мм	34,6
Кількість шарів струмонесучого елемента	2
Кількість стрічок у струмонесучому елементі	36
Зовнішній діаметр поліамідної плівки, мм	39
Внутрішній / зовнішній діаметр кріостата, мм	49,5 / 92,0
Товщина теплового діелектрика, мм	4,5
Товщина мідного екрана, мм	0,4
Товщина ПВХ оболонки, мм	5,0
Зовнішній діаметр кабелю, мм	117
Результати попередніх випробувань	
Критичний струм (постійний) при 74 К, кА	до 5,3
Змінний струм (при 400 В), кА	до 1,6*

* обсяг навантаження був обмежений кількістю і потребами споживачів у мережі

Кожний кабель складається з 36 стрічок, спіралью намотаних у два шари і припаяних до мідних струмоводів припоем з низькою температурою плавлення.

Кріостат складається з двох концентричних гофрованих труб з нержавіючої сталі. Зовнішній діаметр кріостата 92 мм, виконаний він з трьох послідовно з'єднаних секцій довжиною 25 м кожна з метою відпрацювати технологію стикування кріостатів для створення у майбутньому довгомірних кабелів.

Струмоводи, розроблені та виготовлені в *IEE*, складаються з вакуумних камер, струмових стрижнів, труби передачі рідкого азоту та термоелектричної ізоляції.

Кріогенна система була виготовлена у Технічному інституті фізики та хімії Китаю (*Technical Institute of Physics and Chemistry*).

Кабель, установлений на дослідному полігоні, розташований у формі трьох літер *U* і імітує таким чином реальне розташування кабелів (рис. 2.16).

Після випробувань ВТНП кабель був установлений у локальній діючій розподільній енергомережі *Changtong Power Cable Company* у м. *Baiyin* і з 14 грудня 2004 р. він успішно експлуатується (з тих пір кабель напрацював більше 7000 год без будь-яких збоїв). Напруга мережі складає 6,6 кВ.



Рисунок 2.16 – Розташування трифазного ВТНП кабелю виробництва *IEE* довжиною 75 м

AMSC уклала угоду із Шанхайським дослідницьким інститутом електричних кабелів *SECRI* (*Shanghai 'Electric Cable Research' Institute*) на поставку ВТНП проводів для силових кабелів Шанхайської енергомережі (*Shanghai Grid*) [84]. *SECRI* є провідним інститутом у Китаї з досліджень і розробок проводів та кабелів, а також зі стандартизації, випробування та сертифікації силових кабелів для китайських електромереж. Мета альянсу *AMSC+SECRI* – розроблення і доведення до серійного використання ВТНП силових кабелів у Китаї для передачі та розподілу електричної потужності, яка постійно збільшується.

На цей час *AMSC* є пріоритетним постачальником ВТНП проводів для *SECRI* і консультантом з питань розроблення ВТНП кабельних систем. У свою чергу *SECRI*, згідно з укладеною угодою, застосовує мережні рішення *D-VAR(R)*, розроблені *AMSC*, як основні для китайських мереж. Зазначимо, що система *D-VAR(R)* забезпечує стабільну напругу мережі, яку традиційно підтримують більш дорогі електрогенератори. Згідно з оцінками, установлення цієї системи дозволить заощаджувати щорічно до 10 млн дол. на експлуатаційних витратах.

SECRI планує розробити та сертифікувати ВТНП силові кабелі для передачі основним виробникам кабелів у Китаї. На першому етапі виконання угоди, використовуючи ВТНП проводи *AMSC*, *SECRI* має виготовити і випробувати на своєму дослідному виробництві прототип силового кабелю довжиною 30 м у мережі напругою 35 кВ. На наступному етапі планується встановити ВТНП кабель у споживчій мережі, імовірно в мережі Шанхая.

Російський ВТНП кабельний проект ВНДІКП

У травні 2007 р. головою Правління Відкритого акціонерного товариства (ВАТ) „Російське акціонерне товариство „Єдина енергетична система Росії” („РАТ „ЄЕС Росії”) А.Б. Чубайсом була затверджена програма з використання та застосування в електроенергетиці технологій і устаткування на основі надпровідності на 2007–2015 рр.

Програмою передбачається створення і випробування у 2007–2008 рр. експериментального кабелю довжиною 30 м, розроблення, виготовлення і введення в дослідно-промислово експлуатацію ВТНП кабелю довжиною 200–500 м у 2009 р. та згодом введення у експлуатацію у схемах енергопостачання м. Москва. ВТНП кабелю довжиною понад 1 км. Головним виконавцем програми призначено Всеросійський Науково-дослідний інститут кабельної промисловості (ВНДІКП).

Слід зазначити, що ВНДІКП має давній досвід створення надпровідних силових кабелів:

- розробки 70-х років – НТНП кабелі; випробування прототипу довжиною 50 м, кабель з Nb_3Sn з рекордним струмом 126 кА;
- розпочаті у 2001 р. разом з компанією *CONDUMAX* (Мексика) розробки ВТНП кабелів призвели до світового рекорду із струмів – більше 10 кА (випробування були проведені в Мексиці).

Розробленням 30-метрового кабелю передували численні технологічні експерименти, розроблення та випробування відрізка кабелю довжиною 5 м [85–87]. В ході цих робіт у 2005 р. був розроблений і виготовлений дослідний стенд для коротких (до 5 м), але повномасштабних за перетином моделей кабелів.

Стенд включає джерело постійного струму на 800 А (із цифровим керуванням);

- ▶ джерело постійного струму на 6,3 кА;
- ▶ джерело змінного струму із діючим значенням 3,8 кА.

Центральний елемент стенда – гнучкий дослідний кріостат (установлений у листопаді 2005 р.) загальною довжиною 6,8 м.

Розроблені та налагоджені багатоканальні цифрові системи збирання і аналізу даних та керування експериментами:

- рівні чутливості – від 1 мкВ; швидкодія – до 10^5 вимірів у секунду на канал;
- число каналів від 2 до 16.

Метою проекту експериментального кабелю довжиною 30 м, який є першим етапом програми „РАТ „ЄЕС Росії”, є відпрацювання технічних рішень для створення дослідно-промислового зразку ВТНП кабелю.

Основними завданнями проекту з розробки і виготовлення експериментального силового ВТНП кабелю на напругу 20 кВ довжиною 30 м на базі ВТНП матеріалів 1-го покоління на 2007–2008 рр. були [87]:

- * розроблення і виготовлення ВТНП кабелю довжиною 30 м;
- * розроблення проекту полігона для випробувань ВТНП кабелю довжиною 30–200 м;
- * розроблення методик випробувань;
- * закупівля і монтаж устаткування полігона з його наступним налагодженням та введенням в експлуатацію;
- * монтаж і випробування ВТНП кабелю довжиною 30 м.

На початку 2008 р. усі заплановані за графіком роботи були успішно виконані – випробувальний полігон був повністю підготовлений до установаження устаткування, закінчено виготовлення ВТНП кабелю, кріогенної муфти для струмоуведення та розпочаті роботи з монтажу кабелю на полігоні.

Кабель виконаний трифазним, кожна фаза знаходиться у своєму власному кріостаті (рис. 2.17). Конструкція ВТНП кабелю (рис. 2.18) розроблялася відповідно до наступних технічних вимог:

- ▼ номінальна напруга – 20 кВ;
- ▼ максимальна робоча напруга – 24 кВ;
- ▼ номінальний струм – 1500 А;
- ▼ припустиме перевантаження за струмом – 30 % (~2000 А) протягом 6 год;
- ▼ стає значення струму трифазного КЗ у кабелі – 12,5–31,5 кА;
- ▼ час існування режиму КЗ – 0,25–1,5 с;
- ▼ питома потужність втрат у кабелі на номінальному струмі – до 6 Вт/м на три фази;
- ▼ теплоприпливи через струмовводи і гнучкі кріостати – до 1200 Вт.

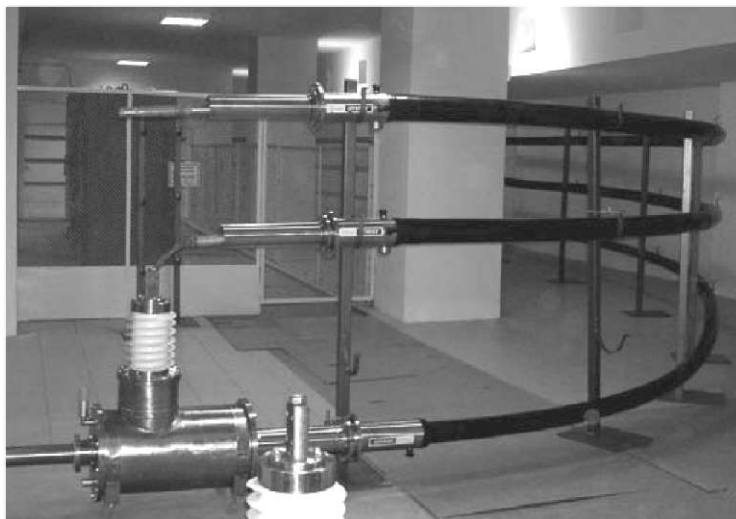


Рисунок 2.17 – Перший російський силовий ВТНП кабель довжиною 30 м, створений у ВАТ «ВНДКП», на полігоні ВАТ «НТЦ електроенергетики»

Для дослідження технологічності різних ВТНП стрічок при виробництві кабелю, а також втрат на змінному струмі, у кабелі використовувалося два типи надпровідних ВТНП стрічок: виробництва *AMSC* (США) із критичним струмом 115–120 А і *Sumitomo Electric Industry* (Японія) із критичним струмом близько 100 А. Одна фаза кабелю виготовлена із стрічок типу *CT-OP™* виробництва *Sumitomo*, дві фази – зі стрічок типу *Hermetic™* компанії *AMSC*.

