

## Розділ 3

### Електромеханічні перетворювачі енергії

Ще у 50–60-тих роках минулого століття, з появою надпровідних (НП) обмотувальних матеріалів, у всіх розвинених державах світу почали проводитися роботи, спрямовані на створення електромеханічних перетворювачів енергії, в першу чергу, електричних машин (ЕМ), в яких використовується явище надпровідності. Ці розроблення постійно просуваються відповідно до того, як зростають параметри і можливості самої надпровідності: перехід від низькотемпературної до високотемпературної надпровідності; поява ВТНП обмотувальних матеріалів 2-го покоління та ін.

Використання надпровідності дає можливість отримати більш високі (у порівнянні з традиційними „теплыми” ЕМ) величини питомої потужності, коефіцієнта корисної дії і коефіцієнта потужності, а також значно зменшити масо-габаритні показники.

Останнім часом розширився діапазон електромеханічних пристроїв, у яких надпровідною є не тільки обмотка збудження, але і якірні обмотки змінного струму, розроблені промислові конструкції та випробувані дослідні зразки основних типів надпровідних ЕМ. Більш того, розробляються конструкції ЕМ, у яких поєднуються ВТНП масиви і високо коерцитивні постійні магніти, що дозволяє належним чином формувати магнітне поле і отримувати, завдяки цьому, більш ефективну електромагнітну взаємодію.

#### 3.1. Надпровідні генератори змінного струму

Надпровідні генератори змінного струму мають найбільший потенціал для широкомасштабного промислового застосування. За рахунок більшого магнітного поля, створюваного НП обмоткою збудження, забезпечується підвищення ККД вище 99 % з одночасним зменшенням маси і об'єму (до 60 %). Використання НП генераторів дозволяє також знизити експлуатаційні і амортизаційні витрати, зменшити забруднення навколишнього середовища на одиницю виробленої енергії. Крім цього, такі машини зможуть генерувати електроенергію з напругами ліній електропередачі, що виключає необхідність установа спеціальних трансформаторів на генеруючих станіях.

НП генератори мають низку переваг, що дозволяють підвищити стабільність енергосистеми. Перше - підвищення динамічної стійкості за рахунок більш низького реактивного опору. Друге - підвищення статичної стійкості і стабільності напруги за рахунок підвищення максимально припустимої напруги при роботі з низьким збудженням. Для звичайних генераторів синхронний

реактивний опір  $X_d$  перевищує 1,5 відносних одиниць (в.о.), у якому за базовий (повний) опір приймається відношення номінальної напруги до струму машини.  $X_d$  НП генератора може бути знижений до 0,3–0,4 в.о., що зменшить фазовий кут і підвищить рівень стійкості генератора.

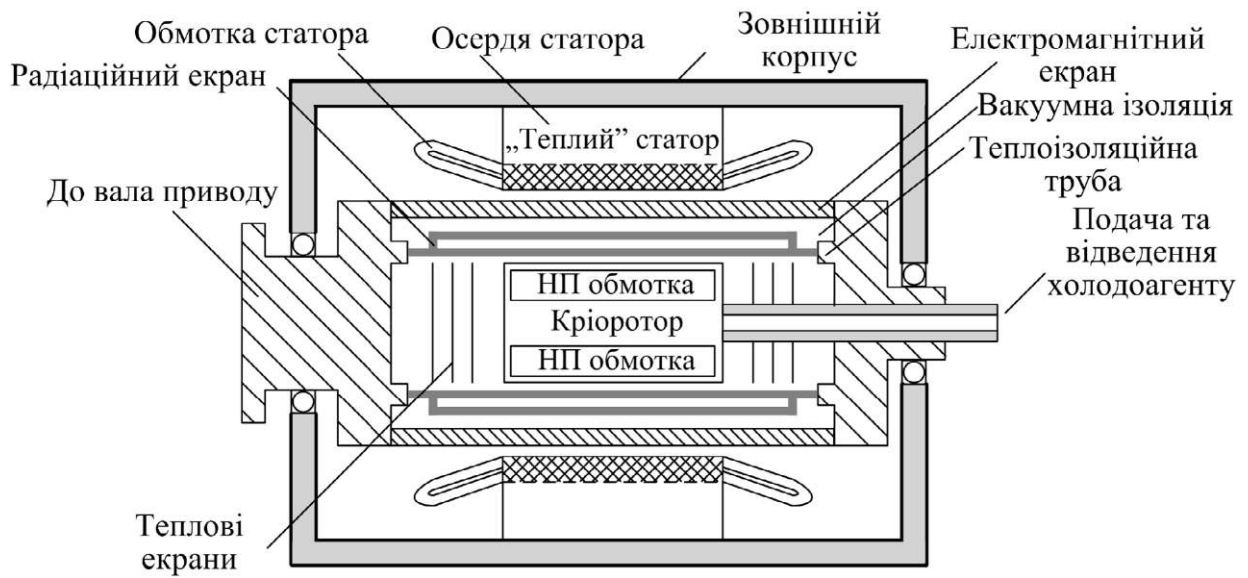
Додатковою перевагою НП генераторів є більша довговічність. Термін служби звичайних генераторів обмежений 30–40 роками через старіння ізоляції обмоток під дією високої температури. Цей несприятливий фактор повністю відсутній у криогенних надпровідних пристроїв. Крім того, НП генератор може працювати як синхронний компенсатор, тобто генерувати реактивну потужність.

Створення потужних (більше 100 МВт) стаціонарних НП генераторів з високим ККД (більше 99 %) має велике значення для традиційної електроенергетики. За оцінкою Міністерства енергетики США (DoE), підвищення ефективності перетворення енергії на 0,5 % дозволить заощаджувати до 200 тис. дол. у рік на кожні 100 МВт потужності НП генератора.

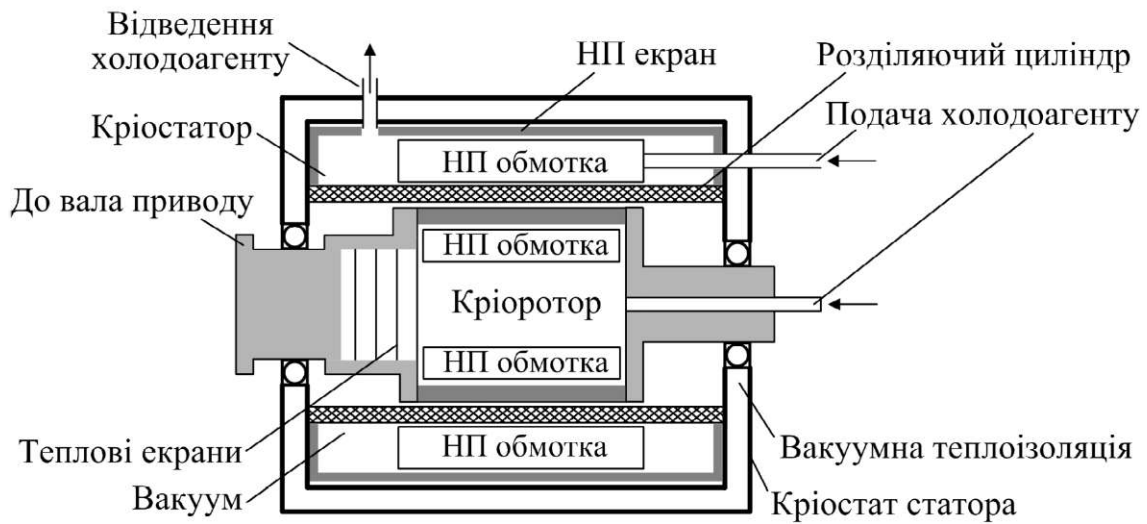
Дві основні переваги НП генераторів – компактність і висока ефективність – відкривають перспективу їхнього застосування у спецтехніці. Компактні генератори електричної енергії з базуванням на мобільній платформі (літаку, судні, поїзді або автомобілі) затребувані, насамперед, у військовій техніці [103]. Від наявності мобільних генераторів потужністю в десятки і сотні МВт залежить створення електромагнітної (мікрохвильової) зброї, тактичних лазерів і систем електромагнітного запуску. Варто відмітити, що сама по собі висока ефективність тут не є головною перевагою. Набагато важливіше те, що в НП генераторах лише невелика частина енергії виділяється у вигляді тепла, що для забезпечення теплового балансу треба відводити від системи. Зрозуміло, що для мобільних НП генераторів можливе і мирне застосування, наприклад, як резервні джерела енергії в аеропортах, лікарняних центрах, на критичних виробництвах. Серйозні шанси на широке застосування таких машин є і у суднобудівній промисловості, як військової, так і цивільної.

### **3.1.1. Основні конструктивні схеми турбогенераторів з надпровідними обмотками (кріотурбогенераторів)**

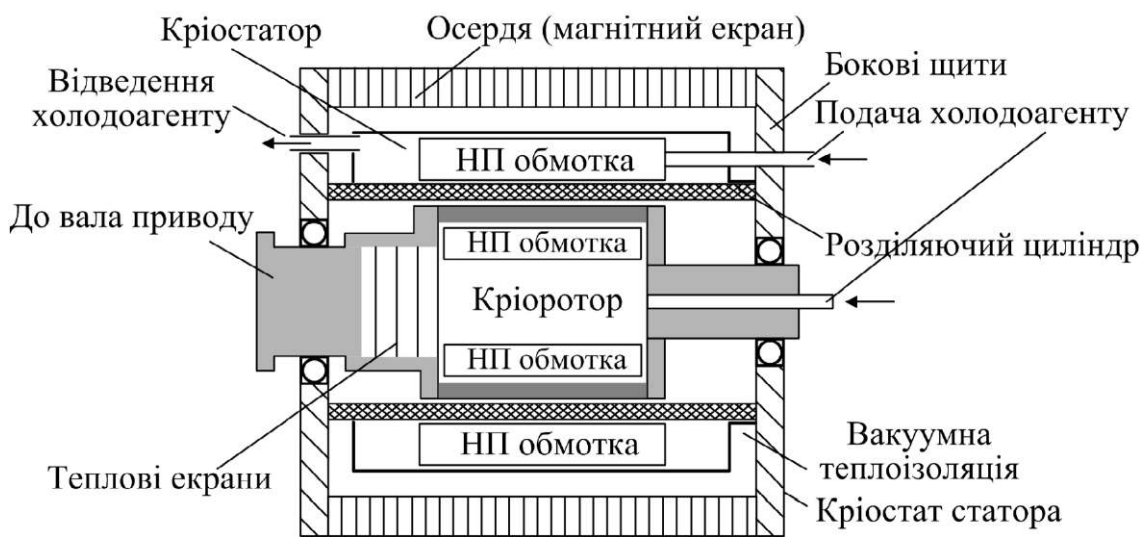
Кріотурбогенератори (КТГ) можуть бути реалізовані або з однією надпровідною обмоткою (роторна обмотка збудження), або з надпровідними обмотками як ротора, так і статора. Останнє конструктивне рішення передбачає формування магнітного потоку і його утримування в середині КТГ за допомогою надпровідного або магнітного екрана. Названі конструктивні схеми зображені на рис. 3.1.



*a*



*б*



*в*

Рисунок 3.1 – Конструктивні схеми КТГ:

*a* – гібридна схема (традиційна схема з НП обмоткою збудження);

*б* – повністю надпровідний КТГ (НП обмотки ротора і статора, НП екран);

*в* – НП обмотки ротора і статора, „теплий” магнітний екран (шихтоване осердя)

Конструктивну схему КТГ з НП екраном (рис. 3.1, б) поки що можна реалізувати на низькотемпературному рівні, використовуючи, наприклад, такий низькотемпературний надпровідник, як ніобій.

Для аналізу наведених конструктивних схем варто звернутися до коефіцієнта використання ЕМ [104]:

$$k_A = p k_\Phi k_{\text{об}} A_S B_\delta,$$

де  $k_\Phi$  – коефіцієнт форми магнітного поля;  $k_{\text{об}}$  – обмотковий коефіцієнт для першої гармоніки електрорушійної сили;  $A_S$  – лінійне струмове навантаження статора;  $B_\delta$  – індукція в зазорі між ротором і статором.

У турбогенераторах традиційної конструкції параметри  $A_S$  і  $B_\delta$  обмежені наявністю зубцевої зони статора, яка не може бути перенасичена, а відмова від неї вимагає такої магніторушійної сили (МРС), яка не може бути забезпечена звичайним ротором. Використання НП обмотки збудження (рис. 3.1, а) на порядок збільшує можливості з утворення МРС, що дозволяє відмовитись від зубцевої зони осердя статора, розташувати обмотку статора в зазорі, збільшити, таким чином, як  $B_\delta$ , так і  $A_S$ , приблизно, у 1,5 рази, а  $k_A$ , відповідно, до 2 разів. При цьому зникають витрати потужності на збудження, але залишаються досить великі витрати в обмотці і осерді статора.

Використання НП обмотки статора дозволяє суттєво зменшити витрати в ній, а також на порядок збільшити лінійне струмове навантаження  $A_S$ . При цьому утримання магнітного поля всередині КТГ можливе за допомогою НП екрана з ніобію (рис. 3.1, б), критичне магнітне поле якого при температурі рідкого гелію дорівнює  $B_{CNb} \approx 0,16$  Тл. З урахуванням того, що обмотка статора розташована ближче до ротора і на віддаленні від НП екрана, індукція може бути на рівні 0,25–0,3 Тл. Таке зменшення індукції в зазорі компенсується значним збільшенням лінійного струмового навантаження, що дає в підсумку збільшення коефіцієнта використання  $k_A$  у 2–3 рази.

У свою чергу, зменшення  $B_\delta$  дозволяє, відповідно, зменшити МРС ротора і витрати в обмотці статора, що позитивно впливає на ККД КТГ і покращує його масогабаритні показники [104].

Поява ВТНП 2-го покоління, які спроможні працювати у змінному магнітному полі, дозволяє ще більше удосконалити конструкцію КТГ, замінивши НП екран на шихтований магнітний (рис. 3.1, в). При цьому, якщо зберегти принцип зменшення  $B_\delta$  при значному зростанні  $A_S$  (а це дуже важливо для обмотки статора), додаткові витрати, які привнесе шихтований магнітний екран, будуть не більше 0,03–0,05 % від потужності КТГ. Ураховуючи те, що витрати

на охолодження рідким азотом десь на два порядки нижче порівняно з охолодженням рідким гелієм, ККД такого КТГ буде близьким до 99,9 %. При цьому його масогабаритні показники не поступаються повністю надпровідному КТГ із НП екраном.

У табл. 3.1 наведені результати порівняльних розрахунків турбогенератора потужністю 300 МВт, як традиційної конструкції, так і всіх можливих конструктивних варіантів КТГ.

Таблиця 3.1 – Параметри традиційного і НП турбогенераторів

Тип генератора	ТГВ-300-2	КТГ-300	КТГ-300НЕ	КТГ-300МЕ
Індукція в зазорі, Тл	0,93	1,19	0,35	0,4
Лінійне навантаження, кА/см	1,5	2,3	8,45	7,5
ККД, %	98,7	99,35	99,53	99,85
Довжина, м	12,03	10,73	10,00	10,0
Ширина, м	4,82	4,40	4,20	4,0
Висота, м	6,00	4,90	4,50	4,2
Вага, т	370	170	92	112
Особливості конструкції	Конструкція традиційна	НП обмотка ротора	НП обмотки ротора і статора, НП екран	НП обмотки ротора і статора, магнітний екран

Можливі конструктивні схеми КТГ знаходяться на різних рівнях реалізації. Найбільш близька до промислового впровадження гібридна конструкція, яка за останні 30–40 років пройшла суттєвий шлях досліджень і удосконалень.

У перших гібридних машинах, створених до початку 70-х, надпровідники використовувалися тільки в нерухомій обмотці збудження, у той же час як обертову обмотку виготовляли із традиційних провідникових матеріалів. Потужність цих експериментальних машин, виготовлених у СРСР, США, Німеччині (ФРГ) і Японії, становила від 8 до 30 кВт.

### 3.1.2. Відомі світові проекти НТНП генераторів

Унікальний досвід розробки НП генераторів був накопичений у СРСР. Дослідження в цьому напрямку почалися в 60-х роках у ВНДІ Електромаш (м. Ленінград), а також у НДІ заводу „Електроважмаш” (м. Харків). Перша ЕМ з надпровідниками була спроектована в 1963 р. і її потужність становила усього декілька ват. Але вже в 1971 р. НДІ заводу „Електроважмаш” виготовив прототип реального кріотурбогенератора потужністю 200 кВт (рис. 3.2), який успішно випробували у Фізико-технічному інституті низьких температур (ФТІНТ) НАН України [105]. На ротор цього КТГ, у якому була розташована НП обмотка збудження, автори одержали патент [106], що став основою для всіх розроб-

лювальних пізніше КТГ [107–109].

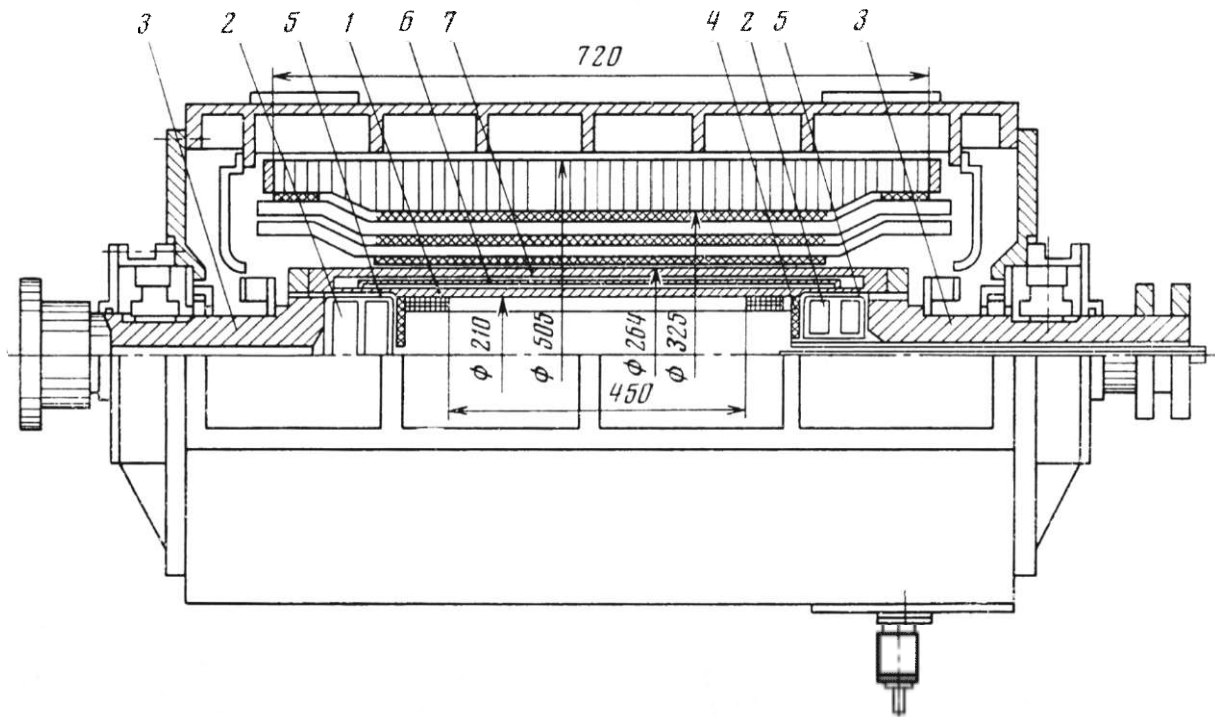


Рисунок 3.2 – Принципова схема КТГ потужністю 200 кВт, розробленого НДІ заводу „Електроважмаш” (м. Харків)

Одне з основних умов надійної і економічної роботи КТГ, наведеної на рис. 3.2 конструкції – ефективна теплоізоляція обмотки збудження. Найбільш раціональне рішення цієї задачі розроблювачі знайшли у використанні вихідного із внутрішнього об’єму криостата ротора холодного газу для блокування тепла, яке поступає ззовні. Внутрішній об’єм ротора, в якому підтримується гелієва температура і міститься обмотка збудження, оточений теплоізолюючим циліндром 1, який закритий з торців теплоізолюючими заглушками 2. Теплоізолюючий циліндр з’єднаний з кінцевими частинами 3, що передають обертальний момент. Рідкий гелій подається у внутрішній об’єм ротора по гелієвідводу і утримується від витікання перегородками 4.