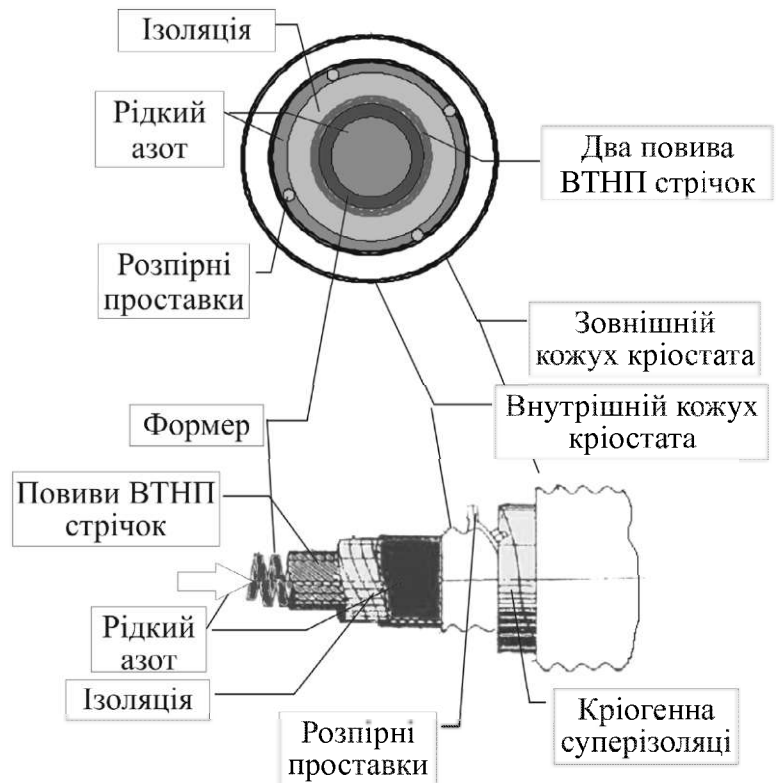


Рисунок 2.18 – Конструкція надпровідного силового кабелю ВНДКП

ВТНП кабель був виготовлений з використанням виробничих потужностей ВАТ „ВНДКП”. Спочатку був виготовлений формер, що являє собою нержавіючу спіраль із накладеними пучками мідних проводів і обмотаних мідною стрічкою [88, 89]. Поверх формера намотувалося два повиви із ВТНП стрічок (рис. 2.19), потім кабель був доставлений на завод Камкабель (м. Пермь), де було виконано його ізолювання (рис. 2.20) звичайним кабельним папером і накладення мідного екрана. Після ізолювання кабель був повернений у ВНДКП, де були напаяні наконечники для з’єднання із струмоувідними муфтами, після чого фази кабелю були установлені у кріостати та підготовлені до монтажу на полігоні.

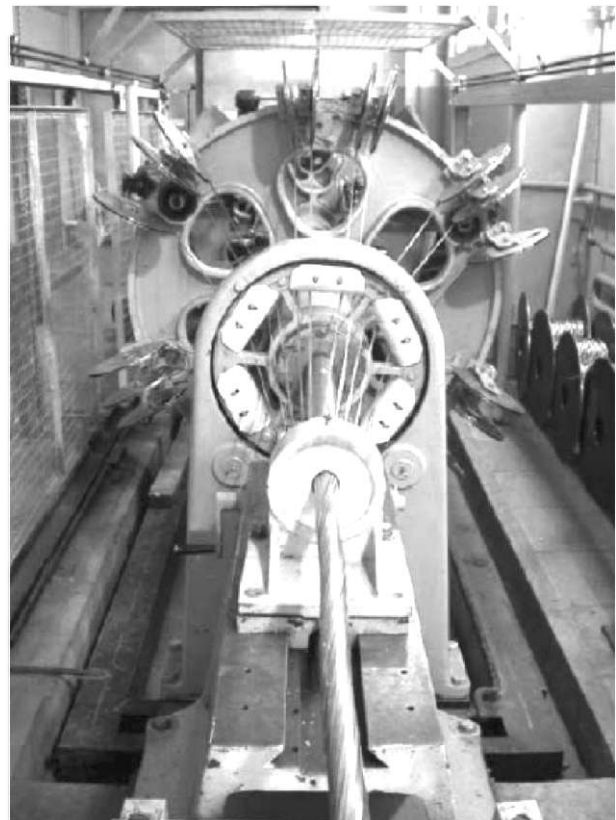


Рисунок 2.19 – Укладання повивів ВТНП стрічок

Для вивчення теплоприпливів у гнучких кріостатах з різною товщи-

ною екранно-вакуумної ізоляції були закуплені кріостати виробництва компанії *Nexans* з різними зовнішніми діаметрами – два кріостати з діаметром 110 мм та один кріостат з діаметром 92 мм і довжиною 30 м кожний. Внутрішній діаметр кожного з трьох кріостатів складає 60 мм. Розрахункові теплоприпливи у кріостатах складають близько 2 Вт на погонний метр.



Рисунок 2.20 – Ізолювання ВТНП кабелю

Для вивчення різних підходів до конструювання кінцевих струмоувідних муфт і визначення оптимальної конструкції були виготовлені два їхні варіанти: один – розроблення Російського наукового центру (РНЦ) „Курчатовський інститут” (рис. 2.21, а), інший – розроблення Науково-дослідного інституту електрофізичної апаратури (НДІЕФА) ім. Д.Ф. Єфремова (рис. 2.21, б). Обидва типи струмоувідних муфт, з’єднаних з електричною та кріогенною системами полігона, зображені на рис. 2.21, в.



а



б



в

Рисунок 2.21 – Струмоувідні муфти для ВТНП кабелю:

а – розроблення РНЦ „Курчатовський інститут”; б – розроблення НДІЕФА ім. Д.Ф. Єфремова; в – струмоувідні муфти, з’єднані з електричною та кріогенною системами полігона

Відповідно до технічного завдання робоча напруга струмоувідних муфт складає 20 кВ, вони мають витримувати перевантаження за струмом до 4 кА, їхня електрична ізоляція повинна витримувати короточасні перенапруги до 70 кВ протягом 1 хв.

Випробування кабелю проводилися на спеціально створеному полігоні для випробувань потужного надпровідного електроенергетичного устаткування на території ВАТ НТЦ-Е [90]. Полігон підключений до підстанції „Південна” Московської енергомережі і має можливість випробувати будь-яке устатку-

вання при напругах від 6 до 183 кВ і струмах до 3000 А. Технічні характеристики полігона дозволяють проводити як випробування ВТНП кабелів довжиною до 200 м, так і випробування надпровідних обмежувачів струму КЗ, ВТНП трансформаторів та інших ВТНП пристроїв. Важливо відзначити, що на полігоні встановлені реактори, які дозволяють випробовувати електротехнічні пристрої з повним навантаженням, що робить його унікальним у ряді аналогічних іспитових центрів. На рис. 2.22 подано компоновку схеми полігона для випробування ВТНП виробів.

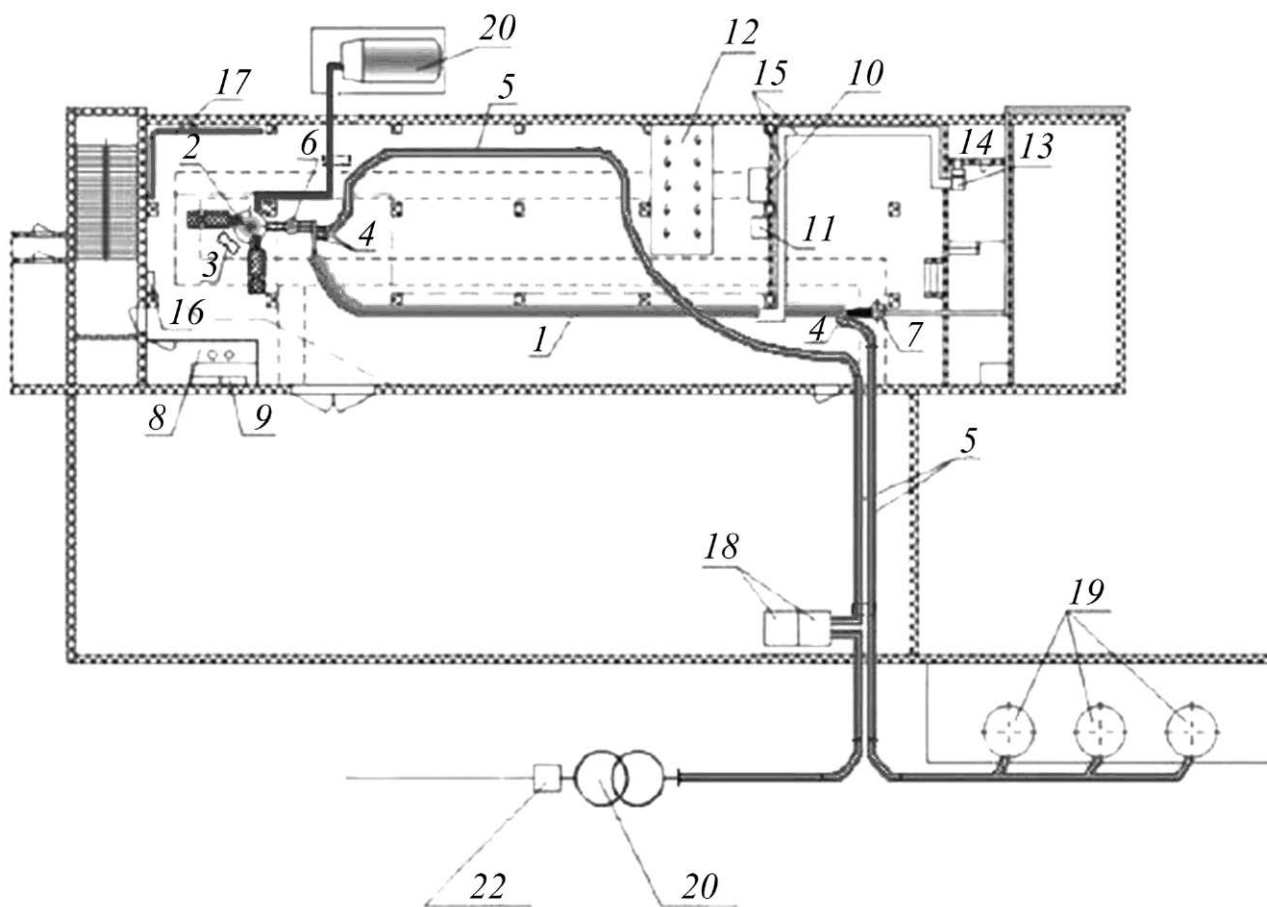


Рисунок 2.22 – Схема полігона ВАТ „НТЦ-Е” для випробувань ВТНП кабелів:
 1 – ВТНП кабель; 2 – криогенна установка; 3 – пульт керування криогенною установкою;
 4 – струмовводи; 5 – кабель (3 фази, 20 кВ, 2000 А); 6 – БРН I; 7 – БРН II; 8 – центр керування іспитового стенда; 9 – панель системи керування, регулювання, захисту та автоматики; 10 – джерело постійного струму; 11 – система власних потреб криогенної установки; 12 – блок реакторів; 13 – вентиляційна установка; 14 – вентиляційна шахта; 15 – вентиляційні короби; 16 – система власних потреб ВТНП кабелю; 17 – водоувід; 19 – навантажувальні реактори; 18 – комплектний розподільний пристрій з вимикачем; 20 – цистерна транспортна криогенна – 8 / 0,25; 21 – трансформатор; 22 – вимикач

Система криогенного забезпечення полігона (рис. 2.23) поставлена компанією Стірлінг (Нідерланди). Стандартний блок типу *LPC4* був адаптований під потреби полігона. Блок дозволяє використовувати два криокулера одночасно. Холодопродуктивність системи криогенного забезпечення – до 3,4 кВт на рівні

77 К (при роботі одного кріокулера) і може бути збільшена до 7 кВт, якщо встановити другий.



Рисунок 2.23 – Кріогенна система і БРН

Система кріогенного забезпечення забезпечує потік переохолодженого азоту до 100 л/хв при температурах до 66 К. Мінімальний тиск на вході системи складає 2 атм, максимальний тиск на виході системи – 6 атм.

Важливою частиною системи кріогенного забезпечення є спеціально розроблені блоки розподілу навантажень (БРН). Ці блоки встановлені на вході і виході фаз кабелю і дозволяють керувати потоками азоту, перерозподіляючи їх між фазами. Крім того, у БРН установлені датчики тиску, температури та витратоміри, що дозволяє одержувати повну інформацію про стан кріогенної системи. Всі параметри збираються і записуються комп'ютерною системою збору даних у реальному часі.

У 2008–2009 рр. ВТНП кабель зазнав цілого ряду випробувань: вакуумні перевірки, випробування щодо його заохолодження та відігрівання, досліді з визначення його критичного струму, випробування діелектричної міцності ізоляції, навантажувальні випробування, в ході яких досліджувалася тривала робота кабелю з номінальними струмом і напругою, вивчалася поведінка кабелю при коротких замиканнях, а також досліджувалася робота кабелю при короткочасних перевантаженнях зі струму та його робота при відключенні кріогенної системи.

Випробування кріогенної системи

У ході випробувань кріогенної системи були проведені кілька циклів заохолодження – відігрівання кабелю за допомогою системи кріогенного забезпечення. Система кріогенного забезпечення може працювати у трьох режимах. Спочатку здійснюється так зване „м'яке заохолодження” (*soft cooling*), коли система прокачує газоподібний азот через кабель, поступово знижуючи його температуру. Азот подається у фазу С і повертається через фази А і В. М'яке заохолодження здійснюється протягом 7–10 год, після чого включається „перезаохолодження” (*subcooling*). У цьому режимі починається уприскування рідкого азоту в кабельну лінію, що прискорює охолодження кабелю. Коли температура на вході кабелю досягає ~ 80 К, а на виході ~ 85 К, зникає кріогенний насос і система переходить у режим нормального охолодження.

У всіх режимах система кріогенного забезпечення працює повністю автоматично, але перемикання режимів здійснюється оператором. У процесі заохолодження кабелю загальний час до виходу кабелю у робочий режим (з температурою нижче 77 К) займає близько 30 год.

Також були проведені випробування працездатності кабелю при відключенні системи кріогенного забезпечення. Для цього при номінальному струмі в кабелі 1500 А і при початкових температурах на вході ~ 70 К, а на виході ~ 72 К був зупинений кріогенний насос і, відповідно, потік азоту. Протягом години температура в кабелі на виході досягла величини близько 90 К. Це означає, що ентальпії кабелю і рідкого азоту в ньому достатньо для збереження працездатності кабелю протягом 1 год.

У цілому випробування системи кріогенного забезпечення показали її повну працездатність і гнучкість, що дозволяє проводити випробування при різних умовах охолодження.

Електричні випробування

При випробуванні на електричну міцність, при температурах 70–77 К, послідовно на кожну фазу було подано постійну напругу 70 кВ протягом 15 хв. Струми витoku не перевищували 150 мкА. Перевірка опору ізоляції при напрузі 2,5 кВ показала величину більше 10 ГОм.

При перевірці електричної міцності змінною напругою 50 Гц усі фази кабелю і струмоувідні муфти витримали напругу з діючим значенням 50 кВ.

Критичний струм фаз визначався на постійному струмі. За вольтамперною характеристикою жили кабелю за звичайним критерієм 100 мкВ/м визначався критичний струм 30-метрової жили кабелю. Критичні струми всіх фаз перевищують 4200 А при температурі 77 К, тобто практично збігаються із

сумою критичних струмів окремих стрічок.

Були проведені випробування кабелю на змінному струмі при повному навантаженні. Визначено, що кабель здатний тривалий час працювати при 30 %-му перевантаженні (2000 А) і біля години проробив при 67 %-му перевантаженні (2500 А). При випробуванні під повним навантаженням кабель проробив більше 72 год при номінальному струмі 1500 А і 20 кВ (діючого значення), що відповідає переданій по трифазному кабелю потужності 50 МВА.

При випробуваннях на струмове перевантаження або імітацію короткого замикання на кабель подавався імпульс струму від потужної ІС-батареї. Максимальна амплітуда струму склала 28 кА, що більш ніж у 13 разів перевищує амплітуду номінального струму. Підвищення температур у внутрішньому і зовнішньому каналах кабелю склали 0,15–0,35 К.

Отже, перший російський ВТНП кабель довжиною 30 м успішно пройшов випробування. На цей час уже виготовлений трифазний силовий ВТНП кабель довжиною 200 м з робочими параметрами, аналогічними 30-метровому: 1500 А, 20 кВ, 50 МВА. Цей кабель має надпровідний екран. Випробування кабелю довжиною 200 м почалися у жовтні 2009 р. Надалі цей кабель передбачається встановити для дослідної експлуатації на одній з підстанцій Московської енергомережі.

Таким чином, є всі підстави вважати, що Росія ґрунтовно готується до практичного впровадження ВТНП кабельних ліній в електромережі.

2.3.3. Трифазні ВТНП кабельні проекти конструкції „три в одному”

ВТНП кабель ALBANY

До числа наймасштабніших діючих проектів ВТНП силових кабелів належить надпровідний силовий кабель у м. Олбані, столиці штату Нью-Йорк [70-75]. Кабель конструкції *3-in-One*[™] („три в одному”) діаметром 150 мм і довжиною 350 м виготовлений японською компанією *Sumitomo Electric Industries* зі стрічки 1-го покоління довжиною 70 км, виробленою за новою технологією *DI-BSCCO*. Торговельна марка кабелю *3-in-One*[™] означає розміщення трьох жил в одному кріостаті (*three-cores-in-one-cryostat type*). Внутрішній мідний стрижень (формер) з екрануючим намотуванням у випадку аварійної ситуації витримує струми до 9 кА.

Кабель, установлений 8 липня 2006 р. на території енергетичної компанії *National Grid* штату Нью-Йорк, з'єднує дві підстанції – *Riverside* і *Nenanes*. Це перший надпровідний кабель у реальній мережі, перший підземний кабель і перший надпровідний кабель, що має з'єднувальну муфту. Весь кабель, у тому

числі його кріостат і струмовводи, виготовлені компанією *Sumitomo*, кріогенна система поставлена компанією *BOC Group (British Oxygen Company Ltd)*. Керується кріогенна система повністю автоматично, контролюється дистанційно з офісу компанії *BOC* у м. *Bethlehem* (штат Пенсільванія), приблизно за 1000 км від місця роботи системи.

Установлення і тестування ВТНП кабелю довжиною 350 м у діючій електромережі Олбані виконали наступні компанії:

- *SuperPower* – головний підрядник і постачальник ВТНП стрічок 2-го покоління на основі $YBaCuO$;
- *Sumitomo Electric Industries* – поставка стрічок 1-го покоління на основі BSCCO, виробництво, монтаж і тестування ВТНП кабелів;
- *BOC Group* – поставка, установлення та моніторинг кріогенних систем у процесі експлуатації кабелю;
- *National Grid* – установлення системи релейного захисту.