Теплоізоляція здійснюється шляхом відведення зовнішнього тепла газоподібним гелієм, який витікає із внутрішнього об’єму ротора по зазорах 5 між теплоізолюючим циліндром і теплоізолюючими заглушками. Захист від теплової радіації забезпечують теплові екрани 6, тепло від яких також відводиться вихідним гелієм. У теплоізолюючому циліндрі і теплоізолюючих заглушках підтримується необхідний вакуум. При цьому зовнішня оболонка 7 теплоізолюючого циліндра є одночасно електромагнітним екраном, який захищає обмотку збудження від змінних магнітних полів, створених обмоткою статора, і сприймає електродинамічні зусилля при перехідних процесах.

Для відпрацювання прийнятих конструктивних рішень і методів електро-

магнітних та теплових розрахунків було проведено ряд експериментальних робіт. Теплопередача і теплообмін в кінцевій частині кріостата ротора, по силових мостах якого тече основний теплоприплив, досліджувались як на статичній моделі, так і при обертанні. Статична модель була виконана у вигляді кріостата з невеликим за висотою холодним об'ємом, теплоізольованим від навколишнього середовища вакуумною рубашкою і теплоізольованою заглушкою. Перевірялися три конструктивних варіанти теплоізолюючих заглушок:

- а) гладка вакуумна пробка;
- б) вакуумна пробка з оребренням на боковій поверхні;
- в) текстолітова пробка з мідними прокладками.

За результатами досліджень були визначені часові витрати рідкого гелію, отриманий розподіл температур за довжиною стінки силового моста (стінки вакуумної рубашки) і за довжиною теплоізолюючих заглушок, виміряна температура газоподібного гелію в зазорі між вакуумною рубашкою і теплоізолюючими заглушками, а також на виході із зазору. В табл. 3.2 подані часові витрати рідкого гелію для різних конструктивних варіантів, на рис. 3.3 подана геометрія силового мосту (розміри у мм) і наведений розподіл температури за його довжиною. Матеріал силового мосту – сталь марки Х18Н9Т.

Дослідження довели, що найбільш ефективну теплоізоляцію кріостата ротора забезпечує оребрена вакуумна пробка.

Таблиця 3.2 – Часові витрати рідкого гелію для різних конструктивних варіантів КТГ НДІ заводу „Електроважмаш” потужністю 200 кВт, л/год

Варіант теплової заглушки	Розрахунок	Експеримент
Гладка вакуумна пробка	2,45	2,0
Оребрена вакуумна пробка	1,60	1,2
Текстолітова пробка	7,18	7,0

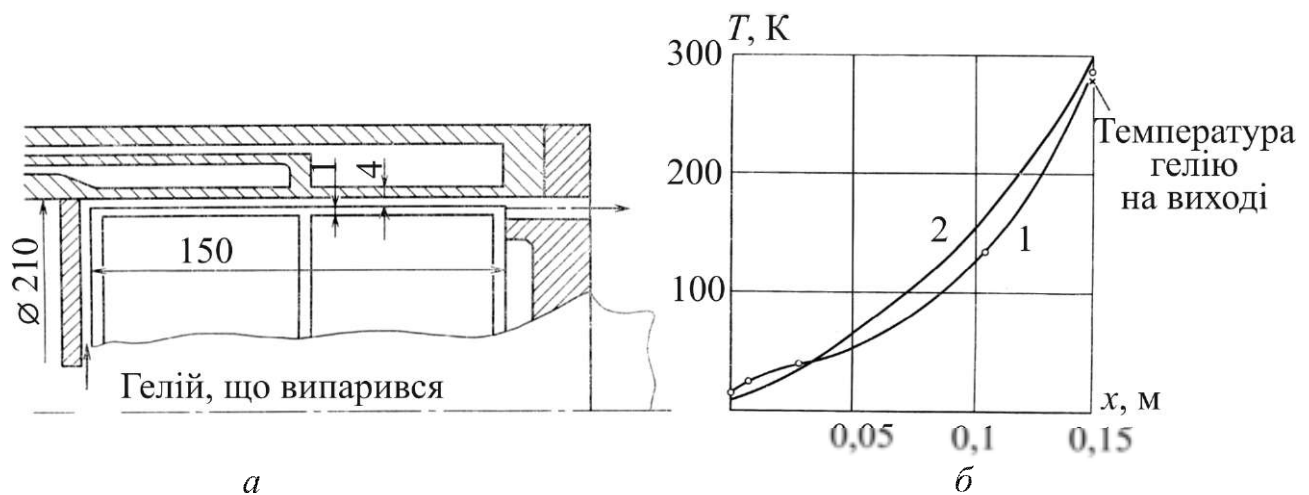


Рисунок 3.3 – Геометрія силового мосту (а) та розподіл температури за його довжиною (б)

Конструктивні принципи дослідженого макетного КТГ були закладені у проєктовані КТГ потужністю 50 і 300 МВт, а згодом 500 і 2000 МВт. Проведені конструктивні проробки довели істотний ефект при переході до КТГ зазначеної конструкції в порівнянні з найбільш широко використовуваними на той момент турбогенераторами з водневим і водяним охолодженням обмоток статора і ротора (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Порівняльні характеристики КТГ та турбогенераторів з водневим і водяним охолодженням

Потужність, МВт	Охолодження ротора	Густина струму в обмотці ротора, А/мм <sup>2</sup>	Маса ротора, т	Довжина пазової частини, м	Маса на одиницю потужності, кг/кВ А	ККД з урахуванням витрат на охолодження, %
50	Водяне	8,04	19	2,8	1,59	98,01
50	5К, надпровідність	136	7,5	1,6	0,74	98,68
300	Водневе	9,5	55,8	5,8	1,03	98,66
300	5К, надпровідність	165	14,5	2,7	0,38	99,04
500	Водяне	13,3	61,5	6,2	0,59	98,76
500	5К, надпровідність	165	18	2,8	0,29	99,27
2000	Водяне	14,1	140	8,8	0,36	99,08
2000	5К, надпровідність	200	35	4,0	0,19	99,39

Паралельно велися роботи зі створення гібридних НІ генераторів з НІ ротором і мідним статором у США, і увінчалися вони створенням машини потужністю 2 МВт.

Саме ця конструктивна схема (надпровідний ротор – резистивний статор) і одержала найбільше поширення надалі.

На початку 80-х кріотурбогенератор потужністю 20 МВт був створений компанією *General Electric* (США). Одночасно дослідний зразок КТГ такої потужності був розроблений і виготовлений у ВНДІ Електромаш (Росія). Він був установлений в енергосистемі Лененерго і досліджений при роботі в режимі синхронного компенсатора (рис. 3.4) [110].



Рисунок 3.4 – НІ генератор КТГ-20 потужністю 20 МВт на дослідному стенді

Не залишалась без уваги і спецтехніка. На початку 70-х років компанією *Westinghouse* за замовленням військово-повітряних сил США був розроблений, виготовлений і успішно досліджений НП ротор, який обертався зі швидкістю 12 тис. об/хв і охолоджувався рідким гелієм.

Усі ці досягнення відкрили шлях до створення машин більшої потужності, і вже до середини 70-х НП реалізація генераторів потужністю близько 1 ГВт вважалася принципово можливою.

Варто перелічити проблеми, які вирішували вчені і інженери того часу: охолодження рідким гелієм обертового ротора генератора; герметизація системи високовакуумної теплоізоляції; забезпечення механічної міцності обмоток; юстировка і балансування ротора; заглушення вібрацій працюючої машини. Шукані рішення, до речі, далеко не завжди були прості. Наприклад, охолодження ротора генератора КТГ-20, розробленого ВНДІ Електромані, проводили у три етапи і тривала ця процедура 75 год. Крім того, істотну проблему являє собою механічна фіксація надпровідної обмотки. Через дуже низьку теплоємність матеріалу при температурі рідкого гелію небезпечно нагрівання і перехід надпровідника в нормальний стан може бути викликаний просто тертям проводу, що несподівано зрушився зі свого місця.

До кінця 80-х фахівці компанії *General Electric* розробили концепцію машини потужністю 300 МВт. Генератор такої ж потужності був розроблений і виготовлений у СРСР на заводі „Електросила” (КТГ-300), але пізніше у 1985 р., у зв'язку з початком перебудови, роботи були припинені. І в той же час, накопичені матеріали розробок та досліджень наочно підтверджували переваги використання надпровідності в потужних турбогенераторах. Достатньо порівняти параметри реально виготовленого КТГ-300 з параметрами серійного турбогенератора ТГВ-300-2, що мав водневе охолодження (див. табл. 3.1).

Відкриття ВТНП зробило великий і неоднозначний вплив на розвиток цієї галузі. На нові надпровідники покладали великі надії і тому багато робіт зі створення машин на НТНП було скорочено або припинено. Високий темп досліджень залишився тільки в Японії, завдяки чому на сьогоднішній день саме Японія є лідером у справі створення НТНП генераторів. Багаторічний проект *Super-GM* стартував у 1987 р. і фінансувався *National Economic Development Organization (NEDO)* – Організацією розвитку нових промислових технологій та джерел енергії, *Ministry of International Trade and Industry (MITI)* – Міністерством зовнішньої торгівлі та промисловості і великими японськими компаніями – *Hitachi, Mitsubishi, Toshiba*. Над проектом працював колектив з 250 чоловік, а обсяг фінансування перевищив 250 млн дол. У 2000 р. проект увінчався ство-

ренням промислового НТНП генератора з рекордною вихідною потужністю в 70 МВт (рис. 3.5), що випробовували в безперервному режимі протягом 1500 год (це також є рекордом) [111–115].

Окрім розробки НТНП генератора програма містила такі основні складові щодо розроблення:

1) надпровідних проводів на основі як низькотемпературних (4,2 К), так і високотемпературних (78 К) надпровідників для використання в генераторах і силовій електроапаратурі;

2) надійної криогенної системи для промислових НП турбогенераторів;

3) проектної методики та визначення переваг НП турбогенераторів порівняно з традиційними при використанні їх в енергосистемі.

З метою апробації базових технологій, необхідних для проектування і виготовлення запрограмованого турбогенератора, був виготовлений та досліджений модельний турбогенератор потужністю 70 МВт. Його радіальні розміри дорівнювали радіальним розмірам турбогенератора потужністю 200 МВт, а довжина активної частини була втричі меншою. Обмотка статора була розташована в розточці осердя і охолоджувалася водою, а ротор являв собою полий кріостат, що обертається, з розташованою усередині НП обмоткою збудження (рис. 3.6).

Було виготовлено три ротори, орієнтованих на різні види збудження: два – з великою інерційністю, і один – з малою. Основні параметри по кожному з варіантів наведені у табл. 3.4.

Усі три ротори забезпечують, відповідно, високу стабільність, високу критичну густину струму та низькі втрати на змінному струмі. В означених трьох роторах використовувалися комбіновані НП проводи на основі NbTi розміром  $7,4 \times 2,9 \text{ мм}^2$  у варіанті А з алюмінієвою підкладкою, у варіанті В – з мідно-нікелевою, у варіанті С – твістіровані.

Більш детальні характеристики НП генератора з ротором у варіанті А наведені у табл. 3.5.

Схематична конструкція ротора зображена на рис. 3.7. Його силову основу (в усіх трьох варіантах) створює центральний теплий екран, з'єднаний з дво-



Рисунок 3.5 – Генератор *Super-GM* потужністю 70 МВт (Японія)

ма хвостовими частинами, який захищає НП обмотку збудження від змінних магнітних полів, що утворюються струмами зворотної послідовності і вищими гармоніками. Матеріал теплового екрана – сплав нікель-мідь-алюміній. Зовнішній діаметр (він же найбільший діаметр ротора) 890 мм. У варіанті В для покращення демпфірування змінних магнітних полів на поверхні екрана у спеціальних пазах розташовується короткозамкнена мідна обмотка.

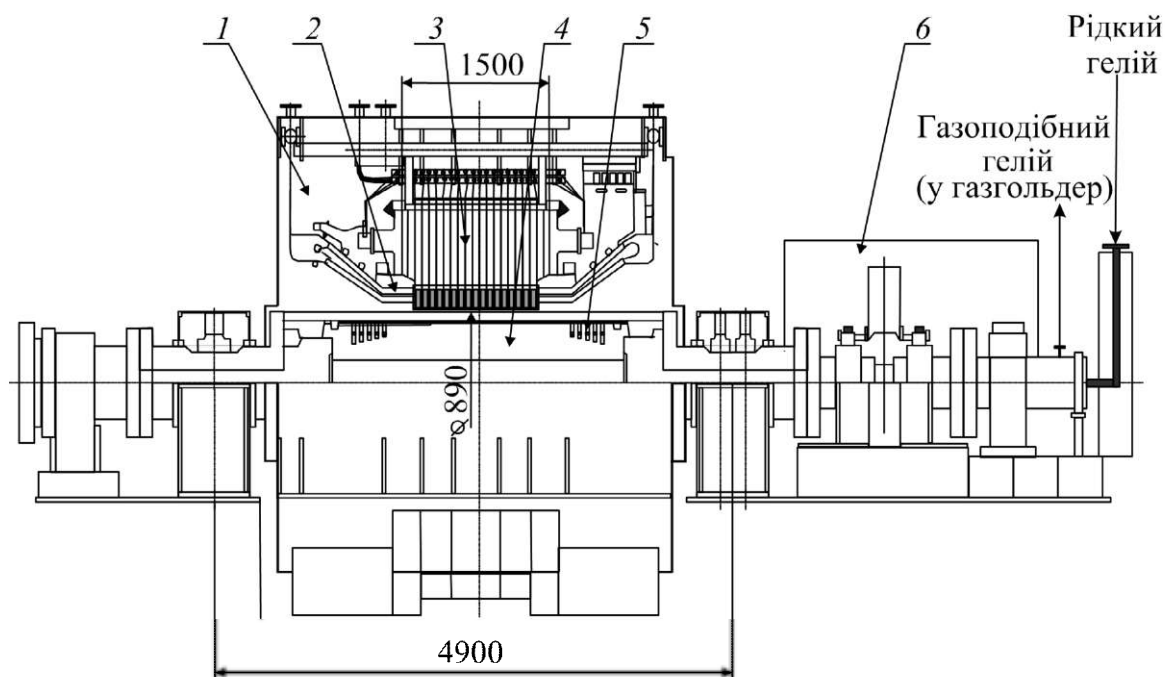


Рисунок 3.6 – Конструктивна схема кріотурбогенератора потужністю 70 МВт:  
 1 – статор; 2 – обмотка статора з водяним охолодженням; 3 – осердя статора;  
 4 – ротор; 5 – НП обмотка збудження; 6 – щітковий апарат

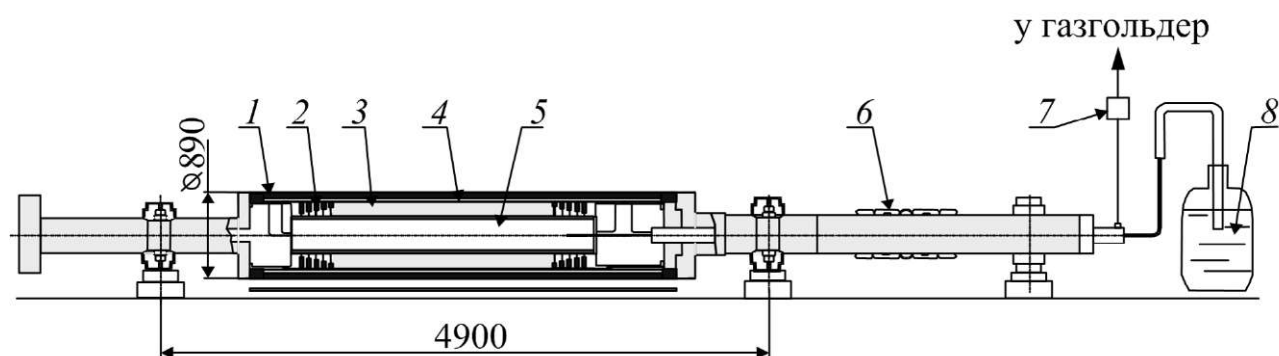


Рисунок 3.7 – Ротор кріотурбогенератора:  
 1 – теплий екран; 2 – НП обмотка збудження; 3 – холодний екран (несуча труба);  
 4 – вакуумний проміжок; 5 – рідкий гелій; 6 – контактні кільця; 7 – вимірювач витрат гелію;  
 8 – посудина Дьюара з рідким гелієм

Таблиця 3.4 – Основні характеристики дослідних турбогенераторів з надпровідною обмоткою збудження

Показники	Збудження з великою інерційністю		Збудження з малою інерційністю
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Потужність, МВА	83	83	73
Напруга, кВ	10	10	10
Струм статора, А	4792	4792	4215
cosφ	0,9	0,9	0,9
Швидкість обертання, об/хв	3600	3600	3600
Відносний реактивний опір, $X_d$	0,35	0,35	0,45
Номінальний струм збудження, А	3000	3000	3200
Максимальний струм збудження, А	3600	3600	4500
Структура ротора:			
Теплий екран	одношаровий	з білячою клітиною	тришаровий
Холодний екран	тришаровий	одношаровий	одношаровий
Компенсація теплових деформацій	подвійний підшипник ковзання	гнучка опора	гнучка опора
Властивості надпровідника	висока стабільність	висока густина струму	низькі втрати на змінному струмі
Структура статора	шихтоване осердя без зубців; двічі транспонована обмотка з водяним охолодженням, розташована у розточці осердя		

НП обмотка збудження з числом п'ять котушок на полюс (рис. 3.8) розташовується в пазах немагнітного індуктора, який фіксується в циліндричній трубі з нержавіючої сталі. Кінці труби з'єднуються із зовнішнім тепловим екраном. Таким чином, утворюється вакуумний простір, що сприяє захисту НП обмотки від теплоприпливу. Крім цього, між зовнішнім екраном і внутрішньою трубою розташований холодний радіаційний екран, призначений для захисту НП обмотки як від променевого теплоприпливу, так і від змінних магнітних полів, яким вдалось пройти крізь теплий зовнішній екран.