Фінансування п'ятирічного проекту (з листопада 2002 р. по листопад 2007 р.) загальним об'ємом 27 млн дол. здійснювали: Міністерство енергетики США (13,5 млн), *New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA)* (6 млн) і компанії-учасники проекту (*SuperPower, Inc* – підрядник, *National Grid* – споживач).

У центрі уваги енергетичної політики США – заміна до 2030 р. усіх електроенергетичних кабелів країни на надпровідні.

Встановлена кабельна система розрахована на напругу 34,5 кВ і струм до 800 А. Потужність кабелю складає 48 МВА.

Кабель загальною довжиною 350 м був складений із двох секцій довжиною 320 м та 30 м. На першому етапі були встановлені дві секції ВТНП кабелю (обидві зі стрічок *DI-BSCCO* системи виробництва компанії *Sumitomo*), поворотна труба для прокачування азоту на довжину 350 м і кріогенна система реконденсації азоту. Дві секції кабелю були з'єднані одна з одною і протягнені усередині підземної труби. З'єднання двох незалежних секцій кабелю демонструє принципову можливість створення протяжних ВТНП ЛЕП, складених з різних відрізків кабелю. Пробний пуск системи відбувся 20 липня 2006 р. і пройшов без будь-яких збоїв.

На другому етапі, влітку 2007 р., секція довжиною 30 м була замінена кабелем на основі стрічок 2-го покоління на Y -основі, виготовлених компанією *SuperPower*.

Обрана структура ВТНП кабелю „три в одному” (рис. 2.24) забезпечує

компактність системи.

Компоненти кабелю, виготовленого у 2005 р. зі стрічок *DI-BSCCO*:

- ▶ центральний несучий формер з пучка мідних проводів (шунтує струм у випадку короткого замикання);
- ▶ струмонесучий елемент (спірально намотаний з *DI-BSCCO* стрічок у 2 шари);
- ▶ надпровідний екран (намотаний з *DI-BSCCO* стрічок в 1 шар);
- ▶ стрічки *DI-BSCCO* компанії *Sumitomo* (виготовлені за оригінальною технологією, що включає відпалювання при надлишковому тиску);
- ▶ електроізоляція – поліпропіленова плівка *PPLP*, імпрегнована рідким азотом;
- ▶ зовнішній мідний екран.

У кабелі довжиною 30 м, який був виготовлений у 2007 р. компанією *Sumitomo* для другої фази проекту *Albany* (рис. 2.24), струмонесучий елемент і надпровідний екран намотані зі стрічок *YBCO* виробництва *SuperPower*, відповідно у 3 та 2 шари.

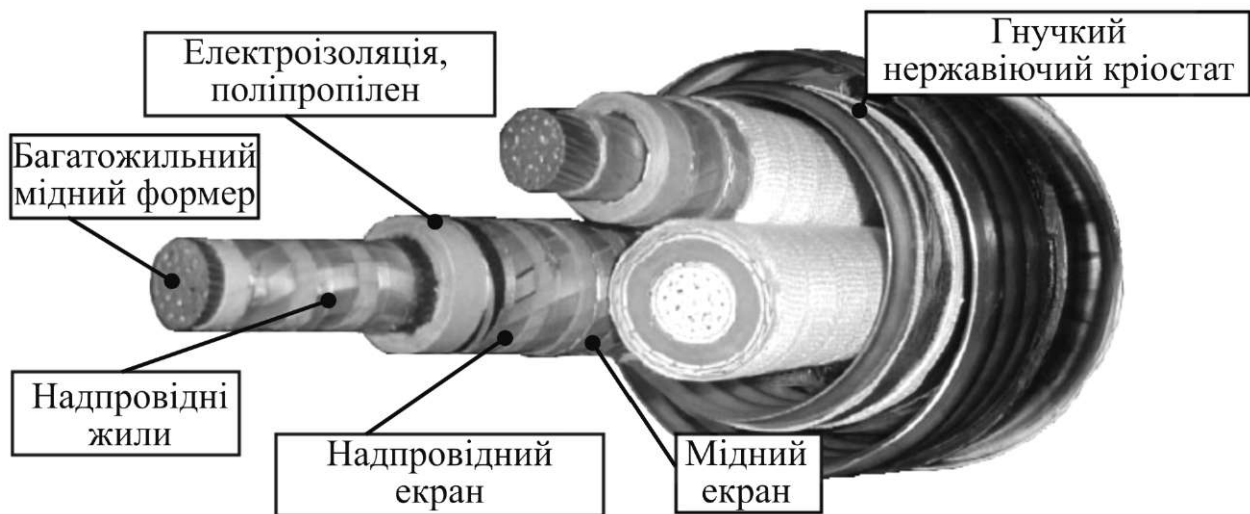


Рисунок 2.24 – ВТНП кабель довжиною 30 м виробництва *Sumitomo* (зі стрічки 2-го покоління виробництва *SuperPower*) для мережі м. Олбані

Три фазні кабелі встановлені в оболонку з деяким простором для компенсації термічного стиску. При тестуванні пробного кабелю деградацію критичного струму у ВТНП стрічках не спостерігали. Більше того, пробна прокладка кабелю та досліди короткого замикання в мережі показали, що запропонована конфігурація кабельної системи досить перспективна для заміни звичайних кабелів без прокладання нових тунелів (зовнішній діаметр був обраний стандартним для звичайних кабелів).

Основа кріостата – гофрована труба з подвійними стінками з нержавіючої сталі, що одночасно є зовнішнім захисним кожухом, може розтягуватися у процесі прокладання кабелю. Кріостат розтягується, має змінну та досить велику довжину, що є досить зручним та практично корисним при прокладанні кабелів довжиною 350 м і більше. Головні вимоги до кріостата:

- можливість оперативної заміни;
- гарантія збереження вакууму протягом, як мінімум, 10 років;
- забезпечення мінімального теплоприпливу.

До складу системи кріогенного охолодження (рис. 2.25) входять:

- * азотний резервуар;
- * термосифон, що допускає охолодження азоту як кріокулером (основний варіант), так і рідким азотом з відкачуванням (резервний варіант);
- * насоси, що прокачують переохолоджений рідкий азот по замкненій петлі ВТНП кабелю.

Система кріогенного охолодження також здатна подавати азот у вигляді холодного газу будь-якої температури та прокачувати його по кабелю з різними швидкостями для початкового заохолодження системи.

Після поставки кабелю від компанії *Sumitomo* з Японії він пройшов всебічний контроль, який показав, що у процесі перевезення, установки та первісного заохолодження він не був ушкоджений: критичний струм, обмірюваний за критерієм 1 мкВ/см, для кожної ділянки кабелю склав 2,3 кА при 73 К (усереднена температура по всій довжині кабелю при швидкості прокачування азоту близько 40 л/хв). Після високовольтних випробувань також не виявлено ніяких ушкоджень кабелю (табл. 2.7) [75]. Випробування проводили за стандартами Асоціації освітлювальних компаній Едісона *AEIC* (*Association of Edison Illuminating Companies*) для підземних кабелів напругою 34,5 кВ при поступовому збільшенні напруги, що прикладається до кожної ділянки кабелю, до 100 кВ із кроком 10 кВ.



Рисунок 2.25 – Кріогенна система виробництва компанії *BOC Group* для кріозабезпечення проекту *ALBANY* [75]

Таблиця 2.7 – Результати стендових випробувань кабелів зі стрічок *DI-BSCCO* та *YBCO* для проекту *Albany*

Параметр	Значення	
	Кабель <i>DI-BSCCO</i> (виготовлений у 2005 р.)	Кабель <i>YBCO</i> (виготовлений у 2007 р.)
Критичний струм струмонесучого елемента (при 77 К), кА	1,8 (у кожній фазі)	2,7 / 2,8 / 2,7
Критичний струм надпровідного екрана (при 77 К), кА	1,8 (у кожній фазі)	2,4 / 2,4 / 2,5
Втрати на змінному струмі, Вт/м на фазу (при 0,8 кА, 60 Гц)	0,70	0,34
Механічні властивості	Не деградує при діаметрі скрутки 2,4 м, при демонтажі дефектів не виявлено	
Електричні випробування		
Змінна напруга 69 кВ протягом 10 хв	ушкоджень кабелю не виявлено	
Імпульс ±200 кВ	ушкоджень кабелю не виявлено	
Постійна напруга 100 кВ протягом 5 хв	ушкоджень кабелю не виявлено	

20 липня 2006 р. кабельна ВТНП система була введена в експлуатацію в мережі *National Grid*. Спочатку кабель був підключений до підстанції *Riverside* і випробовувався під напругою протягом декількох годин, після чого обидва кінці кабелю були підключені до мережі, і через ВТНП кабель почав передаватися струм. З моменту підключення кабельна система функціонує без перебоїв і всі параметри – температуру, тиск і швидкість прокачування рідкого азоту – контролює віддалений експлуатаційний центр компанії *BOC* у Пенсільванії.

Вхід кабелю під землю і його підключення до мережі показані на рис. 2.26. Кабель проходить у вже наявному кабельному колекторі, під жвавою швидкісною магістраллю. Він має один поворот на 90° із радіусом вигину 12 м і одну з'єднувальну муфту через 30 м від свого початку. Ця муфта демонструє можливості з'єднання ВТНП кабелів безпосередньо в кабельних колекторах.

За перші десять місяців роботи ВТНП кабель напрацював більше 7000 год. У процесі роботи кабелю у мережі відбулося одне коротке замикання тривалістю 0,2 с, при якому струм у кабелі досяг 7,5 кА, що майже в 10 разів перевищує номінальний струм кабелю, але ніяких не-



Рисунок 2.26 – Вхід ВТНП кабелю в колектор (м. Олбані)

приємних наслідків не відбулося, і після перевірки кабель знову був включений у роботу в мережі. Отже, кабель має достатньо високу надійність, не вимагає спеціального обслуговування і порівняно невибагливий. Результати першого півріччя роботи надпровідного силового кабелю в реальній міській електричній мережі можна визнати в достатній мірі успішними і багатообіцяючими.

У травні 2007 р. робота ВТНП кабельної мережі була припинена для планової заміни 30-метрової ділянки кабелю на такий же відрізок кабелю „три в одному” виробництва *Sumitomo*, виготовлений із ВТНП стрічки 2-го покоління довжиною 9,7 км виробництва *SuperPower* [75] (рис. 2.24). Природне відігрівання кабелю зайняло три тижні. Після завершення стендових випробувань (див. табл. 2.7) були проведені експлуатаційні випробування кабелю в енергосистемі протягом приблизно 6 місяців, починаючи з листопаду 2007 р. (табл. 2.8). Запуск у повторну експлуатацію відбувся у січні 2008 р. Це перший у світовій практиці досвід використання ВТНП кабелю 2-го покоління у промисловій мережі.

Таблиця 2.8 – Результати випробувань кабельної системи на другому етапі проекту *Albany*

Вид випробувань	Умови випробувань та результати
Стійкість до тиску, МПа	0,61 (задовільно)
Критичний струм на постійному струмі, вимірний за критерієм 1 мкВ/см, кА	2,3 (при 73 К) 2,8 (при 69 К)
Тепловиділення за відсутності навантаження, кВт	1,0 (кабель довжиною 350 м) 3,4 (кабельна система загалом)
Постійна напруга 100 кВ, прикладена до кожної фази протягом 5 хв	Ушкоджень не виявлено
Випробування при первісному охолодженні	
Максимальна напруженість жили, кг	≈1000
Рівень вакууму у кожній частині	Не погіршується

*Японські кабельні проекти Токійської електроенергетичної компанії
TEPCO*

Варто відзначити, що компанія *Sumitomo* є одним з лідерів використання ВТНП матеріалів у кабельній техніці, і перше демонстраційне випробування кабелю торговельної марки *3-in-One™*, яке виготовляється із ВТНП стрічок *DI-BSCCO™* власного виробництва, провела ще у 2002 р. у рамках угоди з Токійською електроенергетичною компанією *TEPCO (Tokyo Electric Power Company)* і Центральним дослідницьким інститутом електроенергетики *CRIEPI* на спеціальному дослідному полігоні *CRIEPI* (рис. 2.27) [91]. Довжина кабелю складає 100 м у наземному трубопроводі із циркулюючим рідким азотом. Результати випробувань наведені у табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Специфікація випробуваного кабелю довжиною 100 м компанії *Sumitomo Electric*

Параметр	Значення
Діюче значення напруги, кВ	66
Діюче значення струму, кА	1
Номінальна потужність, МВА	114
Розташування	наземний, установлений у трубопроводі діаметром 150 мм
Охолодження	циркуляція переохолодженого рідкого азоту
Характеристики кабелю	
Форма	3 жили в одному кріостаті
Електрична ізоляція	поліпропіленова плівка, імпрегнована рідким азотом (<i>PPLP</i>)
Виведення	6 (кінцевий бокс – на повітрі)
Результати випробувань	
Напруга (змінна), кВ	130
Ємність, мкФ/км	0,24
tg j (при 77 К)	0,08 %
Критичний струм I_k (постійний струм), кА	2,7 (при 77,3 К) 4,0 (при 69,4 К)
Механічні властивості	не деградує при діаметрі скрутки 1,9 м
Втрати на змінному струмі (при змінному струмі 1 кА), Вт/м	2 (для 3 фаз) / 0,65 (на 1 фазу)

Нещодавно у Японії за підтримки *METI* та *NEDO* стартував новий кабельний проект тривалістю 5 років [92]. Токійська електроенергетична компанія *TEPCO* має впровадити у діючу енергомережу підстанції *Asahi* у м. *Yokohama* ВТНП кабель довжиною 200–300 м на напругу 66 кВ потужністю 200 МВА.

Розроблення і виробництво кабелю торговельної марки *3-in-One™*, струмоводів та їх з'єднання із кабелем має здійснити компанія *Sumitomo*, систему криогенного забезпечення виготовить компанія *Mayekawa Mfg. Co., Ltd.*

У 2007 р. були спроектовані компоненти кабелю, протягом 2008 та початку 2009 рр. прототип кабельної системи із ВТНП кабелем довжиною 30 м був установлений на заводі. У 2009 р. має бути виготовлений довгомірний кабель і установлений на підстанції *Asahi* у 2010 р., а протягом 2010–2011 рр. проходять довготривалі випробування.



Рисунок 2.27 – Демонстраційна лінія ВТНП кабелю в Токіо

Однією з цілей проекту є зниження втрат на змінному струмі. Для цього використовується новий тип проводу *DI-BSCCO* з твістованими НП жилами і меншими товщиною та шириною. Виготовлений з такого проводу кабель довжиною 1 м має втрати на змінному струмі 0,8 Вт/м на фазу при діючому значенні струму 2 кА (при частоті 50 Гц), що в 4 рази менше втрат у звичайному проводі *DI-BSCCO™*. Другою ціллю є створення кабелю, стійкого до КЗ, який обмежуватиме струм на рівні 31,5 кА (діючого значення) протягом 2 с. Третьою ціллю є виготовлення кабелю, який можливо встановити у каналі із внутрішнім діаметром 150 мм.

ВТНП кабельні проекти Південної Кореї

У 2002 р. *Korea Electric Power Corporation (KEPCO)* ініціювала ВТНП кабельний проект за підтримкою уряду Південної Кореї. У 2005 р. компанія *Sumitomo Electric* за контрактом у 25 млн дол. спеціально розробила і поставила 100 м ВТНП силового кабелю для Корейського дослідницького інституту електроенергетики *KEPRI (Korean Electric Power Research Institute)*. Трифазний кабель торгівельної марки *3-in-One™* на напругу 22,9 кВ і струм 1250 А (потужністю 50 МВА) був установлений на випробувальному полігоні *KEPRI* у місті *Gochang* провінції *Chonnbuk* (рис. 2.28) [93–95].



Рисунок 2.28 – Північний термінал кабельної системи на полігоні *KEPRI*

Кабельна система складається з кабелю довжиною 100 м, двох струмоводів та системи охолодження, яка працює за розімкненим циклом (рис. 2.29). Її перевагами є низькі експлуатаційні витрати та висока надійність, а до недоліків відноситься велика витрата рідкого азоту.

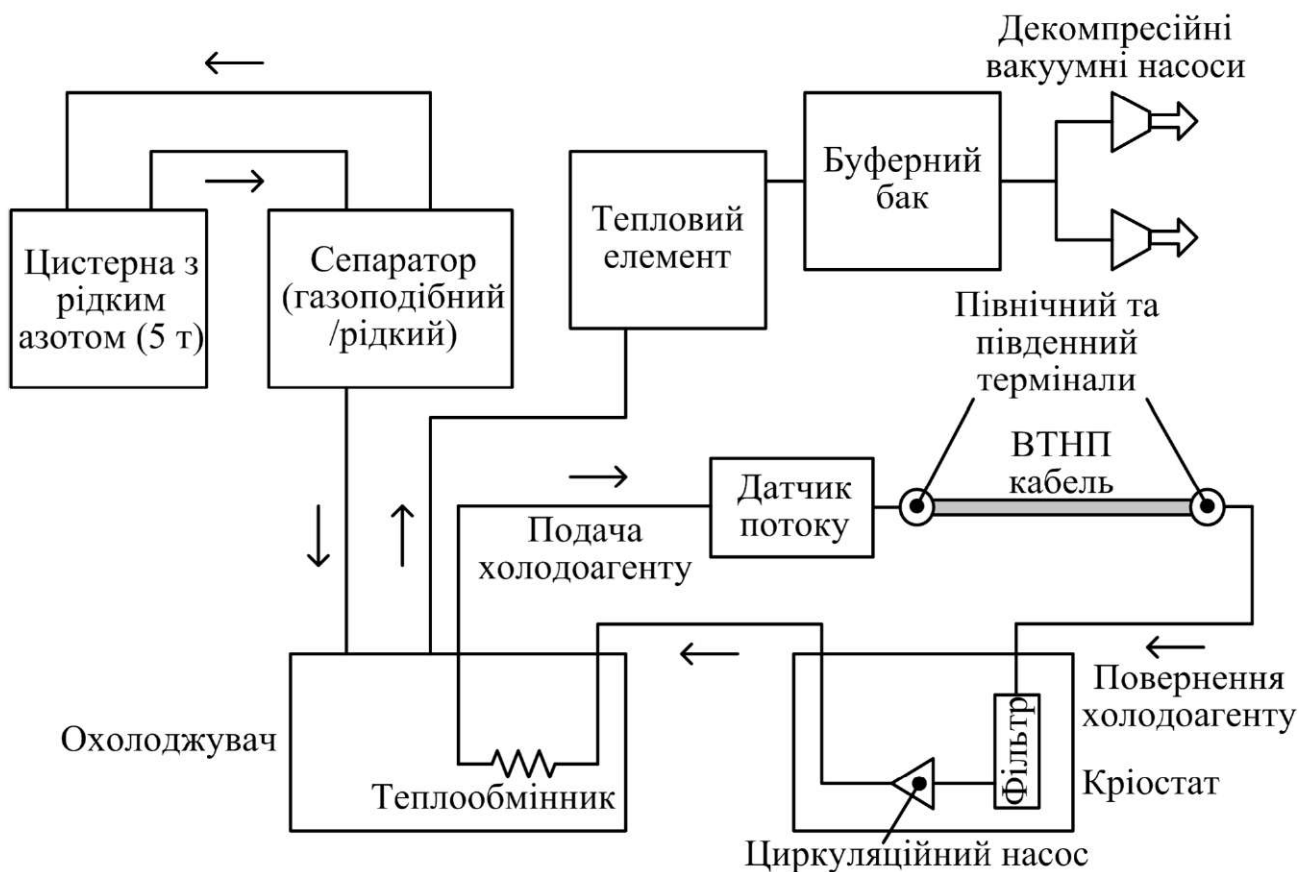


Рисунок 2.29 – Схема системи охолодження кабельної системи на полігоні KEPRI

Кабель виконаний за схемою з „холодним” діелектриком, кабель і струмоуводи виготовлені за конструктивною схемою *3-in-One*TM (рис. 2.24), формер є мідним, струмонесучий елемент та екран намотані з Ві-2223 стрічок у 2 шари та 1 шар відповідно, електроізоляція товщиною 4,5 мм – з PPLP. Діаметр кожної жили складає 35 мм. Кріостат виконаний у вигляді двох гофрованих труб з багат шаровою ізоляцією та вакуумом усередині. Зовнішній діаметр кабелю дорівнює 130 мм.