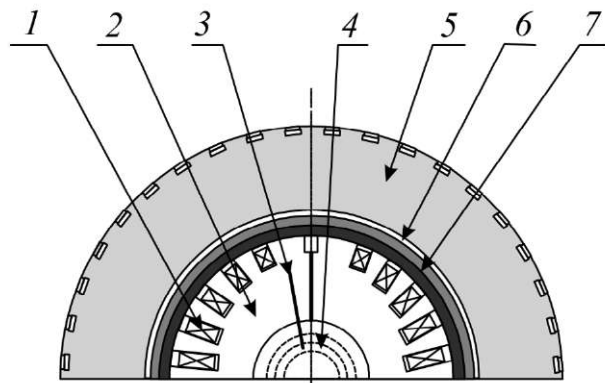


Рисунок 3.8 – Переріз ротора кріотурбогенератора:

- 1 – котушки НП обмотки збудження;
- 2 – опорна конструкція обмотки збудження;
- 3 – датчик рівня рідкого гелію; 4 – рідкий гелій;
- 5 – теплий екран з демпферною решіткою;
- 6 – вакуумний проміжок; 7 – холодний екран

Таблиця 3.5 – Характеристики НП генератора потужністю 70 МВт

Параметр	Значення
Номінальна потужність, МВА	83
Номінальна напруга, кВ	10
Номінальний струм статора, А	4792
Струм збудження $I_z$ , А	2872
Густина струму в обмотці збудження, А/мм <sup>2</sup>	160
Максимальна індукція, Тл	4,0
Коефіцієнт потужності	0,9
Частота, Гц	60
Частота обертання $n$ , об/хв	3600
Зовнішній діаметр теплового демпфера, мм.	880
Довжина магнітного екрана, мм	1500
Відстань між опорами, мм	4900
Обмотка якоря	рівносекційна (подвійний шар)
Охолодження обмотки якоря	водяне
Швидкість збудження	0,1 в.о./с (300 А/с)
Діаметр ротора, мм	890
Кількість котушок обмотки збудження на полюс	5
Довжина котушки обмотки збудження, мм	1900
Розміри надпровідного проводу, мм <sup>2</sup>	7,4 · 2,9
Діаметр нитки надпровідника, мм	1,6
Кількість ниток надпровідника	9
Співвідношення Cu/CuNi/NbTi	2/1/1

Охолодження НП обмотки ротора у всіх варіантах здійснювалось у такій послідовності. Спочатку подавався холодний газоподібний гелій (60–100 м<sup>3</sup>/год), а по досягненні температури 110 К – рідкий гелій. Загалом процес охолодження становив близько 100 год. Збільшення годинного витрачання гелію зменшувало час охолодження до 70 год.

Теплоприпливи у кріостат ротора залежали від кількості обертів  $n$  і величини струму збудження  $I_z$ . Середні значення по всіх варіантах такі:

- при низьких обертах та  $I_z = 0$  теплоприпливи складають ~ 30–35 Вт;
- при  $n = 3600$  об/хв та  $I_z = 0$  теплоприпливи складають ~ 64–66 Вт,
- при  $n = 3600$  об/хв і номінальному струмі збудження теплоприпливи складають ~ 66–78 Вт.

Відігрівання ротора до кімнатної температури відбувалось таким чином. Спочатку призупинялась подача рідкого гелію і починав пропускатися теплий газоподібний гелій з малою швидкістю. На 20-й годині в обмотку подавався струм на рівні 20 А і утримувався практично до повного відігрівання ротора. Протікання у функції часу процесів охолодження і відігрівання показано на рис. 3.9.

Статичні випробування НП обмоток варіантів *A* і *B* довели їх повну стабільність при  $I_3 = 3000$  А (навіть трохи вище, ніж номінальний струм). Зрив надпровідності відбувся при  $I_3 = 4330$  А, що становить 93 % критичного струму (4720 А).

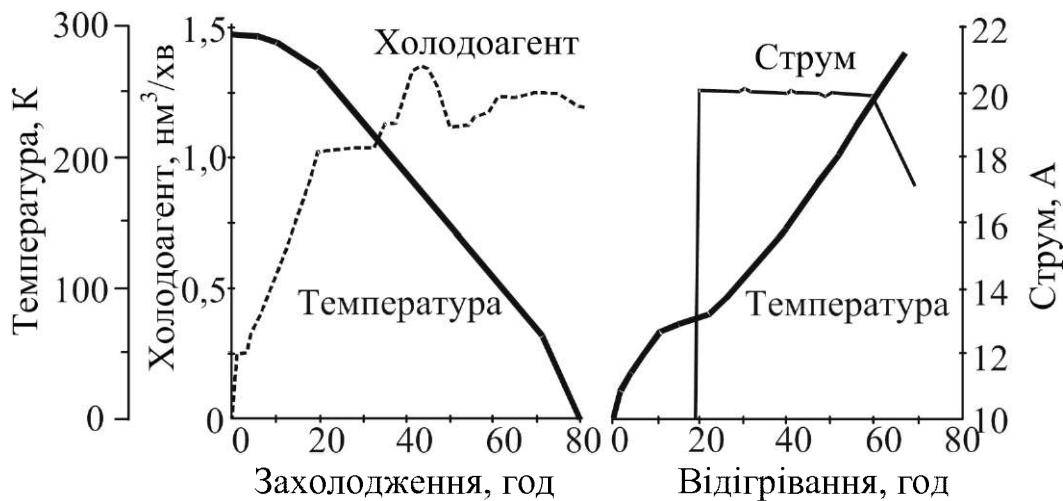


Рисунок 3.9 – Графіки процесів охолодження і відігрівання у функції часу

Ротори варіантів *A* і *B* досліджувались у режимі імпульсного збудження. За 10 с струм був збільшений до 3000 А. При цьому випаровувалось 5,7 л рідкого гелію. Випробувалось також збудження до 3780 А зі швидкістю зростання струму збудження 660 А/с. Сталість надпровідності обмоток збудження збереглась.

Було проведено декілька досліджень модельного турбогенератора потужністю 70 МВт: неробочий хід, трифазне коротке замикання, раптове коротке замикання (трифазне і однофазне) при 15 % від номінальної напруги на затискачах, вимірювання ККД та ін.

У варіанті *A* значення струму збудження у неробочому режимі для генерування номінальної напруги 10 кВ становило 2320 А, а в режимі короткого замикання для генерування струму статора 4792 А, відповідно, 942 А, тобто  $X_d = 0,402$  (942 А/2320 А).

При навантаженні була отримана потужність 78,7 МВт. ККД при  $\cos\varphi = 0,9$  становив 98,15 %. НП обмотка збудження зберігала стабільність при пульсаціях струму 300 А/с.

У варіанті *B* струм збудження у неробочому режимі становив 2165 А, а в режимі короткого замикання – 919 А. Відповідно,  $X_d = 0,42$  (919 А/2165 А). Був проведений довготривалий (1500 год) тест з безперервною роботою протягом 814 год під повним навантаженням 83 МВА ( $P = 79$  МВт,  $Q = 22$  Мвар). Весь цей час криогенна система і НП обмотка залишалися в стабільному стані. Максимальне магнітне поле в роторі становило 4,5 Тл.

У варіанті  $C X_d = 0,409$  (948 А / 2319 А). НП обмотка збудження зберігала сталість при збільшенні струму до 4500 А зі швидкістю 20 А/с, а також при імпульсному збільшенні зі швидкістю 3200 А/с (3,8 Тл/с).

В табл. 3.6 наведені порівняльні дані по деяких параметрах турбогенератора з НП обмоткою збудження і турбогенератора традиційної конструкції, які свідчать про більшу статичну стійкість перших.

Таблиця 3.6 – Порівняльні параметри звичайного та НП турбогенераторів

Параметр		НП турбогенератор	Звичайний турбогенератор
Реактивний опір (у в.о.)	Синхронний $X_d$	0,409	1,70
	Перехідний $X_d'$	0,32	0,37
	Надперехідний $X_d''$	0,23	0,26
Стала часу, с	Перехідна	1,34	1,00
	Надперехідна	0,08	0,06

Стійкість надпровідного ротора до струмів зворотної послідовності набагато вища порівняно з традиційними турбогенераторами, тому що вихрові струми в зовнішньому екрані замикаються по його масиву, а не крізь контактні площадки. Під час досліду короткого замикання двох фаз обмотки ротора протягом 14,3 с не було зафіксовано значного збільшення температури. Не спостерігалась також втрата надпровідності в обмотці збудження.

Моделювання роботи електромережі типового міського району довело, що використання турбогенераторів з НП обмоткою збудження покращує умови її експлуатації [113, 114]. До того ж рівень їх надійності не поступається рівню надійності звичайних турбогенераторів. Перелічені вище переваги свідчать про доцільність комплектації нових блоків на електростанціях турбогенераторами з НП обмотками збудження.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили реальність промислового впровадження НТНП генераторів потужністю 200 МВт і більше. За оцінками менеджерів проекту, тільки в Японії обсяги продажу таких генераторів може складати 440 млн дол. щорічно (20–30 генераторів по 200–600 МВт і 2 генератори по 1 ГВт). Основна перевага НП генераторів – їхня стабільність і ефективність при роботі в енергосистемі. Наприклад, максимальна пропускна здатність системи зростає на 30 %, ККД – на 0,5–1,0 %, при одночасному зменшенні габаритів і маси НП генераторів до 2-х разів.

Наприкінці 80-х – початку 90-х років з'явилися НТНП кабельні матеріали, які були придатні для роботи з невеликими втратами у змінному магнітному полі. Це дало поштовх для початку робіт зі створення повністю надпровідних генераторів. Були виготовлені спочатку дослідні макетні моделі таких генера-

торів, у тому числі у Харківському політехнічному інституті разом із ФТІНТ НАН України [107]. Пізніше були виготовлені і продемонстровані у роботі повністю надпровідні генератори малої потужності у Франції (18 кВт, *Alsthom*) та в Японії (30 кВт).

Варто зазначити, що розробки НТНП генераторів утворили підґрунтя для розроблення ще більш ефективних ВТНП електричних машин. Але позитивне просування у цьому напрямі було можливе тільки за умови налагодження виробництва ВТНП кабельних матеріалів: як найбільш простий варіант – для роботи у постійному магнітному полі, а на велику перспективу – в змінному.

### 3.1.3. Генератори з ВТНП обмотками

Перші ВТНП генератори з'явилися у другій половині 90-х років ХХ сторіччя, впливаючи за розвитком технології проводів на основі ВSCCO. Проводи 1-го покоління дозволили підняти робочу температуру з 4 до 20–40 К. На великий жаль, застосування проводів з ВSCCO при температурах близько 77 К навряд чи можливо через швидке падіння критичного струму в магнітному полі. Проте, навіть таке підвищення робочої температури дозволило істотно знизити небезпеку аварійного перегрівання НП проводу, тому що теплоємність ВТНП матеріалу при цих температурах вже істотно вище, ніж при температурі рідкого гелію.

У США у 2003 р. в рамках програми „Партнерська ініціатива в галузі надпровідності” (*SPI*) компанія *General Electric* з використанням проводу на основі сполуки ВSCCO виробництва *American Superconductor* успішно створила прототип ВТНП генератора потужністю 1,5 МВт (рис. 3.10) [7, 116].

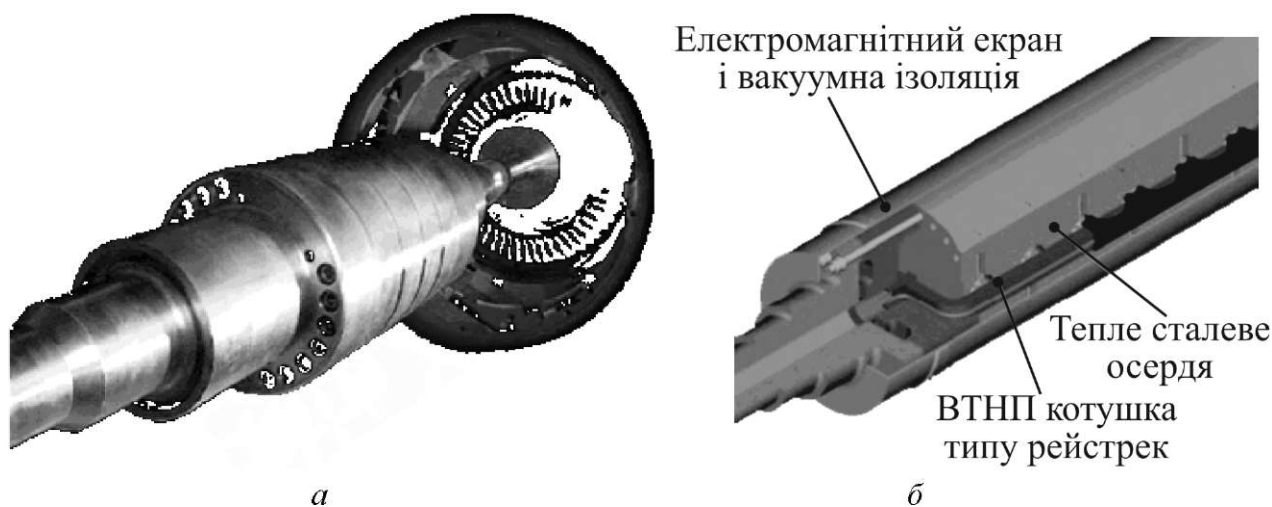


Рисунок 3.10 – ВТНП генератор потужністю 1,5 МВт, виготовлений *General Electric* з використанням проводу першого покоління *AMSC* (а) та конструкція його ротора (б)

Міністерство енергетики США (DOE) і компанія *General Electric* у рамках програми *SPI* профінансували проект на 2002–2006 рр. з бюджетом 26,7 млн дол. із розробки та виготовленню ротора ВТНП генератора потужністю 100 МВт, який можна буде також використати у вже наявних генераторах замість звичайного ротора. Однак виконання цього проекту було припинено з березня 2006 року. На ухвалення рішення вплинули відразу кілька факторів:

▼ для потреб ринку краще підходять генератори більшої потужності (500 МВт);

▼ ВТНП проводи першого покоління не відповідають багатьом вимогам, які диктуються високою потужністю машини (зокрема, достатньо важливе підвищення гранично припустимої деформації з 0,2 до 0,5 %);

▼ вартість ВТНП проводів та витрати на охолодження як і раніше високі (за словами менеджера проекту Джеймса Фогерти, „гранична” ціна ВТНП проводу не повинна перевищувати 15–25 дол./кА м, а робоча температура бути не нижче 50 К).

Отже, і у цій галузі основні надії розроблювачів пов’язані із ВТНП проводами 2-го покоління. Треба відмітити, що стрічки на основі YBCO (ВТНП 2-го покоління) з довжиною і характеристиками, необхідними для створення перших прототипів генераторів, з’явилися порівняно недавно. Розроблення генераторів на базі ВТНП 2-го покоління ведуть американські компанії *Long Electromagnetics* (з 2004 р., за контрактом із військово-повітряними силами США) і *Rockwell* у співробітництві з *SuperPower Inc.* Лідери у виробництві проводів 2-го покоління обіцяють швидкий прогрес у цій галузі. *SuperPower* виготовила в 2006 р. 10 км проводу 2-го покоління для замовників з Японії і уклала в січні 2006 р. 10-мільйонний контракт із американськими військовими на розвиток 2G-технології.

ВТНП проводи 2-го покоління використовуються ще в цілому ряді проектів зі створення ВТНП електричних машин різного призначення. Один з них проводиться новозеландською компанією *HTS-110 Ltd* (*H-T-S-one-ten*) і включає проектування, виготовлення, установлення та сервісне обслуговування компактного, легкого ВТНП високошвидкісного генератора з високою вихідною потужністю, з’єднаного безпосередньо з газовою

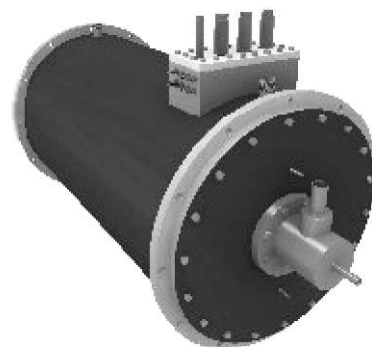


Рисунок 3.11 – Компактний генератор, розроблений компанією *HTS-110* у партнерстві з *Long Electromagnetics Inc.*

турбіною без використання редуктора (рис. 3.11) [117].

Компанія *HTS-110* заснована у квітні 2004 р. трьома основними пайовиками:

- *Industrial Research Ltd.* – Державний дослідницький інститут Нової Зеландії, що проводить дослідження і розробки по перспективних технологіях;
- *Endeavour Capital Ltd.* – лідируюча новозеландська інвестиційна компанія, що фінансує наукові дослідження і нові технології;
- *American Superconductor Corporation (AMSC)* – відомий у світі виробник і постачальник ВТНП провідників.

Основою для створення компанії *HTS-110 Ltd* послужили результати досліджень і розробок, отримані в рамках 15-річної новозеландської державної ВТНП програми.

У Німеччині компанія *Zenergy Power plc (ZEN.I)* – розроблювач у галузі комерційних застосувань надпровідних матеріалів – у результаті тривалого співробітництва з енергокомпанією *E.ON Wasserkraft GmbH* у 2006 р. уклала угоду про установлення першого у світі ВТНП гідрогенератора потужністю 1,25 МВт на комерційній гідроелектростанції в Хіршайді (*Hirschaid*) у Баварії (Німеччина) [118].

Проектна вартість розроблення і установлення – 3,44 млн євро, з яких 1,85 млн євро забезпечує Європейське співтовариство (ЄС), яке зацікавлено в поліпшенні ефективності джерел поновлюваної енергії.

Гідрогенератор планують виготовити з котушками із ВТНП матеріалів, на які в *Zenergy* є патент і які дозволять виготовити гідрогенератор із ККД вище 98 %, що істотно перевищує ККД, який досягається в існуючих традиційних „теплих” гідрогенераторах. Генератор буде побудований компанією *Converteam* (колишня *ALSTOM Power Conversion*), використовуючи ВТНП котушку компанії *Trithor GmbH*, що є частиною *Zenergy*.

ВТНП генератор буде встановлений замість існуючого традиційного гідрогенератора. Подальше технічне обслуговування генератора бере на себе німецька компанія *KEMA*, Сілезький університет технологій і британська компанія *Vector Fields*. Підтримку охолодження буде здійснювати німецька компанія *Stirling*.

Успішна експлуатація ВТНП гідрогенератора в комерційній мережі буде сприяти заміні на нього всіх гідрогенераторів, що працюють в електромережі *E.ON Wasserkraft*.

На початку 2007 р. компанії *Zenergy Power* і *Converteam* уклали п'ятирічну угоду про спільне розроблення, виробництво і ринкове просування

ВТНП генераторів потужністю 8 МВт для потреб вітро- і гідроенергетики. За замовленням Міністерства торгівлі і промисловості Великобританії (*UK Department of Trade and Industry*) компанія *Zenergy Power*, спроектувала та виготовила дослідний зразок надпровідного синхронного генератора потужністю 8 МВт на напругу 6 кВ із прямим приводом від вітряної турбіни. Генератор був виготовлений із ВТНП проводу 1-го покоління, виробництва *Zenergy Power*.

Вітряні ВТНП генератори в порівнянні із традиційними мають істотно менші масогабаритні характеристики, високу стійкість до перевантажень, а також удвічі менші втрати. За оцінками *Zenergy Power*, вартість вітрогенератора за рахунок використання ВТНП може бути знижена з 3 до 1,6 млн дол. Зниження масогабаритних показників (діаметр ВТНП генератора – 3 м при масі 120 т, а діаметр традиційного генератора – 9 м при масі 450 т) дозволить здешевити вітроенергетичну установку потужністю 8 МВт у цілому з 6,7 до 3,2 млн дол.

Подібні результати очікують американські компанії *AMSC* і *TECO-Westinghouse Motor Company (TWMCo)*, що оголосили про об'єднання зусиль у галузі розроблення ВТНП генераторів великої потужності (10-мегаватного класу) для прибережних вітряних електростанцій [119]. Строки появи комерційних ВТНП синхронних генераторів потужністю 10 МВт вони оцінюють у 3–5 років.

*AMSC* розробляє генератор з прямим приводом на базі ВТНП проводів 2-го покоління. Відмінною рисою цього синхронного генератора є низька частота обертання (~ 11 об/хв) при високому крутильному моменті. Генератор розрахований на напругу 6 кВ. *AMSC* очікує, що ВТНП генератори прямого приводу для вітряних електростанцій будуть мати більш високий ККД при менших габаритах і вартості, у порівнянні із традиційними „теплыми” генераторами. За рахунок заміни мідних обмоток ротора на ВТНП і модифікації статора маса генератора може бути полегшена до 120 т, що у три рази менше, ніж для традиційних генераторів подібного класу. Порівняння з вітрогенератором компанії *Zenergy Power* на ВТНП проводах 1-го покоління показує, що використання ВТНП проводів другого покоління дає можливість на чверть збільшити потужність за тих же масогабаритних показників.

Варто також зауважити, що вітряна енергетична установка потужністю 10–12 МВт із традиційними „теплыми” генераторами являє собою циклопічну споруду: ротор діаметром близько 200 м змонтований на вежі висотою 250 м. Наявність значної маси на вершині вежі призведе до збільшення вартості металоконструкцій і негативно позначиться на вітростійкості. Крім того, монтаж генератора масою в кілька сотень тонн на висоті більше 200 м є складним інженерним завданням. Порівняно легкі ВТНП генератори здатні значно спростити і

здешевити конструкцію вітроенергетичних установок великої потужності.

У зв'язку з боротьбою за якість електроенергії і прийняттям штрафних санкцій проти споживачів, чиє навантаження погіршує якість електроенергії в мережі, стає усе більше актуальним застосування різного роду компенсуючих пристроїв, одним із яких є динамічний синхронний компенсатор (ДСК) – синхронний двигун, що працює без навантаження на вал, тобто на холостому ходу. Він генерує або споживає реактивну потужність у динамічному режимі залежно від величини напруги в електричній мережі. Пристрої цього типу у традиційному (резистивному) виконанні не потребують високих експлуатаційних затрат і досить давно використовуються генеруючими компаніями.

Основними недоліками цих ДСК є високі масогабаритні показники і необхідність трикратного збільшення струму в обмотці збудження (рис. 3.12) для реалізації номінальної потужності. Різка зміна струму збудження за короткі проміжки часу призводить до надмірного нагрівання обмоток, що негативно позначається на їхній ізоляції.

Поява ВТНП надихнула розроблювачів ДСК на їхнє використання в обмотках збудження. ВТНП стрічка у порівнянні з мідним провідником має таку ж струмонесучу здатність при суттєво меншому поперечному перерізі, що дозволяє збільшити густину струму. Таким чином, при незмінних габаритах ротора обмотка збудження буде займати менше місця, що призведе до збільшення прохідного перетину для магнітного потоку і дозволить у кілька разів зменшити необхідну величину струму збудження. Завдяки низьким втратам у ВТНП стрічці ККД динамічного синхронного компенсатора з надпровідними обмотками (НПДСК) на 1 % вище, ніж у традиційних аналогах. Таким чином, використання НПДСК сприяє збільшенню пропускної здатності мережі, характеризується низьким внеском у загальні втрати електричної мережі, а стабільна температура обмоток збудження сприяє підвищенню його надійності і продовженню нормативного терміну служби.

Компактні розміри і відносно невисока вартість НПДСК роблять його

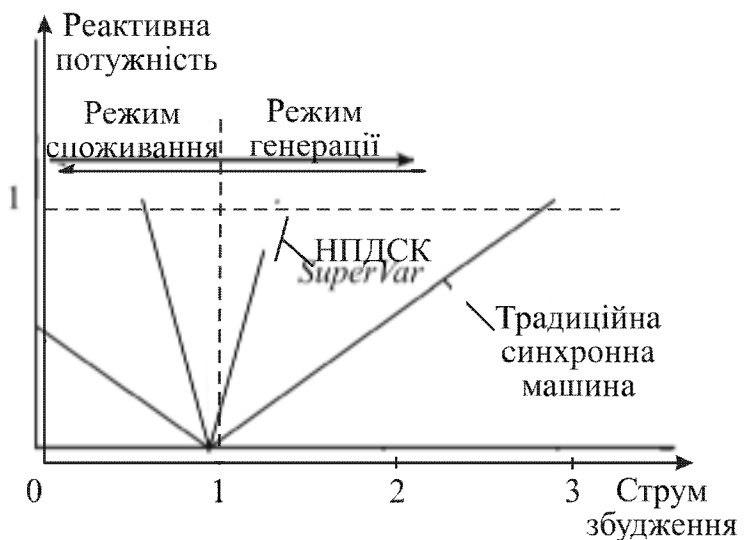


Рисунок 3.12 – Зовнішні характеристики резистивного ДСК та НПДСК – SuperVAR (у відносних одиницях)

економічно ефективним засобом компенсації реактивної потужності. НПДСК має моноблочну конструкцію (рис. 3.13), він легко піддається транспортуванню і розміщенню на території розподільної підстанції. До того ж, НПДСК відрізняється високою стійкістю до короточасних коротких замикань та здатний витримувати двократні перевантаження при зниженні напруги в мережі.

Корпорація *AMSC*, яка є світовим лідером у розробленні і виробництві виробів, що використовують надпровідні проводи для енергосистем, поставила перший динамічний синхронний компенсатор *SuperVAR* електроенергетичній компанії *Tennessee Valley Authority (TVA)* (США) у листопаді 2003 р. Перший прототип НПДСК із номінальною реактивною потужністю  $\pm 8$  Мвар напругою 13,8 кВ був випробуваний протягом 2004–2005 рр. у мережі електричної компанії *TVA*, що живить дугову піч на сталеплавильному заводі у м. *Gallatin* [120, 121]. Метою цих випробувань була не тільки демонстрація нового пристрою, але і перевірка його робочих характеристик на практиці.

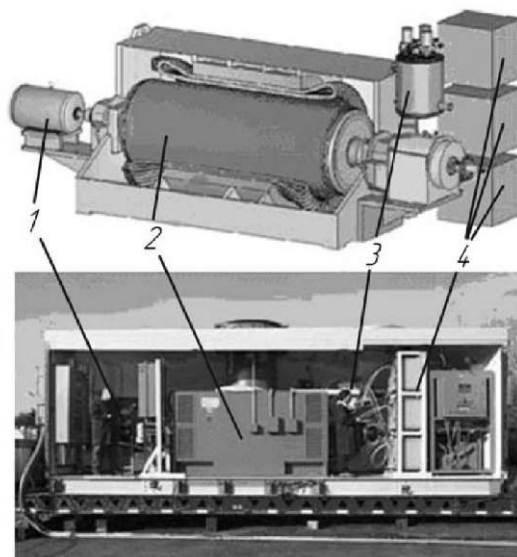


Рисунок 3.13 – НПДСК *SuperVAR*:

- 1 – пусковий електродвигун;
- 2 – синхронний компенсатор;
- 3 – кріокулер;
- 4 – компресори кріокулера

У цей час НПДСК *SuperVAR* успішно працює в одній з електричних мереж штату Огайо і є важливим етапом упровадження ВТНП технологій для комерційного використання в системах передачі електроенергії.

Технічні характеристики промислового варіанта НПДСК наведені в табл. 3.7. Компанія *TVA* замовила два промислових НПДСК потужністю 12 МВА, які були виготовлені у 2007 р. і встановлені в енергомережі *TVA*.

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики НПДСК

Параметр	Значення
Номінальна потужність, МВА	$\pm 12$ (промисловий варіант)
Лінійна напруга, кВ	13,8
Діапазон робочих температур навколишнього середовища, °С	від $-30$ до $+50$
Втрати	1,5 % від номіналу при 12 МВА, разом із потужністю зовнішнього джерела (пускового двигуна) – 50 кВт, 480 В

У 2005 р. у ВНДІ Електромаш (Росія) був розроблений проект синхронного ВТНП генератора на 200 МВт на напругу 220 кВ [7]. Крім того, фахівцями

Інституту електрофізики і електроенергетики Російської академії наук (ІЕЕ РАН) був розроблений проект високовольтного синхронного генератора з використанням високотемпературної надпровідності для вітроенергетичної установки, що розташована на платформі в океані. Використання ВТНП та інших нових матеріалів у цьому генераторі дозволяє забезпечити зменшення масогабаритних показників, підвищення надійності, зниження втрат та екологічну безпеку машини, і, як наслідок, вітроенергетичної установки в цілому. Розроблюваний генератор потужністю 500 кВт на напругу 10,5 кВ без проміжного трансформатора з'єднується з тиристорним перетворювачем, випрямляючим струм, що генерується. Кріогенне устаткування (кріоохолоджувач за циклом Гіффорда–Макмагона) займає місце трансформатора в опорній вежі вітроустановки, там же розташована перетворювальна установка. У коло „генератор–перетворювач” можуть бути включені накопичувачі енергії (у тому числі надпровідні) і НП обмежувачі струму. Енергія передається споживачу по кабелю постійного струму через випрямну і інверторну підстанції. Кабель прокладений по дну моря і з'єднує морську платформу зі споживачем на березі. Планується використання ВТНП з'єднань Ві-2212, Ві-2223, У-123 для обмоток статора і ротора генератора, електротехнічної та аморфної сталей для магнітної системи та електричної ізоляції, стійкої до термоцикування і кріогенних температур. Ротор і статор ЕМ розміщені в єдиному кріостаті. Високовольтна обмотка статора виконана з котушок сідлоподібної форми. Автори розробки провели комплекс теоретичних досліджень електромагнітних і теплових процесів у синхронних ЕМ з рідкоземельними постійними магнітами і ВТНП масивами:

- ▼ досліджували розподіл електромагнітних полів, створюваних сідлоподібними і трековими обмотками;

- ▼ провели дослідження на макетах і моделях з метою перевірки теоретичних положень;

- ▼ виготовили модельні синхронні машини дискового типу з рідкоземельними постійними магнітами і ВТНП масивами та стенди для їхніх випробувань;

- ▼ провели дослідження режимів роботи виготовлених модельних пристроїв.

На основі проведених робіт і була розроблена концепція побудови високовольтного синхронного НП генератора для вітроенергетичної установки, розташованої на морській платформі.

Ця концепція побудови НП генератора передбачає рішення в іншій площині порівняно з найбільш поширеними схемами надпровідних ЕМ, зображе-

ними на рис. 3.1. І хоча реалізація конструктивних схем НП генераторів, що проектуються, мають на перший погляд менший коефіцієнт використання, тим не менш при цьому створюються умови для ефективного впровадження ВТНП матеріалів

Американська компанія *General Electric* докладає великих зусиль до розроблення і створення потужних ВТНП генераторів і електродвигунів для потреб флоту. Уніполярні ЕМ з ВТНП обмотками підмагнічування мають цілу низку переваг порівняно з традиційними ЕМ, особливо при високій частоті обертання. В рамках проекту Дослідницької лабораторії військово-повітряних сил США *AFRL (Air Force Research Lab)* компанія *General Electric* розробила уніполярний генератор з ВТНП обмотками підмагнічування (рис.3.14) потужністю 5 МВт і частотою обертання 16000 об/хв для наступного використання в потужних авіаційних енергетичних установках (табл. 3.8) [122]. На той час вже був виготовлений і успішно випробуваний демонстраційний зразок уніполярного генератора потужністю 1 МВт.

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики високошвидкісного уніполярного синхронного генератора, розробленого *AFRL*.

Параметр	Значення
Номінальна потужність, МВт	5
Частота обертання, об/хв	16000
Напруга, кВ	3
Кількість фаз	6
Кількість полюсів	6
Частота, Гц	800
ККД (при повному навантаженні), %	98
Довжина ВТНП стрічки, м	600
Тип ВТНП	BSCCO
Критичний струм у власному полі (при 77 К), А	125
Синхронний опір, в.о.	0,7
Амплітуда магнітної індукції в зазорі, Тл	2
Кількість ампер-витків обмотки збудження	40000
Діаметр, см	50
Довжина, см	50
Маса кріоохолоджувача, кг	40,9
Маса двигуна, кг	572,6
Маса двигуна з кріоохолоджувачем, кг	613,5

На підставі отриманого в ході робіт за проектом *AFRL* досвіду перед *General Electric* була поставлена задача розроблення ВТНП уніполярних ЕМ для потреб флоту – основних і допоміжних електродвигунів, гребних електродвигунів, різних допоміжних електродвигунів. Компанією *General Electric* було розроблено чотири демонстраційних зразка ЕМ з ВТНП обмотками підмагнічування для флоту, серед них основний генератор потужністю 36 МВт

(3600 об/хв) і гребний електродвигун потужністю 36 МВт (120 об/хв) [122, 123]. Також були розроблені допоміжні генератор (7000 об/хв) і електродвигун (132 об/хв), обидва потужністю 4 МВт.

На рис. 3.14 подана схема ВТНП уніполярного генератора, що складається з ВТНП обмотки підмагнічування постійного струму, сталевого ротора і мідного статора. Параметри обмотки статора і його залізного ярма оптимізовані з метою отримання найкращих характеристик. Полюси ротора достатньо сильно виступають і на різних половинах ротора зсунуті один до одного на половину полюсного ділення. Це дає можливість за допомогою ВТНП котушки підмагнічування створювати в нерухомих котушках статора трифазний змінний струм. ВТНП обмотка підмагнічування працює при температурі 30 К, у замкненому циклі охолодження від кріокулера. Використання невеликої одиночної ВТНП котушки знижує вимоги до системи охолодження і скорочує вартість пристрою. В табл. 3.9 наведені основні технічні параметри для усіх чотирьох розроблених пристроїв. Для порівняння, звичайний уніполярний генератор потужністю 25 МВт (3600 об/хв) має діаметр біля 3 м, довжину 5 м при вазі у 57 т. Найбільш ефективно ЕМ з ВТНП обмотками підмагнічування працюють при високій частоті обертання.

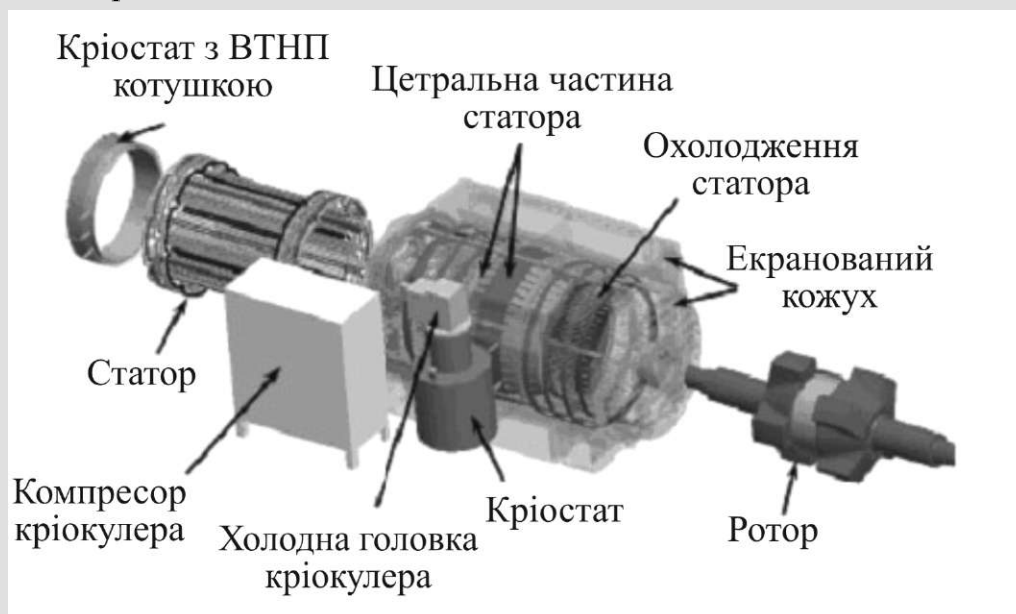


Рисунок 3.14 – Генератор з ВТНП обмотками підмагнічування

На підставі проведених досліджень компанія *General Electric* прийшла до висновку, що уніполярні ЕМ з ВТНП обмотками підмагнічування при високій частоті обертання (3600 об/хв і більше) практично не поступаються значно більш складним пристроям з ВТНП статором і ротором. Параметри тихохідних гребних електродвигунів з ВТНП обмотками підмагнічування при частотах обертання біля 120 об/хв будуть гірше, ніж для ЕМ з повністю надпровідним

статором і ротором. Однак ціна пристроїв з ВТНП обмотками підмагнічування, буде значно нижче, що може стати вирішальним аргументом на їх користь.

Таблиця 3.9 – Основні параметри електричних машин з ВТНП обмотками підмагнічування

Параметр	Пристрій			
	Основний генератор	Допоміжний генератор	Гребний електро-двигун	Гребний електро-двигун в гондолі
Потужність, МВт	36	4	36	4
Частота обертання, об/хв	3600	7000	120	132
Номинальна напруга, кВ	6,6	6,6	3,8	4,16
Число фаз	3	6	3	3
Число полюсів	6	6	18	48
Робоча частота, Гц	180	350	18	52,8
ККД при повному навантаженні, %	>98	>98	>95	>95
Витрата ВТНП стрічки Ві-2223. км	6	1,1	11	5
$I_k$ при 77 К у власному полі, А	150	150	150	150
Діаметр, см	110	90	290	290
Довжина, см	200	80	400	500
Споживана потужність кріокулера, кВт	14,4	7,2	14,4	7,2
Маса кріокулера, кг	300	120	300	150
Сумарна вага пристрою, т	12	1,3	100	11

У той же час при створенні НП генераторів залишається багато невирішених завдань. Що стосується оптимізації параметрів обмотувального проводу, перша і головна проблема – втрати на змінному струмі, які знижують ефективність генераторів на великих швидкостях обертання (у першу чергу це стосується військової техніки) і перешкоджають створенню повністю надпровідного генератора. Друга проблема – збільшення транспортних струмів. На цей час вдалось досягти густини критичного струму в НП обмотці ротора  $400 \text{ А/мм}^2$  [103]. Третя проблема – стабілізація системи при переході надпровідника у нормальний стан. Ключ до вирішення цих проблем криється в розвитку ефективних, надійних і недорогих методів отримання ВТНП проводів 2-го покоління. Якщо вірити оптимістичним прогнозам, ми стоїмо на порозі великого майбутнього силових НП машин, у тому числі і генераторів змінного струму. Наприклад, голова IGC (*Intermagnetics General Corporation*, дочірньою компанією якої є *SuperPower, inc.*) Карл Рознер упевнений, що експлуатація НП генераторів високої потужності ( $\sim 1 \text{ ГВт}$ ) стане реальністю близько 2020 р. для НТНП, а у 2030 р. варто очікувати створення генераторів на ВТНП [124].