Під час монтажу кабель був вигнутий на 27° з радіусом вигину 5 м. Після монтажу через деякі проблеми 9 м кабелю довелось відрізати, отже фактична його довжина складає 91 м.

Потужність рефрижератора складає 3 кВт, діапазон робочих температур – від 66 до 77 К, максимальний робочий тиск холодоагенту – 0,5 МПа, максимальна витрата холодоагенту – 50 л/хв.

Рідкий азот, який циркулює крізь ВТНП кабель та струмоуводи, надходить у резервуар, де стискується за допомогою циркуляційного насосу до тиску 5 атм. (0,5 МПа) і прокачується крізь охолоджувач. В охолоджувачі рідкий азот за допомогою декомпресійного насоса підтримується у стані насиченої пари нижче 77 К. Теплообмін здійснюється між переохолодженим рідким азотом і тим, що циркулює у системі.

Декомпресійна система складається з двох декомпресійних вакуумних насосів, які випускають азот в атмосферу, буферного баку та теплового елемента, призначеного для підтримання температури рідкого азоту на рівні 64–77 К відповідно до робочої температури.

Цистерна з рідким азотом масою 5 т розташована ззовні приміщення з криогенним обладнанням. З певною періодичністю об'єм рідкого азоту необхідно поповнювати, бо він поступово википає через теплоприпливи в охолоджувачі.

Кабельна система містить 9 датчиків температури, 6 перетворювачів тиску (*transducers*) та 3 датчика рівня рідини.

З 2006 р. протягом трьох років кабельна система зазнала 7 циклів заохолодження – відігрівання та значну кількість різного роду електричних випробувань.

При електричних випробуваннях кабелю були визначені:

- * критичний струм кожної фази (2314 А, 2326 А та 2345 А при температурі 72 К і витраті холодоагенту 15 л/хв);

- * втрати на змінному струмі із частотою 60 Гц (0,73 Вт/м – на фазу при струмі 0,8 кА, 0,93 Вт/м – на фазу при струмі 1 кА та 2,27 Вт/м – на фазу при струмі 1,25 кА).

Критичний струм вимірювали 8 разів під час кожного циклу заохолодження – відігрівання з метою визначити деградацію у результаті електричних випробувань та термічного стресу. Незначна деградація критичного струму (до 5 %) спостерігалась від першого до шостого циклу, під час сьомого критичний струм виріс, а у восьмому – знов знизився.

На цей час *KEPCO* та *KEPRI* планують розпочати новий ВТНП кабельний проект – виготовлення кабелю довжиною 500 м на напругу 22,9 кВ і струм 1250 А (потужністю 50 МВА), який буде придатний для розташування у реальній розподільній енергомережі.

2.3.4. Трифазні ВТНП кабельні проекти триаксіального типу

В рамках програми *SPI* („Партнерська ініціатива в галузі надпровідності”) в 1998 р. Міністерство енергетики США відкрило фінансування проекту „*Southwire Cable Project*” – створення на заводах компанії *Southwire Company* (у м. *Carrollton*, штат *Georgia*) локальної підземної електричної мережі, що включає надпровідний кабель [96, 97]. Головним виконавцем цього проекту була компанія *SuperPower, Inc* (табл. 2.10).

Відповідно до цього проекту у 1999 р. був виготовлений трифазний ВТНП кабель довжиною 30 м на напругу 12,5 кВ і струми до 1,25 кА

(рис. 2.30), а в лютому 2000 р. його було вбудовано у локальну підземну електроенергетичну систему, що обслуговує три заводи компанії *Southwire*. Це була перша ВТНП кабельна електроенергетична система у Північній Америці, і працювала вона (до речі, у режимі повного автоматичного контролю) протягом семи років.

Таблиця 2.10 – Партнери за проектом „*Southwire Cable Project*”

Компанія / дослідницький центр	Пайова участь
<i>SuperPower, Inc.</i>	Виготовлення ВТНП стрічок з вісмутової кераміки <i>Bi-2223</i>
<i>Southwire Company</i>	Розроблення конструкції та виготовлення кабелю
<i>Southern Company Services, Georgia Transmission Corporation, Southern California Edison</i>	Підключення ВТНП кабелю у мережу
<i>Plastronics-EURUS, Oak-Ridge National Laboratory</i>	Наукова підтримка проекту

Успіх надихнув, і у 2004 р. компанія *SuperPower, Inc.* приступила до виконання нового замовлення на виготовлення ВТНП кабелю довжиною 200 м на напругу 13,8 кВ і струм до 2,5 кА для підземної лінії електропередач у місті *Columbus*, штат Огайо (проект *ULTERA*).

ВТНП кабель ULTERA

18 вересня 2006 р. компанією *Ultera* – спільним підприємством американської компанії *Southwire Company* і відомої датської компанії *NKT Cables GmbH (Nordiske Kabel og Traadfabriker)* – був успішно введений в експлуатацію на підстанції компанії *American Electric Power (AEP)* у Біксбі, штат Огайо, трифазний ВТНП кабель *Triax* (триаксiального типу) потужністю 69 МВА, довжиною 200 м, напругою 13,8 кВ і робочим струмом до 3 кА (рис. 2.31) [66, 76–78]. Мережа забезпечує електроенергією 8600 будинків і підприємств у пригороді Колумбуса. Проект тривалістю 2 роки і вартістю 9 млн дол. реалізований компанією *Southwire* у партнерстві з *AEP, Praxair, AMSC* та *ORNL*. 75 % вартості витрачено на створення інфраструктури, зокрема, будівництво підземного тунелю. Кабель успішно працює з серпня 2006 р.; його було випробувано на перевантаження в 16,4 кА. Надійність роботи кабелю становить 99,95 %.



Рисунок 2.30 – Кабель *SuperPower, Inc.*, виготовлений із ВТНП стрічок 1-го покоління, для підземної локальної лінії електропередач на заводах *Southwire Company*

Конструкція триаксіального ВТНП кабелю *Ultera* дозволяє пропускати у 3 рази більший струм порівняно з іншими ВТНП кабелями, що установлені в демонстраційні мережі і перебувають на стадії розроблення. ВТНП стрічки 2-го покоління поставила компанія *AMSC*. Особливість конструкції триаксіального кабелю *Triax* полягає у тому, що всі 3 фази розташовані концентрично навколо загального центрального стрижня і оточені мідним екраном (рис. 2.32) [77, 79]. У більш ранніх конструкціях був потрібний окремий кабель для кожної фази. Така компактна конструкція дозволяє удвічі скоротити витрату ВТНП проводу та зменшити охолоджувану поверхню, знизивши таким чином вимоги до системи охолодження. Все це разом сприяє зниженню як вартості НП кабелю, так і експлуатаційних витрат.

У 2007 р. компанією *Ultera* був виконаний цілий ряд робіт, спрямованих на подальший розвиток ВТНП кабельної технології. Досліджувався вплив погіршення вакууму у криостаті кабелю на його працездатність. Пройшли випробування нові зразки криогенного діелектрика *Cryoflex*, розроблені *Ultera*. Досліджувалися як різні зразки діелектрика, так і короткі відрізки ВТНП кабелю, виготовлені з використанням *Cryoflex*. Продовжилися роботи над системами криогенного забезпечення, криогеніка ВТНП кабелю в Біксбі була доповнена двома криокулерами виробництва *Q-drive* на основі пульсаційних труб з холодопродуктивністю в 1000 Вт при 77 К кожний. Монтаж і системну інтеграцію криокулерів здійснювала компанія *Praxair*. Була розроблена і випробувана в *ORNL* з'єднувальна кабельна муфта. Її установлення в короткий відрізок ВТНП кабелю не привела до зниження його критичного струму.



Рисунок 2.31 – Початкова частина триаксіального ВТНП кабелю довжиною 200 м, установленного на підстанції Біксбі, штат Огайо (США)

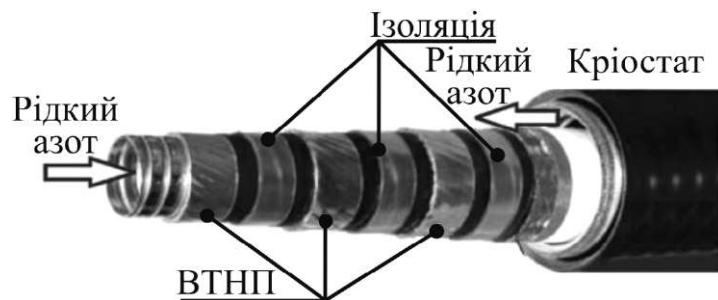


Рисунок 2.32 – Трифазний кабель *Triax* за проектом *Ultera*

Що ж до виробника триаксіального кабелю *Triax* датської компанії *NKT Cables GmbH*, яка має вже одинадцятирічний досвід експлуатації ВТНП кабелів, свої подальші плани вона зв'язує саме з такою конструкцією кабелів. Трифазний кабель *Triax* розрахований на середню напругу від 10 до 72 кВ і потужність до 400 МВА. Із використанням цього кабелю компанія планує реалізувати три проекти:

1) У Нью-Орлеані [66] кабель з ВТНП 2-го покоління замінює існуючу ЛЕП напругою 230 кВ, введення в експлуатацію планується у 2011 р. (проект *Southwire-Entergy*). Основні параметри трифазного кабелю із двома з'єднуючими муфтами наступні: довжина 1760 м, робоча напруга 13,8 кВ, потужність 60 МВА.

2) У Нью-Йорку (у Манхеттені) довжиною 300 м, з використанням проводу 2-го покоління з ефектом струмообмеження (проект *Hydra*).

3) В Амстердамі (довжиною 6 км, 50 кВ, 250 МВА), замінює існуючий підземний кабель у 2012 р.

Останні два проекти розглянемо більш детально.

Кабельний проект в Амстердамі

Компанія *NKT* планує прокласти трифазний ВТНП кабель довжиною 6 км у діловій частині Амстердаму (50 кВ, 2900 А, 250 МВА) [98, 99]. Зараз на передбачуваному місці прокладання ВТНП кабелю розташовуються три газонаповнених високовольтних кабелі з робочою напругою у 150 кВ, що з'єднують між собою дві розподільні підстанції (рис. 2.33, а; СШ – система шин).

У ході модернізації кабельної мережі планується демонтувати усі три кабелі *GPC* потужністю 100 МВА і в існуючих кабельних каналах установити два традиційних підземних кабелі *XLPE* потужністю 200 МВА і ВТНП кабель потужністю 250 МВА (рис. 2.33, б).

Перевага була віддана триаксіальній конструкції ВТНП кабелю. Завдяки концентричному розташуванню трьох фаз у загальному кріостаті ВТНП кабель надзвичайно компактний. Охолодження ВТНП кабелю буде вестись як по зовнішньому, так і по внутрішньому каналах. Через дефіцит вільного простору охолодження кабелю здійснюватиметься тільки двома кріогенними установками, розміщеними на обох його кінцях (рис. 2.34). Через значне тепловиділення у струмоуводах ВТНП кабелю передбачено їх незалежне від кабелю охолодження. На габарити системи кріогенного забезпечення ВТНП кабелю накладаються досить жорсткі обмеження, пов'язані з відсутністю вільного простору на підстанціях.

Реалізація цього проекту є достатньо складним технічним завданням, однак, якщо даний проект виявиться успішним, він стане істотним проривом у розвитку ВТНП електроенергетики, особливо актуальним в умовах постійно зростаючого енергоспоживання у мегаполісах.

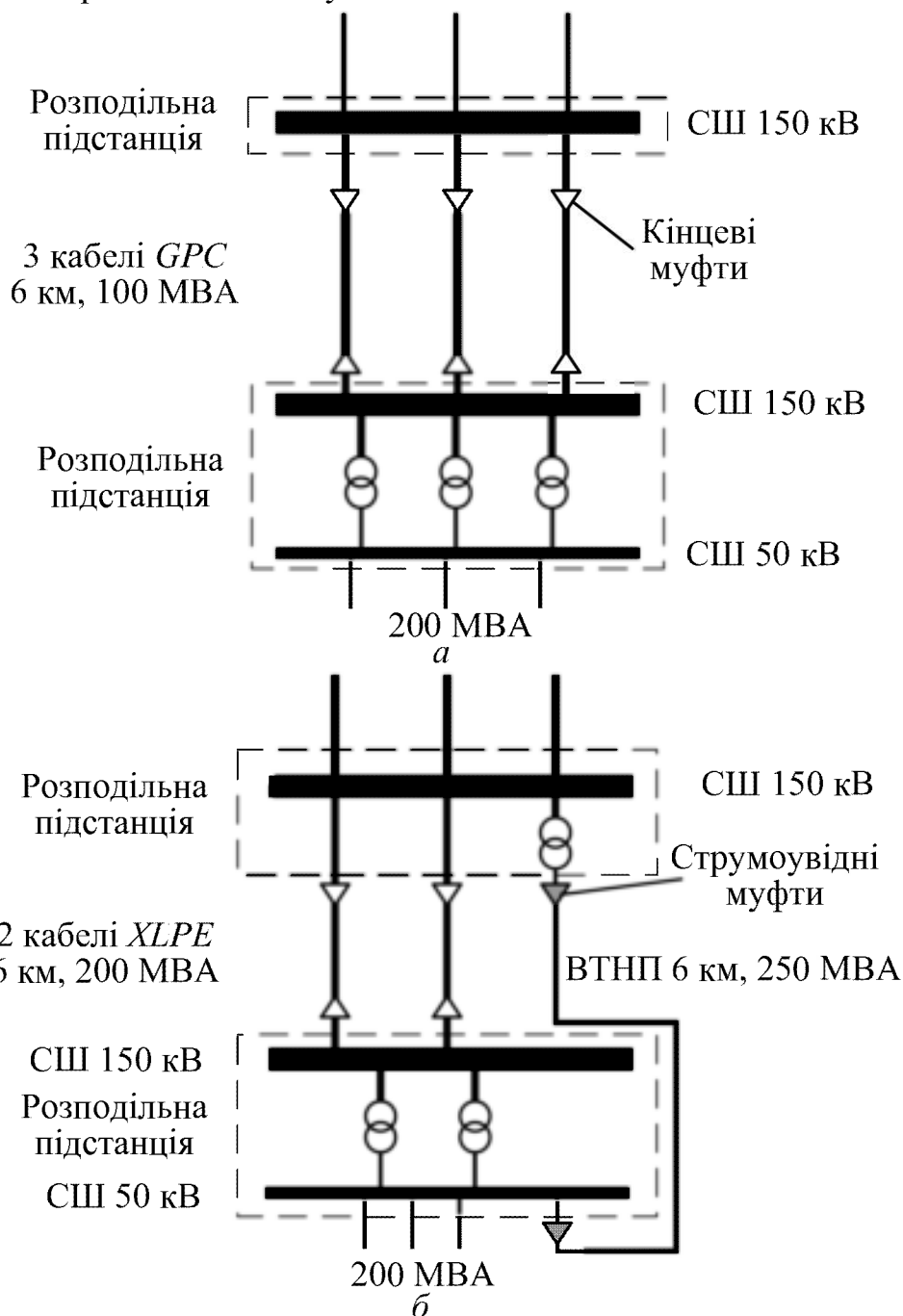


Рисунок 2.33 – Схема включення трифазного ВТНП кабелю в мережу:
a – існуюча схема; *б* – проект після модернізації

Проект Hydra

У травні 2007 р. корпорація AMSC оголосила про підписання контракту з енергокомпанією Consolidated Edison на розроблення та впровадження нової ВТНП технології безпеки енергосистеми в мережу комерційного центру міста Нью-Йорк [100–102]. Мета проекту – захистити центр від будь-яких перерв

енергопостачання, причиною яких можуть бути аварії через погоду або ушкодження мережі. Назву „Проект Гідра” („*Project Hydra*”) програма одержала з асоціації з багатоголовим міфічним чудовиськом. Подібно тому, як у нього відросли голови після їхнього відсікання, електропостачання повинне мати безліч запасних каналів на випадки аварій (рис. 2.35). „Проект Гідра” має потужний фундамент двадцятирічних розробок ВТНП технологій у США, фінансованих Міністерством енергетики та приватними компаніями.

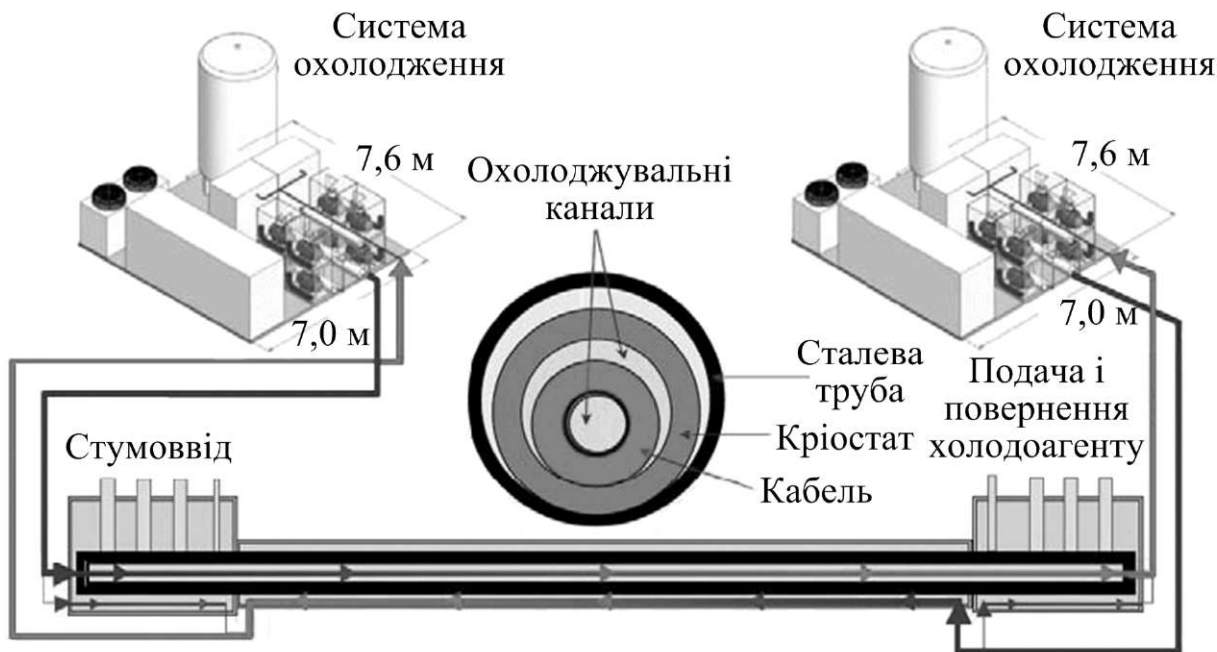


Рисунок 2.34 – Кріогенна схема ВТНП кабелю в Амстердамі

Повна вартість проекту оцінюється у 39,3 млн дол. Міністерство національної безпеки США *DHS (Department of Homeland Security)* планує інвестувати в даний проект 25 млн дол., сподіваючись, що надалі це дозволить використати технологію безпечних енергосистем „*Secure Super Grid™*” на основі ВТНП проводів, кабелів і струмообмежувачів у мережах США.