### 3.2. Стан розроблень надпровідних електродвигунів

Незабаром після відкриття високотемпературних надпровідників корпорація *Rockwell Automation / Reliance Electric* (США) почала проводити перші роботи з дослідження, розроблення і впровадження ВТНП у промислові електродвигуни.

Основні проектно-конструкторські роботи, початі в 1987 р., були спрямовані на дослідження технічного здійснення використання цих нових матеріалів в ефективних електродвигунах великої потужності. Як найбільш відповідні були обрані синхронні двигуни з НП обмоткою збудження. Статорна обмотка цих електродвигунів мідна, а обмотка збудження ротора надпровідна. Передбачуване застосування таких двигунів полягає у створенні приводів великих, потужністю більше 1000 к.с. (740 кВт), промислових пристроїв, таких як компресори, насоси і вентилятори з постійним режимом роботи та мінімальними вимогами до обслуговування. Двигуни із ВТНП обмоткою збудження повинні ефективно працювати у приводах з регульованою швидкістю обертання з метою одержання тих переваг з енергозбереження, які дає частотне регулювання.

У 1994 р. був утворений консорціум, який почав працювати над багаторічним проектом зі створення двигунів із ВТНП обмотками, що є частиною програми *SPI*, і виконувався під керівництвом Міністерства енергетики США. Проект складався з двох етапів і був спрямований на розроблення, виготовлення та випробування синхронних двигунів з немагнітним осердям з використанням високотемпературних надпровідників. Корпорація *Rockwell Automation / Reliance Electric* у рамках першого етапу проекту розробила і в 1996 р. випробувала найбільш великий на той час у світі синхронний двигун із ВТНП обмотками потужністю 200 к.с. Другий етап проекту, що почався в 1996 р., включав створення і апробацію двигунів із ВТНП обмотками потужністю від 1000 до 5000 к.с. [125, 126].

Метою створення ВТНП двигуна потужністю 1000 к.с. (740 кВт) було порівняння його із традиційним двигуном з тією ж потужністю за критеріями ефективності і габаритів. Демонстраційний двигун потужністю 1000 к.с. мав наступні особливості:

- замкнена кріогенна зріджувальна система (використовувалася вперше);
- двохпоточний вузол введення кріогенної рідини;
- безпосереднє охолодження ВТНП обмотки;
- внутрішня композитна труба для передачі крутного моменту.

До 2000 р. група фахівців, очолювана компанією *Rockwell Automation /*

*Reliance Electric*, розробила і виготовила такий електродвигун, найбільший на той час синхронний ВТНП двигун у світі.

Головні конструктивні елементи цього двигуна подані на рис. 3.15. Надпровідні обмотки 3 змонтовані на роторі і охолоджуються кріогенним газом або рідиною, що циркулює крізь ротор через обертовий вузол вводу холодоагенту 6. Внутрішній холодний об'єм кріостата ротора ізолюваний від навколишнього середовища вакуумним проміжком 18. Крутильний момент передається за допомогою силової труби 17, що з'єднує холодний об'єм з валом двигуна 16.

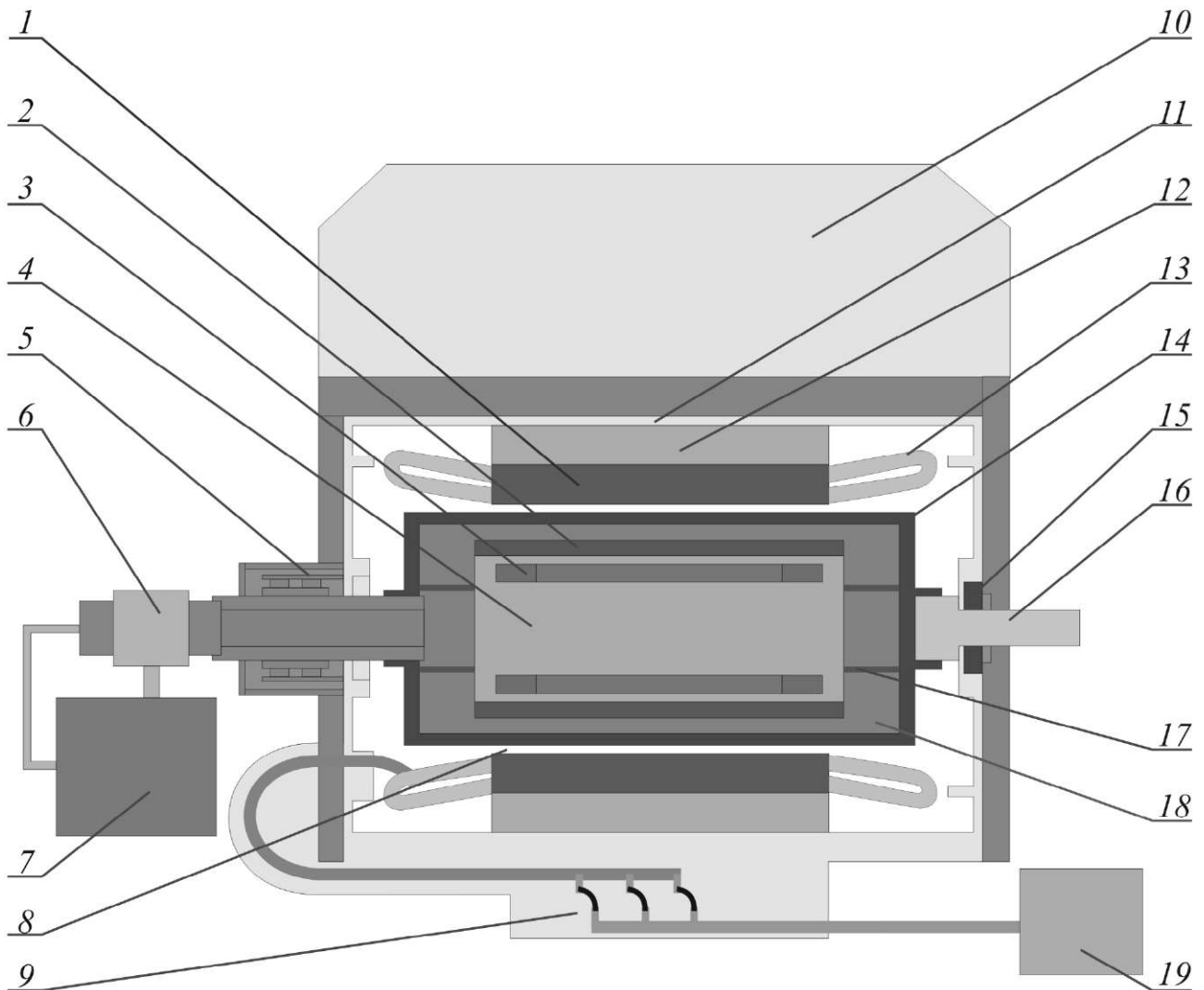


Рисунок 3.15 – Конструктивна схема ВТНП двигуна потужністю 1000 к.с.:

1 – кріплення обмотки статора, винесеної в зазор; 2 – захисний екран від змінного поля; 3 – НП котушки; 4 – опорна конструкція для котушок; 5 – збудник; 6 – вузол уведення кріогенної рідини; 7 – система охолодження; 8 – повітряний зазор; 9 – вивідна коробка; 10 – теплообмінник статора; 11 – корпус двигуна; 12 – шихтоване осердя статора; 13 – мідна обмотка статора; 14 – вакуумна оболонка; 15 – підшипник; 16 – приводний вал; 17 – силова труба для передачі крутильного моменту; 18 – вакуумні порожнини; 19 – інвертор

Обмотка якоря 13 виконана мідною і винесена в зазор, фіксується вона за допомогою немагнітного і непровідного кріплення 1 усередині шихтованого

осердя статора 12, що забезпечує замикання магнітного потоку, створеного ВТНП котушками та обмоткою якоря.

ВТНП обмотка збудження 3 розташована у середині ротора – обертового кріостата. Котушки із ВТНП обмоткою збудження закріплені на опорній конструкції і захищені від теплоприпливів у радіальному напрямку та з торців. Цей захист забезпечується: у радіальному напрямку за допомогою зовнішнього циліндричного екрана з вакуумною порожниною 18 і шарувато-вакуумною ізоляцією; з торців – вакуумними проставками із шарувато-вакуумною ізоляцією всередині. Цим досягається обмеження теплового навантаження до 60 Вт при температурі всередині ротора 30 К. Циліндричний екран 2 захищає ВТНП котушки від змінних складових магнітного поля статора, обумовлених вищими гармоніками, несиметрією фаз і перехідними процесами. При роботі зовнішня оболонка циліндричного вакуумного екрана залишається теплою, а холодна маса усередині ротора-кріостата термічно стискується. Різні температурні переміщення сприймаються парою діафрагм, установлених на кінцях роторного кріостата, що також служить частиною вакуумної рубашки ротора 14. Постійний струм ВТНП обмотки збудження подається або через безщітковий збудник 5, або через контактні кільця, змонтовані на кінці вала, протилежному силовій муфті.

Композитна труба для передачі крутільного моменту 17 підтримує холодну масу усередині роторного кріостата і передає крутільний момент на ведучий кінець вала. Використання композита значною мірою зменшує паразитні теплоприпливи в ротор, а також поліпшує розподіл крутільного моменту між ведучим і неприводним кінцями вала.

Кріостат ротора оснащений кріогенними датчиками для контролю роботи. Сигнали передаються від обертового ротора на стаціонарне устаткування через оптичну телеметричну систему, а потім – на блок спостереження і аналізу.

Вихідні розрахункові параметри і характеристики спроектованого ВТНП двигуна продані в табл. 3.10. ККД двигуна включає і витрати енергії на кріогенну зріджувальну систему.

Робоче середовище обмотки збудження орієнтоване на досягнутий рівень параметрів високотемпературних надпровідників і знаходиться при температурі 33 К з можливістю роботи в майбутньому при більш високих температурах. Замкнена кріогенна система Брайтона забезпечує охолодження ВТНП обмоток газоподібним гелієм з робочою температурою 33 К. Усі попередні розробки використовували відкриту (з однократним використанням холодоагенту) систему

охолодження. Комерційно життєздатні ВТНП двигуни будуть використовувати замкнену систему охолодження. Таким чином, дана особливість спроектованого двигуна серйозно сприятиме підвищенню його конкурентноздатності.

Таблиця 3.10 – Параметри конструкції ВТНП електродвигуна потужністю 1000 к.с. (740 кВт)

Параметр	Величина
Частота обертання, об/хв	1800
Число полюсів	4
Номінальна напруга, В	4160
Номінальний струм якоря, А	104
Коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ )	1,0
Проектний ККД електродвигуна, %	97,1
Зовнішній діаметр ротора, м	0,4
Зовнішній діаметр статора, м	0,686
Довжина пазової частини статора, м	1,22
Робоча температура обмотки збудження, К	33 К
Струм збудження, А	134
Максимальна індукція в зазорі, Тл	1,5

Чотири котушки з ВТНП обмотками збудження намотані стрічковим надпровідником BSCCO. Кожна обмотка складається з набору котушок у формі рейстрек, які закріплені в каркасі з алюмінієвого сплаву. Загальна довжина ВТНП проводу для обмотки збудження становить приблизно 18 км.

Захисний екран від змінного магнітного поля охоплює ВТНП котушки обмотки збудження. Він прикріплений на обох кінцях до фланців холодної зони для гасіння коливань крутильного моменту на випадок відмови.

Обертний кріогенний передавальний вузол є ще одним основним елементом системи ВТНП електродвигуна. Він з'єднує гелієвий зріджувач із роторним кріостатом ВТНП двигуна і забезпечує ввід та вивід газоподібного гелію усередину кріостата та з нього. Для вивчення динамічних і теплових характеристик передавального вузла було проведено інтенсивне випробування його прототипу. Була також розроблена альтернативна конструкція передавального вузла, що суттєво зменшила складність його конструкції і дала підстави очікувати підвищення надійності.

Статор ВТНП двигуна потужністю 1000 к.с. має 48 пазів, у яких розміщена обмотка двошарового типу, виготовлена з мідних провідників, що працюють при температурі навколишнього середовища. Джути твістерованого проводу Литця використовуються для зменшення втрат на вихрові струми. Котушки підтримуються ламінованими опорами з немагнітного матеріалу, які розміщені усередині шихтованого сталевго осердя. Перевага проекту полягає в наявності

сильного магнітного поля, створюваного обмоткою збудження ВТНП ротора, внаслідок чого підвищується коефіцієнт використання двигуна і зменшуються його габарити. Немагнітна частина осердя також сприяє зменшенню втрат завдяки тому, що сильне магнітне поле обмотки збудження не насичує шихтовану сталь.

Якірна обмотка і каркас охолоджуються водою за допомогою розташованих на кінцях охолодних труб. Це сприяє поліпшенню охолодження і дозволяє істотно підвищити лінійний струм. Коефіцієнт використання електродвигуна підвищується ще більше, що також обумовлює зменшення габаритів електродвигуна. У той же час додаткова потужність, необхідна для водяного охолодження статора, набагато менше тієї, котра була б при охолодженні статора повітрям, що також підвищує ефективність двигуна. Остаточний складений каркас двигуна потужністю 1000 к.с. разом із установленим ротором поданий на рис. 3.16.

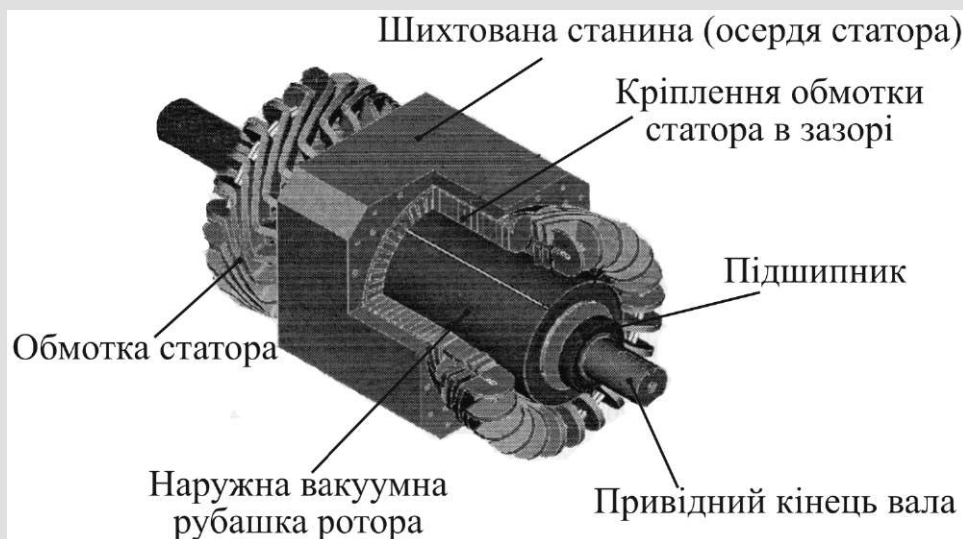


Рисунок 3.16 – Ізометрична проекція електродвигуна потужністю 1000 к.с., розробленого корпорацією *Rockwell Automation / Reliance Electric*

У 2004 р. корпорація *Rockwell Automation / Reliance Electric* успішно продемонструвала лабораторний зразок синхронного ВТНП двигуна потужністю 1600 к.с., у якому були втілені основні конструктивні принципи, апробовані на двигуні 1000 к.с.

Великі пошукові роботи зі створення ВТНП двигунів для судових систем руху проводяться в ряді розвинених країн світу.

У 2005 р. японський науково-промисловий консорціум, учасників якого подано в табл. 3.11, розробив перший у світі ВТНП двигун практичного рівня на базі вісмутової кераміки (рис. 3.17) і успішно завершив виготовлення суднової рушійної системи із цим двигуном у вигляді гондоли із гвинтом (рис. 3.18) [127–131].

Гондолу з ВТНП двигуном встановлюють зовні корабля, що дозволяє ефективніше використати внутрішній простір судна, зменшує бортовий шум і підвищує корабельну маневреність. У тому випадку, якщо використовуються традиційні „теплі” двигуни великої потужності, зовнішній діаметр гондолої стає занадто великим і практичне використання її ускладнено.

Таблиця 3.11 – Учасники японського науково-промислового консорціуму зі створення суднової рушійної системи із ВТНП двигуном на базі вісмутової кераміки

Організація	Пайова участь
<i>Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.</i>	Керування проектом
<i>Fuji Electric Systems Co., Ltd.</i>	Розробка і виробництво електричної системи
<i>Hitachi, Ltd.</i>	Розробка електричної системи
<i>Nakashima Propeller Co., Ltd.</i>	Розробка і виробництво гребного гвинта
<i>Niigata Power Systems Co., Ltd.</i>	Розробка і виробництво механічної частини суднової рушійної системи
<i>Sumitomo Electric Industries, Ltd.</i>	Розробка і виробництво ВТНП котушки
<i>Taiyo Nippon Sanso Corporation</i>	Розробка і виробництво системи охолодження
<i>University of Fukui</i>	Проектування електромагнітних кіл

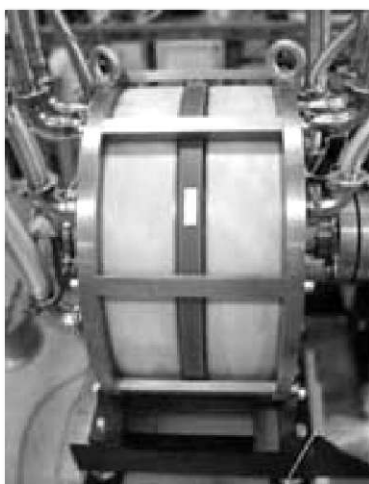


Рисунок 3.17 – ВТНП двигун



*a*



*б*

Рисунок 3.18 – Суднова система руху з ВТНП двигуном:  
*a* – зовнішній вигляд гондолої; *б* – демонстраційне випробування в резервуарі з водою

*Технічні характеристики ВТНП двигуна і рушійної системи:*

діаметр двигуна – 0,6 м;

довжина двигуна – 0,6 м;

потужність на валу – 12,5 кВт (короткочасно – 62,5 кВт);

частота обертання – 100 об/хв (при температурі рідкого азоту 66 К);

діаметр рушійної системи – 0,8 м;

довжина рушійної системи – 2 м;  
діаметр гребного гвинта – 1 м;  
швидкість обертання гребного гвинта плавно регулюється в діапазоні від 0 до 100 об/хв із можливістю реверса.

*Достойнства ВТНП двигуна:*

1. Охолодження дешевим, легким в експлуатації рідким азотом.
2. Менша вага і габарити у порівнянні із традиційними „теплыми” двигунами індукторного типу (двигун потужністю 5000 кВт має у п’ять разів меншу вагу та у 10 разів менший об’єм).
3. Використання ВТНП проводу на базі вісмутової кераміки, що може бути виготовлений довжиною кілька кілометрів за допомогою прогресивного технологічного процесу випалу *CT-OP* компанії *Sumitomo*.
4. Дуже низький рівень шуму.
5. Мале розсіювання магнітного потоку.
6. Температура поверхні двигуна як і у любого традиційного – кімнатна, отже двигун може використовуватися у будь-якому місці.
7. Блокова конструкція НП котушки припускає вільне збільшення потужності двигуна.