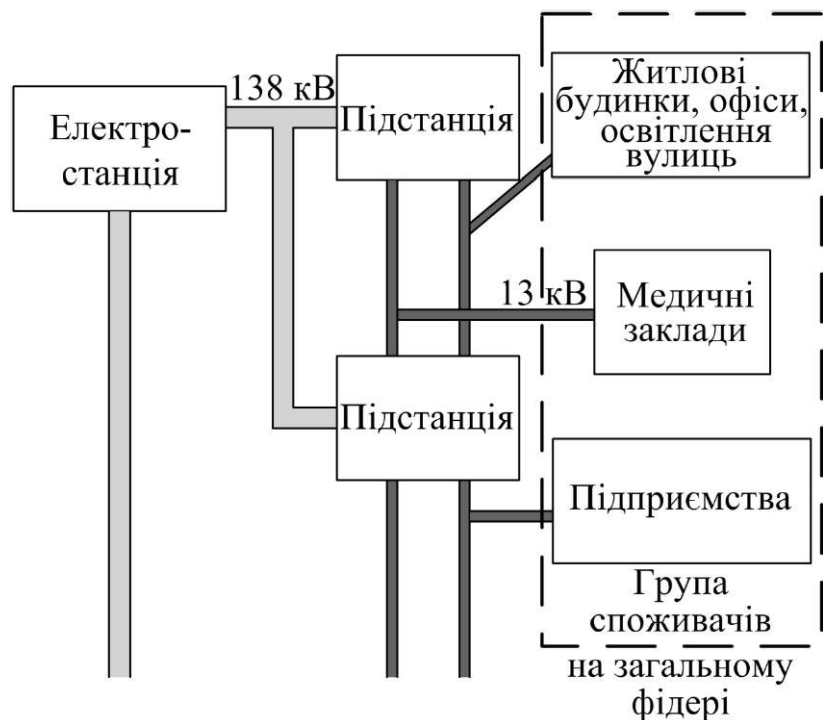


Рисунок 2.35 – Схема розміщення ВТНП кабелю напругою 13 кВ у розподільній мережі низької напруги

Розміщення ВТНП кабелю в мережі Нью-Йорку планується здійснити у 2011 р. за два етапи. Перший, вже розпочатий етап, полягає в підготовці прототипів систем – розробленні, виготовленні та тестуванні кабелів довжиною 3 та 25 м.

Другий етап сфокусований на розміщенні цієї системи на ділянці енергомережі компанії *Consolidated Edison* у Нью-Йорку. Потужна лінія з'єднає дві підстанції на Манхеттені. Згідно із планом ВТНП кабельна система буде прокладена під час модернізації енергомережі, яку планує здійснити *Consolidated Edison*.

У рамках проекту до кінця 2010 р. компанія *Southwire* за контрактом з *AMSC* має виготовити триаксіальний кабель „*Triax*TM” із ВТНП проводу 2-го покоління за стандартом „344” на 13,8 кВ (див. рис. 2.32) із наступними параметрами: довжина кабелю – 300 м, максимальна напруга – 15,5 кВ (діюче значення), робочий струм – 4 кА (у тривалому режимі), припустимий струм КЗ – 40 кА (діюче значення), потужність – 96 МВА.

Конструкція триаксіального кабелю дозволяє скоротити витрату проводу, зменшити площу поверхні, що охолоджується рідким азотом, і, відповідно, знизити вимоги до системи охолодження, що знижує собівартість ВТНП кабелю.

AMSC пропонує нову надпровідникову технологію „*Secure Super Grid*TM” для енергосистем великої потужності із захистом від перенапруги, що забезпечує безпечне і ефективне постачання електроенергії до підприємств міста. Технологія „*Secure Super Grid*TM” поєднує властивості ВТНП кабелю високої потужності та ВТНП струмообмежувачів в одній системі. Струмообмеження в кабелі із ВТНП 2-го покоління може бути досягнуте за рахунок порівняно високого питомого опору надпровідних стрічок, що з'являється при перевантаженні струмом.

У 2008 р. були виготовлені і протестовані два 3-метрових однофазних прототипи кабелю за технологією „*Secure Super Grid*TM” (табл. 2.11) [102]. Кабель *ConEd01* спеціально був виготовлений зі стрічок з широким розкидом значень I_k по довжині для того щоб виявити його вплив на пом'якшення КЗ.

Обидва кабелі пройшли випробування на струмообмеження при КЗ у дослідницькій лабораторії *Copenhagen University College of Engineering* (Данія) і продемонстрували задовільні результати при струмообмеженні. Далі наведені результати випробування на струмообмеження для кабелю *ConEd02*, оскільки саме ця структура буде застосована при проектуванні кабелів довжиною 25 та 300 м. Кабель *ConEd02* є однофазним прототипом 25-метрового триаксіального кабелю, який був випробуваний в *ORNL* наприкінці 2009 р.

Таблиця 2.11 – Параметри прототипів ВТНП кабелю за технологією „Secure Super Grid™” для „Проекту Гідра”

Параметр	Значення	
	ConEd01	ConEd02
Довжина, м	3	3
Кількість шарів ВТНП	2	4
Кількість стрічок	68	109
Середній критичний струм стрічки (при 77 К), А	84	87
Розкид значень I_k на довжині понад 1 м, %	10–27	<10
Критичний струм I_k (при 77 К), А	5790	8500
Деградація критичного струму	немає	є невелика

Результати одного з багаточисельних КЗ, проведених у ході досліджень, наведені на рис. 2.36. Очікувалось, що величина струму КЗ дорівнюватиме близько 140 кА (амплітудне значення) та 60 кА (діюче значення) протягом 70–140 мс. Завдяки струмообмежуючому ефекту ВТНП кабелю амплітудне значення струму дорівнювало 44 кА і протягом дії КЗ знизилось до 30 кА.

На цей час у стадії виготовлення знаходиться вже третій прототип триметрової довжини ConEd03, який невдовзі проходитиме випробування. У ньому мають бути меншими втрати на змінному струмі, ніж у прототипах ConEd01 та ConEd02.

За розрахунками AMSC ринок нової технології „Secure Super Grid™” та струмообмежувачів у вигляді самостійних пристроїв перевищить мільярд доларів на рік. Є достатньо підстав вважати, що новий напрямок стане каталізатором прискореного впровадження ВТНП технологій в енергетичні системи. „Проект Гідра” є вдалим з’єднанням трьох ідей: концепції Міністерства національної безпеки – вкладення коштів в інноваційні енергетичні технології для підвищення рівня безпеки енергомереж; концепції Consolidated Edison – упровадження надпровідникових технологій у свій енергетичний план „System of the Future” для Нью-Йорку та концепції AMSC – комерціалізація надпровідникових технологій для потреб електроенергетики.

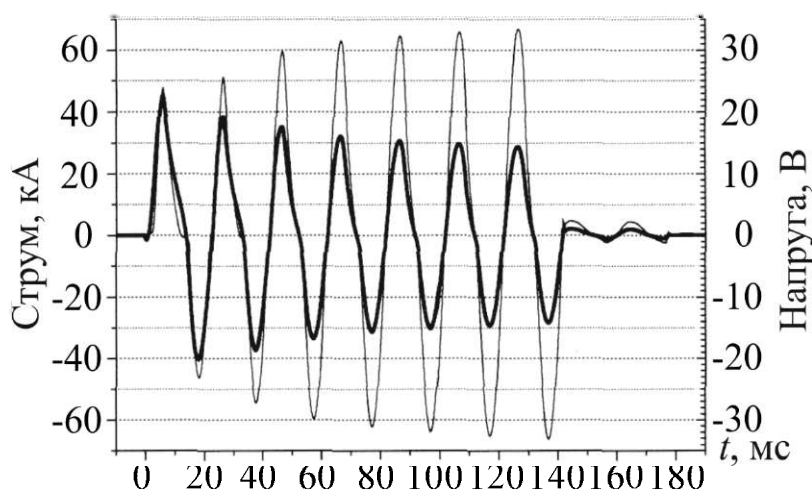


Рисунок 2.36 – Динамічний режим при обмеженні ВТНП кабелем „Secure Super Grid™” ConEd02 довжиною 3 м струму КЗ (із очікуваним амплітудним та діючим значенням 140 кА та 60 кА, відповідно)