Японський консорціум розробив ще два ВТНП двигуни, характеристики яких наведені у табл. 3.12. Обидва вони мають однакові вихідні параметри.

Обидва ВТНП двигуна працюють при температурі рідкого азоту. Відносно висока робоча температура дозволяє зменшити товщину теплозахисного екрана і виготовити ВТНП двигун невеликих розмірів, який також забезпечить більш високу надійність і довговічність.

Використання рідкого азоту приводить до значного зниження вартості ВТНП двигуна, однак критичний струм у надпровідному проводі при температурі рідкого азоту значно нижче, ніж при температурах рідкого гелію або рідкого неону. Зниження критичного струму призводить до зниження магнітного поля в обмотці і, відповідно, до зниження вихідної потужності ВТНП двигуна.

З метою збільшення магнітного потоку при зниженні критичного струму при роботі з рідким азотом у якості холодоагенту японські інженери-дослідники з компанії *Sumitomo* розробили конструкцію ВТНП обмотки, що містить сталевий магнітопровід (осердя), названий „*flux collector*” (*FCL*) (акумулятор магнітного потоку), що дозволило збільшити потужність ВТНП двигуна до практично прийняттого рівня.

Таблиця 3.12 – Характеристики ВТНП двигунів, які розробив японський консорціум

Параметри	Синхронний двигун з аксіальним зазором	Синхронний двигун індукторного типу (повністю НП двигун)
Холодоагент	рідкий азот	рідкий азот
Обмотка збудження	ВТНП	ВТНП
Обмотка якоря	мідна	ВТНП
У нерухомій частині (статорі) розташовані	обмотка збудження	обмотка збудження, обмотка якоря
В обертовій частині (роторі) розташовані	мідна обмотка якоря	індуктор
Сталевий магнітопровід (осердя) проходить	через обмотку збудження	через обмотку якоря, обмотку збудження і індуктор
Струмознімні контактні кільця	установлена 1 пара	відсутні
Обертові з'єднання для подачі холодоагенту	відсутні	відсутні

Обидва двигуни, технічні характеристики яких подані в табл. 3.12, мають сталеве осердя *FCL*, оскільки величини критичного струму ВТНП проводу недостатньо для того, щоб за відсутності магнітопроводу створити досить сильне магнітне поле. Спрощена схема повністю надпровідного двигуна зображена на рис. 3.19. Особливістю цього повністю надпровідного двигуна є відсутність обертової ВТНП обмотки, що спрощує підведення холодоагенту через виключення обертового з'єднання.

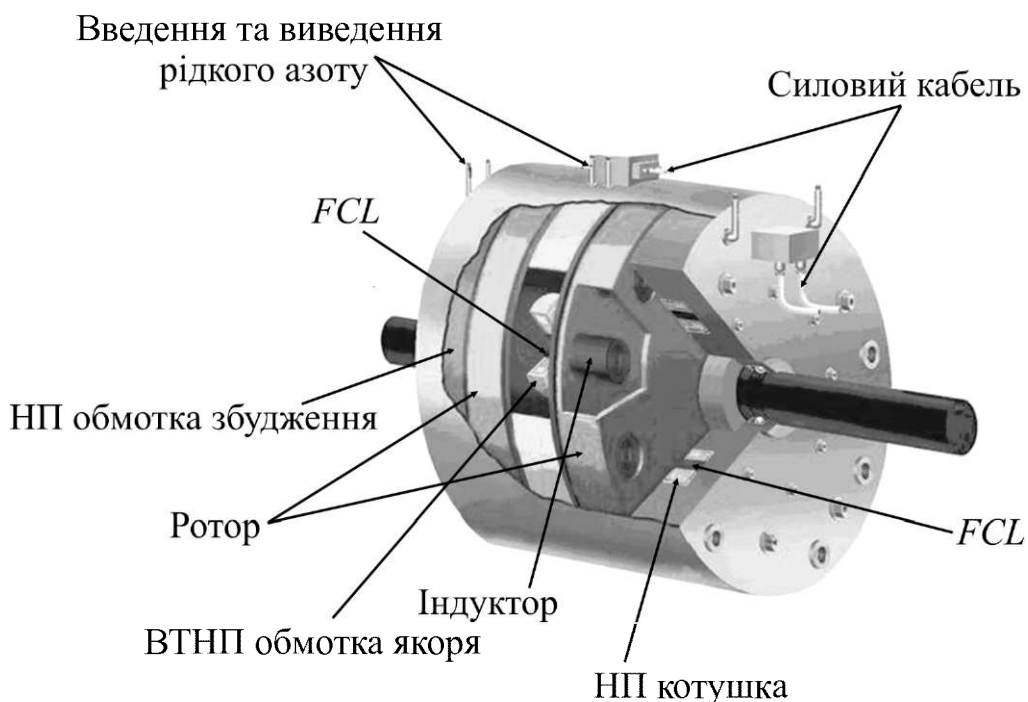


Рисунок 3.19 – Спрощена схема повністю надпровідного двигуна індукторного типу

Реверсивний ВТНП двигун потужністю 800 кВт знаходиться у стадії виготовлення.

Компанія *Sumitomo* виготовила декілька типів надпровідних обмоток. Нижче наведений опис обмотки збудження, яка використовується в синхронному двигуні з аксіальним зазором. Інші обмотки, що використовуються в синхронних двигунах індукторного типу, мають практично таку ж структуру.

Обмотка збудження складається з 16 соленоїдних котушок, розташованих попарно одна напроти одної, які формують 8 полюсів у двигуні (рис. 3.19). Кожна соленоїдна котушка (рис. 3.20) виконана накладенням у стек п'яти дводискових котушок, у яких 2 котушки у формі диска з'єднані внутрішнім витком, створюючи одну безперервну котушку. Два струмовводи розташовані по краях соленоїдної котушки. У них виділяється тепло, досить невелике, якщо котушки з'єднані послідовно. У табл. 3.13 наведені технічні характеристики дводискових котушок і соленоїдної, сформованої накладанням у стек дводискових котушок.

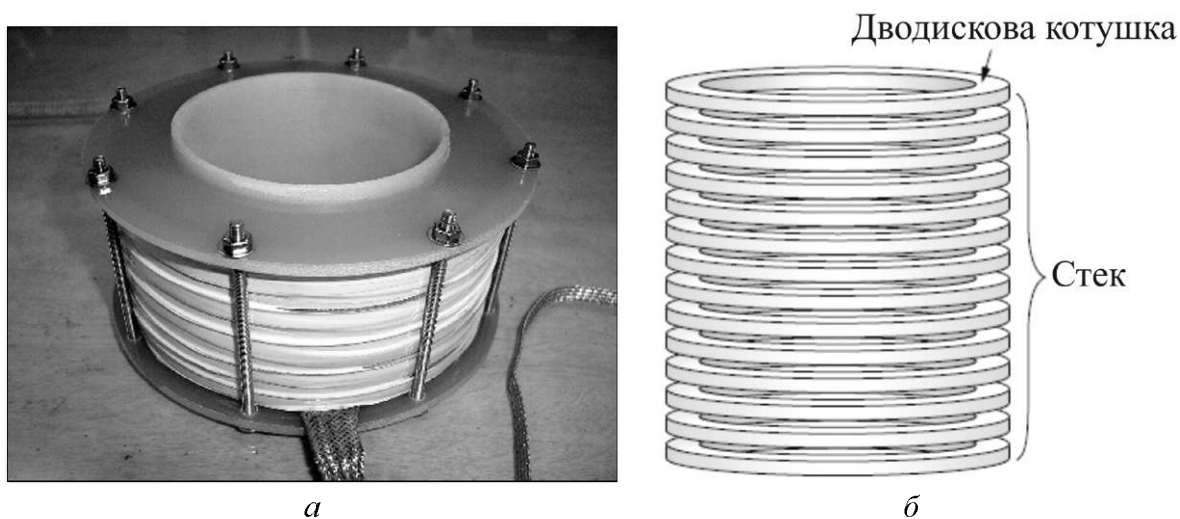


Рисунок 3.20 – Соленоїдна ВТНП котушка виробництва *Sumitomo*:  
 а – зовнішній вигляд; б – конструкція

Таблиця 3.13 – Технічні характеристики дводискової і соленоїдної котушок збудження

Параметр	Дводискова котушка	Соленоїдна котушка
Внутрішній діаметр, мм	136	120
Зовнішній діаметр, мм	155	160
Висота, мм	9	54
Кількість витків	66	330
Кількість дводискових котушок у стеці	-	5
Номінальний струм збудження, А	-	25

Котушки намотані ВТНП стрічкою розміром  $4,3 \times 0,22 \text{ мм}^2$ . Критичні характеристики ВТНП котушки наведені на рис. 3.21.

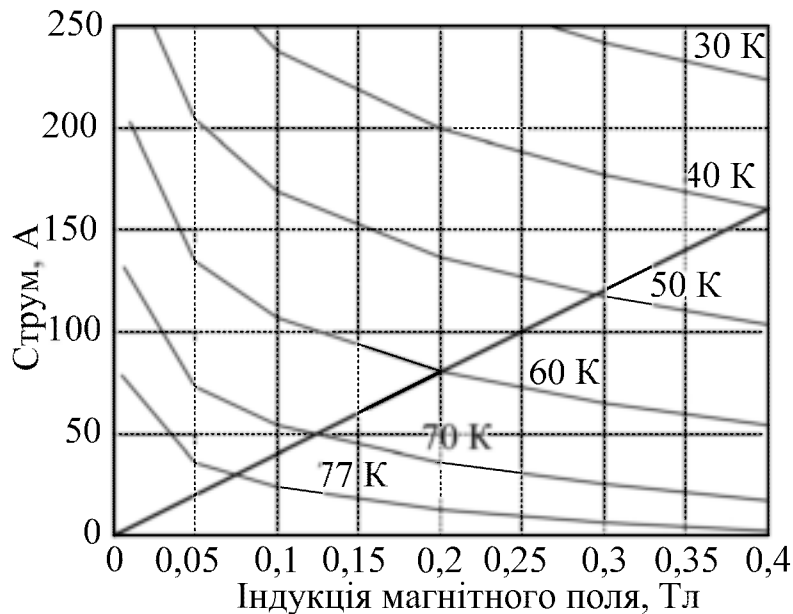


Рисунок 3.21 – Критичні характеристики ВТНП котушки та лінія навантаження

З 2006 р. дослідна група концерну, показаного в табл. 3.11, розробляє синхронний ВТНП двигун потужністю 400 кВт з постійними магнітами і якорем з ВТНП обмоткою, яка охолоджується до температури близько 68 К за допомогою замкненої системи охолодження на рідкому азоті [131, 132].

На обертовому валу прикріплені постійні магніти. ВТНП обмотка закріплена і нерухома, тому ВТНП двигун з постійними магнітами не потребує рухомих з'єднань для циркуляції холодоагенту (рис. 3.22).

Конструкція двигуна містить сталеве осердя *FCL*, що дозволяє збільшити потужність ВТНП двигуна.

ВТНП обмотка якоря виконана трифазною, по дві котушки на кожен фазу. Кожна котушка виконана з надпровідного проводу *DI-BSCCO* виробництва *Sumitomo*, який має більш високу величину критичного струму в порівнянні із *BSCCO* проводами, що виготовляються іншими компаніями. При температурі 77 К у власному полі критичний струм  $I_k$  становить більше 200 А у стрічці шириною 4 мм.

Для того щоб оцінити кількість тепла, що виділяється у ВТНП обмотці через втрати на змінному струмі, співробітники компанії *Sumitomo* провели калориметричне дослідження в рідкому азоті, результати якого були використані при проектуванні системи охолодження ВТНП двигуна з постійними магнітами. Величина ж витрат на змінному струмі в загальному балансі виявилась прийнятною для реального проектування.

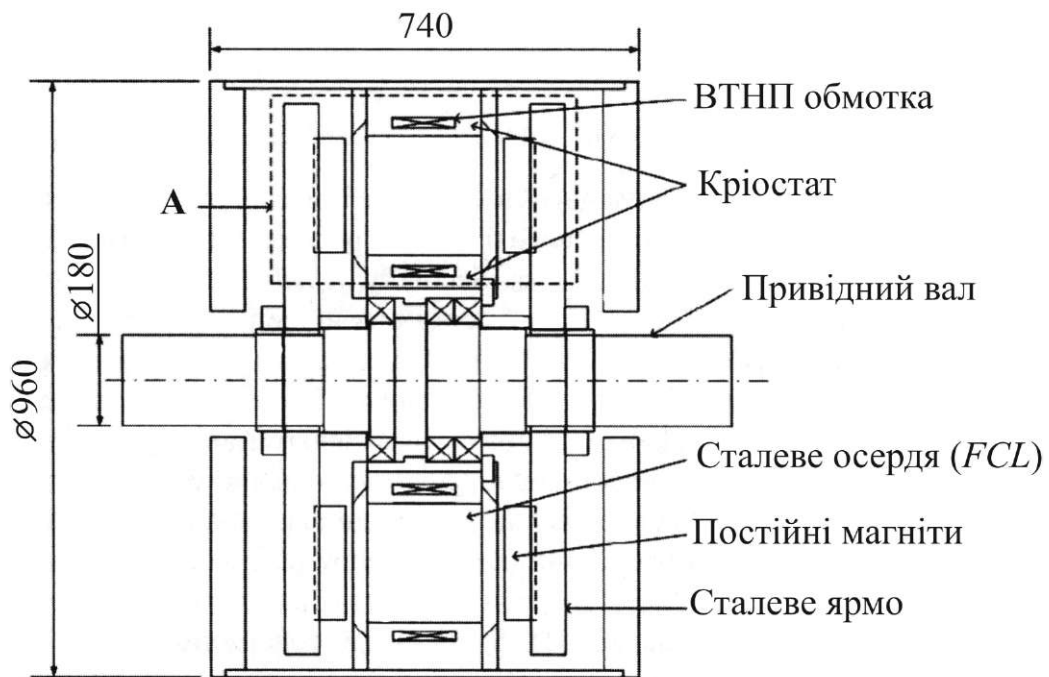


Рисунок 3.22 – Конструктивна схема ВТНП двигуна потужністю 400 кВт з постійними магнітами

У процесі виготовлення ВТНП дводискових котушок для обмотки якоря, загальною кількістю 270 шт., відбувався безперервний контроль їх геометричних, струмових і магнітних параметрів.

Створений компанією *Sumitomo* ВТНП двигун з постійними магнітами був випробуваний без навантаження, а його механічні і електромеханічні характеристики були зняті при штучному гальмуванні ротора. При величині змінного струму в обмотці якоря 540 А обертальний момент двигуна становив 14,5 кН м, що відповідає вихідній потужності 380 кВт при швидкості 250 об/хв. Аналітично було показано, що двигун може забезпечити вихідну потужність 400 кВт. Крім того, дослідження довели, що двигун здатний плавно розганятися і сповільнюватися. Для зменшення втрат на змінному струмі на гістерезис і вихрові струми двигун живиться струмом зниженої частоти – 16,7 Гц.

На початку 2007 р. концерн розробив та провів успішні випробування на заводі компанії *Fuji Electric Systems* двигуна з постійними магнітами, що містить „акумулятор магнітного потоку” *FCL*, потужністю 365 кВт на базі ВТНП проводу *DI-BSCCO*. Його технічні параметри наступні: швидкість обертання 250 об/хв; діаметр 1,2 м; довжина 0,8 м; вага 4,4 т.

Паралельно з розробленням ВТНП двигуна потужністю 400 кВт із постійними магнітами тією же групою японських учених розроблявся ВТНП двигун індукторного типу з аксіальним магнітним потоком тієї ж потужності. Його конструктивна схема подана на рис. 3.23 [133]. Вихідна потужність становить 400 кВт при швидкості обертання 250 об/хв; зовнішній діаметр двигуна 1,2 м;

довжина 1,14 м. Для зменшення втрат на змінному струмі обмотка якоря живиться струмом частотою 16,7 Гц.

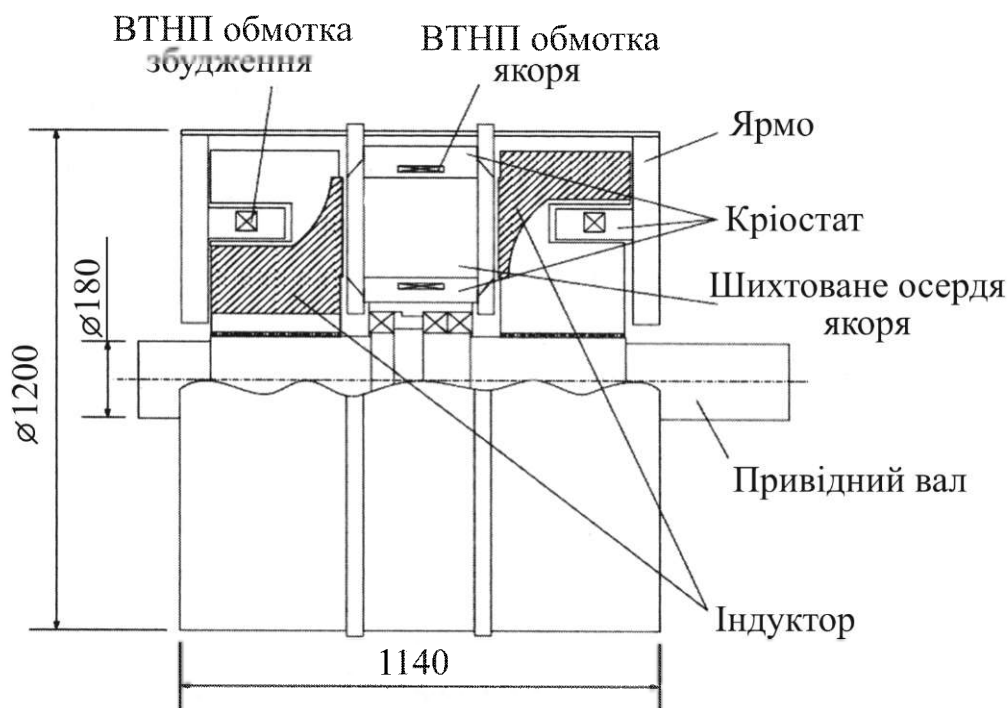


Рисунок 3.23 – Конструктивна схема ВТНП двигуна індукторного типу

Двигун містить одну якірну обмотку і дві обмотки збудження. Якір закріплений між двома обмотками збудження. Індуктор знаходиться на роторі, тому обмотки збудження та якоря не обертаються, і у струмознімних кільцях та контактних щітках немає потреби. Крім того, важливою перевагою такої конструкції є її нерухомість щодо системи охолодження.

Обмотки і якоря, і збудження виконані із ВТНП проводу BSCCO-2223 і, з огляду на конструктивні особливості двигуна, можуть працювати при температурі рідкого азоту, а наявність індуктора дозволяє зменшити кількість ампер-витків.

Якір містить 6 зосереджених (нерозподілених) ВТНП обмоток та 6 осердь (магнітопроводів), розташованих у центрі ВТНП обмоток. Три пари обмоток з'єднані в зірку і живляться трифазним струмом. Обмотки якоря знаходяться у криостаті, виконаному з волокніту (пластику, посиленого волокнами) – матеріалу, який часто застосовується для виготовлення криостатів, оскільки він легкий, міцний і захищає від вихрових струмів. Ізовні криостат захищає вакуумна ізоляція.

Для запобігання виникненню вихрових струмів магнітопроводи виконані шихтованими. Розташовані вони поза криостатом, тобто знаходяться при кімнатній температурі.

Більш того, сталеве осердя якоря використовується не тільки для зменшення проникнення магнітного потоку в обмотку якоря, а також і для захисту ВТНП проводу, оскільки більша частина моменту навантаження діє на сталеве осердя якоря. Крім того, менше розсіювання магнітного потоку приводить до зменшення магнітного опору двигуна.

Поле збудження створюється ВТНП обмотками, ярмом і вісьма індукторами (з кожного боку від якоря). Обмотки збудження знаходяться у кріостаті і закріплені на ярмі. Кріостат виготовлений з волокніту і так само як, і кріостат якоря, має двошарову структуру із зовнішньою вакуумною ізоляцією.

Індуктор виконаний з матеріалу з високою проникністю. Найбільший можливий основний магнітний потік може бути акумульований в осерді якоря завдяки спеціальній формі індукторів, які закріплені на осі і обертаються. Індуктори використовуються не тільки для акумулювання основного магнітного потоку, а і для того, щоб перешкоджати виникненню змінних магнітних полів, які впливають безпосередньо на ВТНП обмотки.

Конструкція індукторів така, що всі компоненти кріостата можуть бути закріплені, що виключає з конструкції двигуна рухливі з'єднання у вигляді порожнього вала для подачі холодоагенту і т.п.

У зв'язку з тим, що двигун має аксіальний магнітний потік, кріостат може використати сталеве осердя ззовні і стає менш складним. Це приводить до спрощення охолоджувальної системи і зменшення розміру двигуна.

Переохолоджений рідкий азот до температури 66 К подається в кожний кріостат за допомогою циркуляційного насоса.

У США розробленням і впровадженням НП електричних машин активно займається науково-виробниче об'єднання *AMSC*.

У 2003 р. корпорацією *AMSC* був виготовлений макетний зразок низькооборотного ВТНП синхронного електродвигуна гібридної конструкції потужністю 5 МВт із електронною системою керування для випробування на морських судах [134] (технічні характеристики його наведені в табл. 3.14). Його ротор виготовлений і протестований на заводі корпорації *AMSC*, після чого доставлений на завод фірми *ALSTOM* в *Rugby* (Великобританія), де виготовлений статор. Там двигун і пройшов випробування з навантажувальним двигуном потужністю 2,5 МВт, і був переданий військово-морським силам (ВМС) США.

У серпні та вересні 2004 р. у Центрі прогресивних енергосистем (*Center for Advanced Power Systems CAPS*) на території Університету штату Флорида проводилися випробування двигуна з навантаженням 5 МВт, яке здійснювалося протягом декількох годин.

Таблиця 3.14 – Технічні характеристики низькооборотного ВТНП синхронного електродвигуна потужністю 5 МВт

Параметр	Значення
Номінальна потужність, МВт	5
Номінальна напруга (лінійна/фазна), В	4160 / 2400
Номінальний фазний струм, А	715
Коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні ( $\cos \varphi$ )	1
Номінальна швидкість обертання, об/хв	230
Частота при номінальній швидкості, Гц	11,5
Синхронний опір по осі $D$ , в.о.	0,32
Перехідний опір по осі $D$ , в.о.	0,24
Понадперехідний опір по осі $D$ , в.о.	0,16
Власна постійна часу якоря, с	0,069
Понадперехідна власна постійна часу по осі $D$ , с	0,02
Понадперехідна власна постійна часу по осі $Q$ , с	0,028
Робоча температура обмотки збудження ротора, К	32
Матеріал обмотки статора	мідь

Розробку і створення вищеописаного двигуна потужністю 5 МВт профінансувало Дослідницьке відомство ВМС США (*US Navy's Office of Naval Research*), яке прийняло рішення, що в майбутньому всі кораблі будуть використовувати електричну рушійну систему. Цей низькооборотний ВТНП електродвигун з великим обертальним моментом став першим кроком у розробленні двигунів з номінальними потужностями 25 і 36 МВт для повністю електрифікованих військових кораблів. У цей час *AMSC* інвестувала понад 64 млн дол. у розроблення ЕМ на основі ВТНП. Жорстка інвестиційна політика *AMSC* приведе надалі до експансивного насадження ВТНП технологій спочатку у військовій техніці, а потім і у промисловості. Притому не тільки у США, але і в усьому світі.

І вже у березні 2007 р. *AMSC* і компанія *Northrop Grumman Marine Systems* оголосили про успішне завершення заводських випробувань найбільшого у світі ВТНП суднового електродвигуна потужністю 36,5 МВт (рис. 3.24) – знов за замовленням Дослідницького відомства ВМС США [127]. Складання і випробування були проведені на заводі морських систем компанії



Рисунок 3.24 – Компоненти судового ВТНП двигуна *AMSC* потужністю 36,5 МВт на випробувальному стенді заводу *Northrop Grumman*

*Northrop Grumman* разом з Філадельфійським центром ВМС (*Philadelphia Naval Business Center*). У проекті також брали участь *Ranor Inc.* і *Electric Machinery Company*. Маса електродвигуна становить 75 т, що у три рази менше маси двигуна традиційного „теплого” виконання, а габарити його удвічі менше. Відразу по завершенні випробувань електродвигун передали ВМС США, які передбачають встановити його на новітній есмінець класу *DDG-1000*.

Через військову спрямованість проекту технічні деталі пристрою практично не відомі. Можна лише із упевненістю сказати, що ВТНП обмотки двигуна виготовлені з *Bi-2223* виробництва *AMSC* і працюють вони при температурі близько 30 К, а вартість проекту склала приблизно 90 млн дол.

*AMSC* очікує, що цей контракт стане тільки першою ластівкою в серії майбутніх контрактів із ВМС США. Розробка дозволила виробити стандарти для ВТНП двигунів і керуючої електроніки, що підходять для військових кораблів ВМС США. *AMSC* планує адаптувати цей перспективний двигун до інших кораблів комерційного класу. Очікується, що вартість ВТНП двигуна буде порівнянна з вартістю традиційних двигунів тієї ж потужності і з тим же крутильним моментом.

Роботи зі створення синхронних двигунів потужністю до 5 МВт проводяться також в Південній Кореї [135–137] та Німеччині [138, 139]. В їх основу покладена гібридна конструктивна схема з ВТНП обмоткою збудження в роторі-кріостаті і обмоткою статора, винесеною в зазор.

Альтернативою ВТНП електричним машинам на основі композитних ВТНП провідів з необхідністю використовувати складні системи кріостатування, що забезпечують достатньо низькі температури в зоні індуктора (на рівні істотно нижче температури кипіння рідкого азоту) є кріогенні ЕМ з масивними ВТНП елементами з *YBCO* кераміки з охолодженням рідким азотом (77 К). У Росії розроблення таких машин ведуться, починаючи з 1995 р., в Центрі надпровідних електричних машин і пристроїв Московського авіаційного інституту (МАІ) в кооперації із провідними науковими центрами Росії і Німеччини [140–146].

Робота масивних ВТНП елементів базується на наступних явищах в об’ємних ВТНП матеріалах:

- здатність ВТНП елементів захоплювати магнітний потік;
- гістерезисні явища у ВТНП елементах у змінних магнітних полях;
- діамагнітне поведіння ВТНП елементів у магнітному полі.

Відповідно до цього можуть бути реалізовані три типи синхронних ВТНП двигунів:

- ▼ машини з „захопленим магнітним полем”;
- ▼ гістерезисні двигуни;
- ▼ реактивні електродвигуни.

Електродвигуни з „захопленим магнітним полем” – це кріогенні ЕМ підвищеної потужності (0,5–10 МВт) на основі так званих кріомагнітів з високими значеннями „захоплених” („вморожених”) магнітних полів (2–4 Тл при температурі 77 К і 7–8 Тл при температурі 20 К) [143, 144]. Використання таких високоенергетичних ВТНП кріомагнітів з великими значеннями питомої магнітної енергії дозволить істотно поліпшити масогабаритні і енергетичні показники ЕМ у порівнянні з ЕМ зі збудженням від постійних магнітів з рідкісноземельних матеріалів (РЗМ).

ВТНП кріомагніт являє собою індуктор з намагнічувальною обмоткою циліндричної або рейстрекової форми, усередині якої розташовується об’ємний блок у вигляді ВТНП циліндра або пластини. Намагнічувальна обмотка індуктора кріомагніту живиться імпульсно від зовнішнього джерела, створюючи усередині себе сильне магнітне поле. Після відключення зовнішнього джерела ВТНП елемент захоплює магнітний потік і при температурах нижче критичної стає джерелом постійного магнітного поля – кріомагнітом. Можливі два режими намагнічування об’ємного ВТНП елемента: „захолювання” у постійному магнітному полі і імпульсне збудження магнітного поля в „захолюваному” ВТНП елементі. Для ВТНП електричних машин найбільш раціональний другий режим генерації магнітного поля у кріомагніті, тому що тривалість однополярного імпульсного струму, обумовлена постійною часу котушки індуктора, і, як наслідок, рівень втрат у кріомагніті може бути дуже маленьким. Електродвигуни з „захопленим магнітним полем” мають перевагу при номінальних потужностях більше 1 МВт.

Гістерезисні ВТНП двигуни забезпечують постійний обертальний момент, що не залежить від навантаження, але коефіцієнт потужності таких двигунів досить низький. Принцип їхньої дії базується на явищі гістерезису в об’ємних ВТНП матеріалах. ВТНП елементи ротора двигуна з ітрієвої кераміки ( $YBa_2Cu_3O_x$ ) можуть бути виконані у формі пластин, циліндрів або стрижнів. Обертальний момент двигуна визначається площею петлі гістерезису об’ємних ВТНП матеріалів і не залежить від частоти обертання ротора.

Реактивні електродвигуни мають більшу ефективність і коефіцієнт потужності у порівнянні із традиційними асинхронними двигунами. Пускові характеристики забезпечуються за рахунок феромагнітних елементів ротора (асинхронний запуск). Ротори ВТНП реактивних двигунів складаються із феромаг-

нітних і ВТНП ( $YBa_2Cu_3O_x$ ) пластин, що чергуються, та мають достатньо високі анізотропні властивості – феромагнітні властивості в одному напрямку і діамагнітні – в перпендикулярному.

У результаті проведених в останні роки досліджень ЕМ з використанням масивних ВТНП елементів найбільше поширення одержали розроблення ВТНП гістерезисних і реактивних двигунів. Лідируюча роль у цих дослідженнях належить Росії і Німеччині.

Основні завдання, які вирішували розроблювачі ЕМ з використанням масивних ВТНП елементів і азотного охолодження (77 К):

- показати, що розроблювальні ВТНП машини можуть забезпечувати достатньо високий рівень потужностей (більше 10–100 кВт) при температурах рідкого азоту;

- розробити конструкції ВТНП машин із прийнятними для їхнього практичного запровадження значеннями коефіцієнта потужності ( $\cos\varphi \sim 0,8$ );

- довести, що використання в ЕМ масивних ВТНП елементів дозволяє отримати при однакових режимах криогенного охолодження більш високі питомі масоенергетичні показники в порівнянні із кращими зразками традиційних ЕМ (магнітоелектричних двигунів на основі постійних магнітів з рідкісноземельних елементів);

- продемонструвати варіанти конкретного практичного застосування нових типів ЕМ у перспективних промислових розробках.

Для вирішення завдання з підвищення коефіцієнта потужності у 2000–2005 рр. у МАІ у рамках сформованої кооперації була розроблена і успішно випробувана серія реактивних ВТНП електродвигунів з масивними  $YBCO$  елементами в роторі потужністю від 1 до 100 кВт (рис. 3.25).

ВТНП двигун потужністю 100 кВт має горизонтальне виконання із загальним кріостатом для статора і ротора. Ротор двигуна складається із ВТНП і сталевих пластин, що чергуються, і це забезпечує високу магнітну анізотропію по його осях. Випробування проводилися в середовищі рідкого азоту. Параметри ВТНП електродвигунів наведені в табл. 3.15 і 3.16. Результати випробувань двигуна із ВТНП ротором, проведені в середовищі рідкого азоту, показали, що використання ВТНП матеріалів у конструкції ротора дає збільшення потужності на 35 %. На основі цих робіт фірмою „*Oswald Elektromotoren GmbH*” у кооперації з МАІ був створений і успішно випробуваний реактивний ВТНП двигун потужністю 250 кВт. Дослідження продемонстрували, що застосування ВТНП елементів дозволяє істотно збільшити магнітну анізотропію ротора машини, недосягну при використанні традиційних електротехнічних матеріалів. Експе-

риментально і теоретично доведено, що питомі масоенергетичні параметри реактивних ВТНП двигунів у 2–2,5 рази перевершують параметри традиційних реактивних двигунів при однакових режимах охолодження рідким азотом, і в діапазоні вихідної потужності 5–20 кВт мають коефіцієнт потужності  $\cos\varphi \approx 0,7–0,8$ . При охолодженні реактивних ВТНП двигунів до температури рідкого водню ( $\sim 20$  К) їх питомі масоенергетичні показники поліпшуються в 1,5–2 рази у порівнянні із ВТНП двигунами, охолоджуваними рідким азотом (77 К).

На основі отриманих результатів був спроектований, виготовлений і випробуваний макетний зразок глибокого насоса з реактивним ВТНП двигуном (рис. 3.26) для подачі кріогенного палива – рідкого водню ( $\text{LH}_2$  – *liquid hydrogen*) в авіаційні і ракетно-космічні двигуни на водневому паливі, продуктом згоряння якого є водяна пара. Ротор ВТНП двигуна складається з магнітом'якого осердя і ВТНП елементів на основі BSCCO/Ag (рис. 3.26, б).

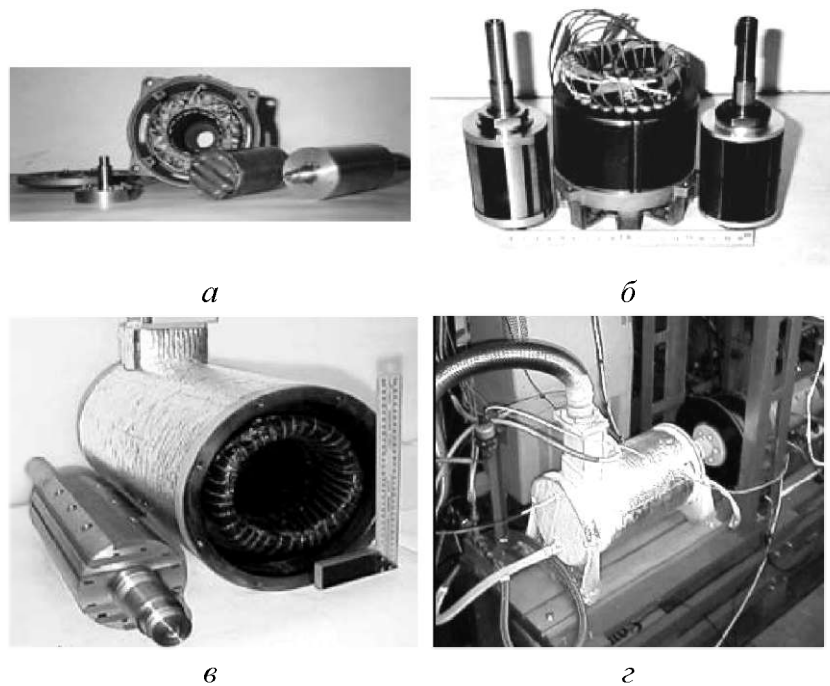


Рисунок 3.25 – Серія реактивних ВТНП електродвигунів:  
 а – ВТНП двигун потужністю 1 кВт (50 Гц);  
 б – ВТНП двигун потужністю 5 кВт (50 Гц);  
 в, г – ВТНП двигун потужністю 100 кВт (50 Гц)

Таблиця 3.15 – Основні технічні характеристики реактивних ВТНП двигунів середньої потужності

Параметр	Значення		
Потужність, кВт	0,5	5	10
Напруга, В	300	300	220/380
Частота, Гц	50	50	50
Швидкість обертання, об/хв	3000	3000	3000
Габарити, мм	135x225	135x225	135x305
Питома маса, кг/кВт	3,9	1,95	1,53

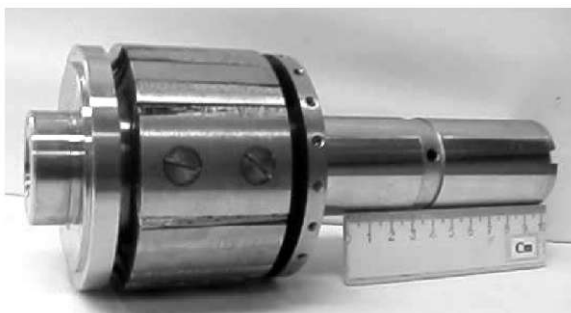
Компанії США, Німеччини, Японії і Росії розробили концепцію використання рідкого водню як палива для авіаційного та наземного транспорту. Реалізація концепції вимагає розвитку інфраструктури виробництва і передачі  $\text{LH}_2$ . Одним з важливих компонентів цієї інфраструктури є кріогенні насоси.

Таблиця 3.16 – Основні технічні характеристики реактивного ВТНП двигуна потужністю 100 кВт

Параметр	Значення
Зовнішній діаметр ротора, мм	129,4
Активна довжина двигуна, мм	320
Число пар полюсів	1
Число фаз	3
Струм обмотки статора, А	225
Напруга живлення, В	220
Вихідна потужність, кВт	100
Розрахунковий коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ )	0,8
Розрахунковий ККД	0,9
Частота струму у статорі, Гц	50
Частота обертання ротора, об/хв	3000



*а*



*б*

Рисунок 3.26 – Криогенний паливний насос з ВТНП приводом:  
*а* – зовнішній вигляд; *б* – ротор кріонасоса з ВТНП елементами

В останні роки (2004–2007) у МАІ ведуться розроблення електричних двигунів з використанням масивних ВТНП елементів і постійних магнітів на основі рідкісноземельних елементів [145]. Перші експерименти показали, що такі ВТНП двигуни будуть мати у 1,5–2 рази вищі масоенергетичні показники у порівнянні з реактивними ВТНП електродвигунами.

На рис. 3.27 наведені порівняльні кутові характеристики неявнополюсних ( $X_d = X_q$ ) і явнополюсних ( $X_d > X_q$ ) звичайних і ВТНП синхронних магнітоелектричних двигунів ( $X_d, X_q$  – індуктивні коефіцієнти машини по осях  $d$  і  $q$ ). Аналіз кривих на рис. 3.27 показує, що при використанні масивних ВТНП елементів можна помітно збільшити потужність електричного двигуна за рахунок зниження індуктивних параметрів  $X_d, X_q$  у неявнополюсних і явнополюсних ВТНП синхронних двигунах.

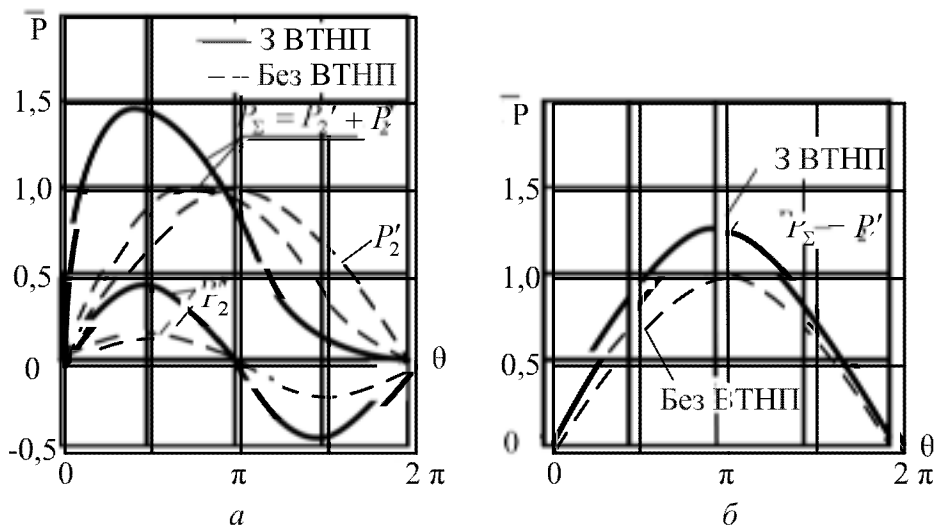


Рисунок 3.27 – Кутові характеристики традиційних „теплих” і WTNP синхронних магнітоелектричних двигунів:  
*a* – явноплюсний двигун; *б* – неявноплюсний двигун

На рис. 3.28 наведені різні конструктивні схеми виконання роторів синхронних WTNP магнітоелектричних двигунів, більша частина яких була виготовлена і успішно випробувана в МАІ.

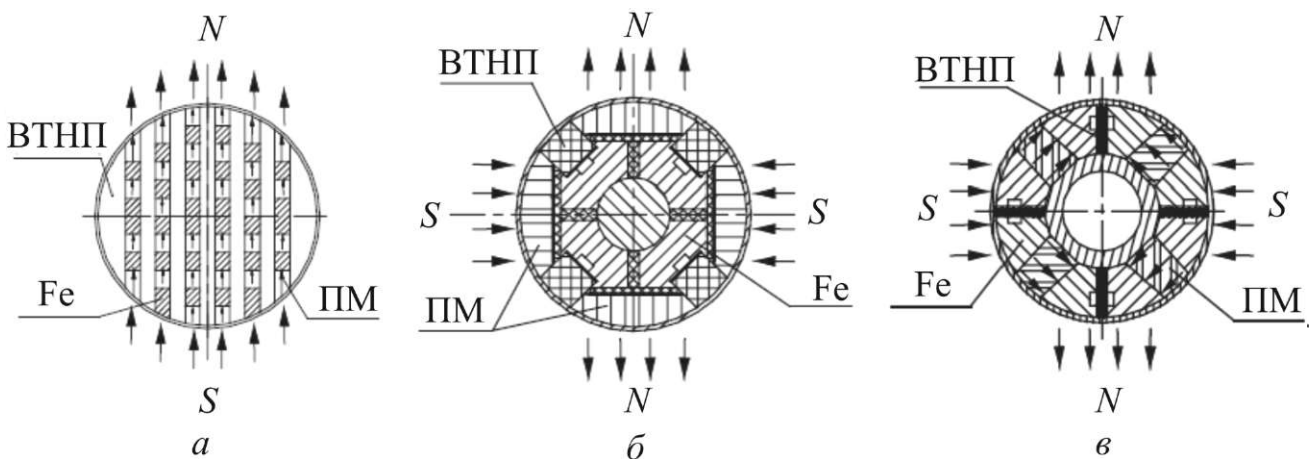


Рисунок 3.28 – Концепція WTNP двигунів з постійними магнітами:  
*a* – композитний ротор на основі WTNP, РЗМ та сталі;  
*б* – ротор на основі WTNP і радіальних постійних РЗМ магнітів;  
*в* – ротор на основі WTNP і тангенціальних постійних РЗМ магнітів

На рис. 3.29 подані результати дослідження дво полюсного синхронного WTNP двигуна із шарувато-блоковою структурою ротора (рис. 3.28, *a*). Такий ротор складається із WTNP пластин і блоків з магнітом’якої сталі і постійних магнітів, що чергуються. Аналіз кутових характеристик такого двигуна показує, що застосування WTNP елементів дозволяє збільшити вихідну потужність порівняно з традиційним „теплим” двигуном. Ці результати були підтверджені експериментально на дослідному зразку WTNP двигуна (рис. 3.29).

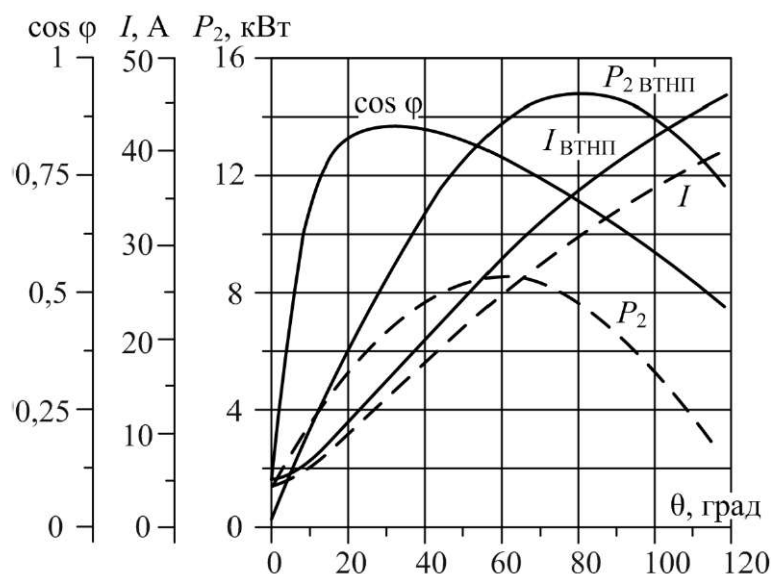


Рисунок 3.29 – Кутові характеристики ВТНП двигуна з композитним ротором:  
 — ВТНП двигун; --- традиційний „теплий” двигун

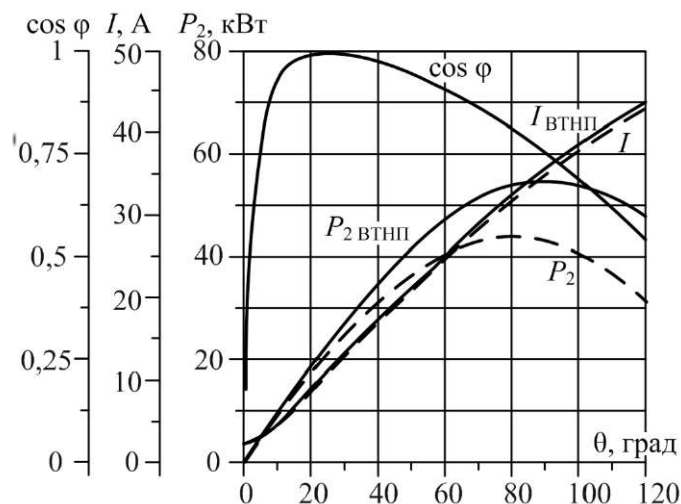
Розроблені і успішно випробувані 4-полюсні синхронні ВТНП двигуни з радіальними та тангенціальними магнітами потужністю близько 20 кВт. Зовнішній вигляд 4-полюсного двигуна і його кутові характеристики показані на рис. 3.30. Результати випробувань показали, що варіант синхронного ВТНП двигуна з радіальними магнітами дає кращі показники і є більш технологічним у виконанні.



а



б



в

Рисунок 3.30 – Чотирьохполюсний синхронний ВТНП двигун з радіальними постійними магнітами в роторі:  
 а – статор; б – ротор; в – кутові характеристики ВТНП двигуна:  
 — ВТНП двигун; --- традиційний „теплий” двигун

На базі цього ВТНП двигуна був виготовлений і успішно випробуваний перший промисловий зразок криогенного насоса для перекачування рідкого азоту ( $LN_2$  – liquid nitrogen). Загальний вигляд крионасоса на етапі його випробу-

вання у складі експериментального стенда МАІ для відпрацювання системи кріостатування силового НП кабелю зображений на рис. 3.31.

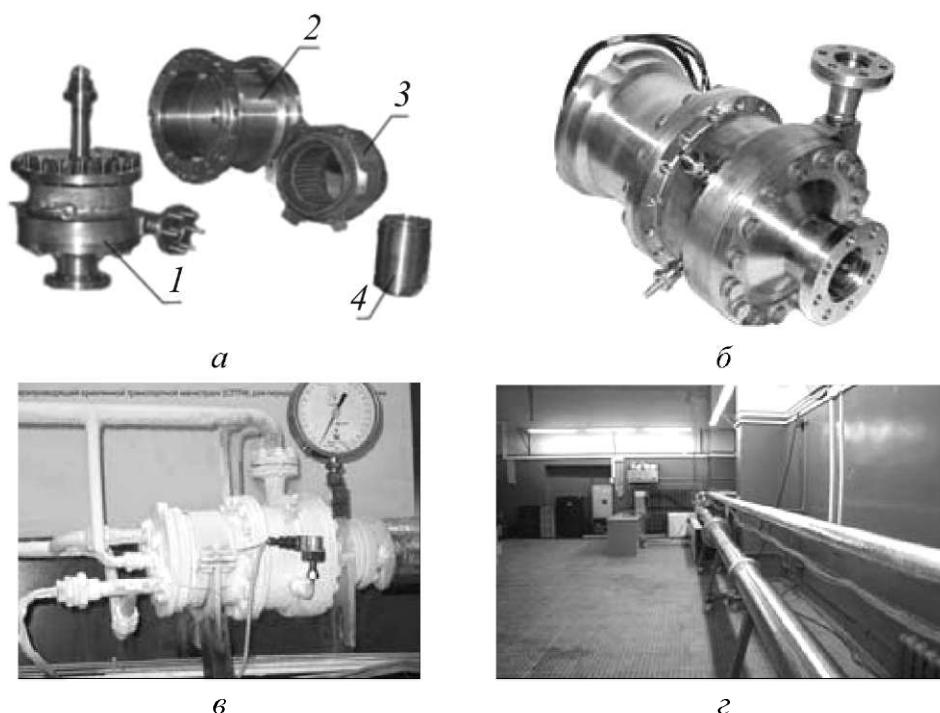


Рисунок 3.31 – Кріогенний насос для ВТНП магістралі передачі електроенергії: *а* – кріонасос з ВТНП електродвигуном (*1* – корпус насоса, *2* – корпус двигуна, *3* – статор, *4* – ротор); *б* – кріонасос з ВТНП електродвигуном разом; *в* – ВТНП кріонасос під час роботи; *г* – загальний вигляд промислового зразка ВТНП магістралі передачі електроенергії

У рамках німецько-російського проекту „*High Dynamic HTS Motor*” фірмою „*Oswald Elektromotoren GmbH*” разом з МАІ розроблений, виготовлений і проходить технологічні випробування високооборотний 4-полюсний ВТНП синхронний двигун потужністю близько 500 кВт із радіальними рідкісноземельними магнітами та масивними YBCO елементами в роторі (рис. 3.32) [146]. Двигун розроблений для використання в автомобільних компаніях Німеччини на стендах для випробувань і тестування кузовів нових легкових автомобілів.

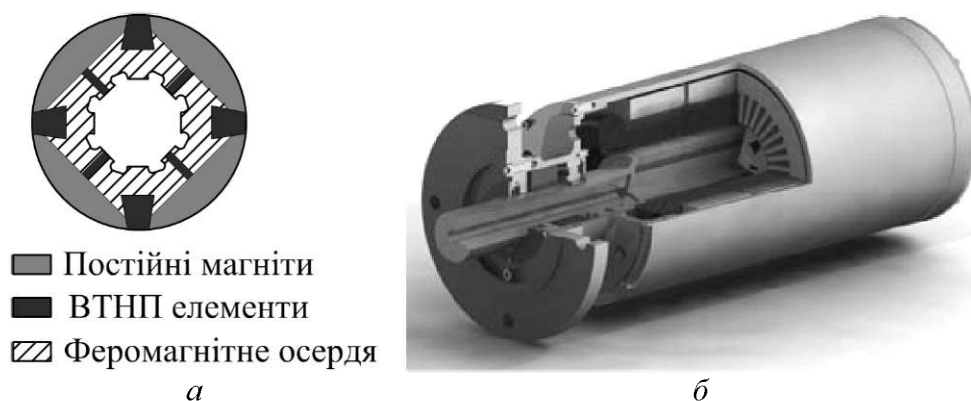


Рисунок 3.32 – Конструкція ВТНП синхронного двигуна потужністю 500 кВт на основі масивних ВТНП елементів та РЗМ: *а* – поперечний перетин ротора; *б* – конструкція двигуна

За замовленням Роснауки у 2006 р. науково-дослідними колективами Санкт-Петербурга, Москви і Єкатеринбурга (Росія) було закінчено виготовлення дослідної енергетичної установки потужністю 50 кВт [147–151]. Науковий керівник цих робіт – член-кореспондент Російської академії наук Чубраєва Л.І.

Електроенергетична установка складається з ВТНП синхронного генератора, ВТНП трансформатора, ВТНП кабелю і синхронного електродвигуна із ВТНП елементами (рис. 3.33).

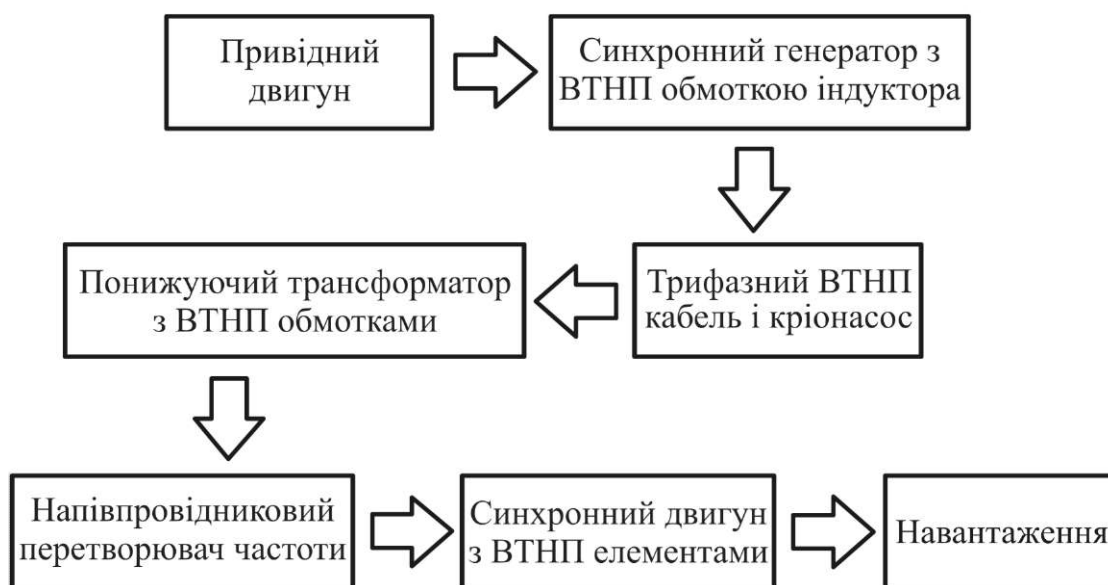


Рисунок 3.33 – Схема дослідної електроенергетичної установки потужністю 50 кВт (Росія)

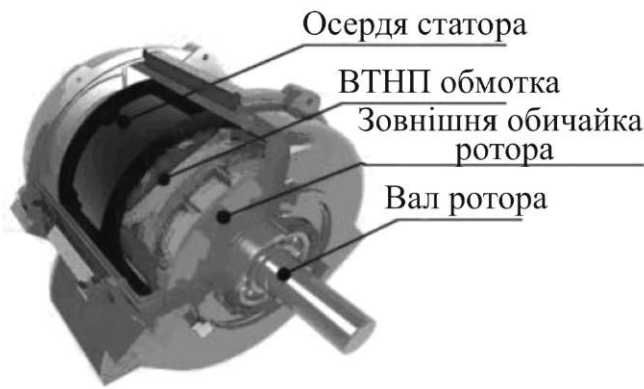
Генератор живить електродвигун через понижуючий трансформатор і напівпровідниковий перетворювач, для передачі енергії використовується ВТНП кабель. На сьогоднішній день виготовлені і випробувані в непрямих режимах усі компоненти установки. В конструкції усіх елементів електроенергетичної установки активно використовуються аморфна сталь, висококоерцитивні магніти і інші високотехнологічні матеріали.

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

Розглянемо основні компоненти установки.

1) Синхронний генератор потужністю 50 кВт з ВТНП обмоткою статора.

Конструкція ВТНП синхронного генератора [148] зображена на рис. 3.34. Ротор генератора 4-полюсний, традиційної конструкції, охолоджується газоподібним азотом. Осердя статора виконано з аморфного сплаву 5БДСР російського виробництва. Склотекстолітовий циліндр є технологічною основою для намотування ВТНП котушок обмотки статора, а також виконує роль внутрішньої обичайки кріостата статора.



*a*

*б*

Рисунок 3.34 – Конструкція ВТНП синхронного генератора (*a*) та внутрішня обичайка кріостата статора з кріпленням ВТНП обмотки (*б*)

Обмотка статора виконана із ВТНП стрічки Ві-2223 у срібній матриці перетином  $0,3 \times 4,3 \text{ мм}^2$ . Котушки статора мають сідлоподібну форму (див. рис. 3.34), що дозволяє поліпшити характеристики генератора і робить його більш компактним. Виготовлення таких котушок – значно більш трудомісткий процес, ніж намотування треків. Робоча температура статора від 77,3 до 64 К (з відкачуванням парів). Обмотка і осердя розміщуються усередині кріостата, утвореного двома зовнішніми обичайками і торцевими кришками.

Поверхні обичайок і торцевих кришок кріостата, звернені у вакуумну порожнину, відполіровані для зниження теплоприпливу за рахунок випромінювання. Зовнішня обичайка і торцеві кришки з вакуумними порожнинами виконані з нержавіючої сталі, а внутрішня обичайка – зі склопластику. Основні характеристики генератора подані в табл. 3.17.

Таблиця 3.17 – Основні параметри ВТНП генератора

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	50
Номінальна напруга, В	690
Номінальний струм, А	52,2
Число пар полюсів	2
Номінальна частота обертання, об/хв	1500
Номінальна частота, Гц	50
$\cos\phi$	0,8
Число котушок обмотки статора	6
Синхронний індуктивний опір по поздовжній осі, в.о.	0,50
Синхронний індуктивний опір по поперечній осі, в.о.	0,37
Витрата ВТНП стрічки на обмотку статора, м	580

2) ВТНП трансформатор потужністю 60 кВА з магнітопроводом з аморфної сталі [149] відзначається вдвічі меншою масою порівняно з традиційним масляним трансформатором. Його особливість – у кілька разів менша напруга

короткого замикання порівняно з традиційними трансформаторами, що потребує додаткових мір щодо його захисту. Обмотки трансформатора намотані ВТНП стрічкою Ві-2223 у срібній матриці перерізом  $4,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$ . Робоча температура охолодження рідким азотом від 77,3 до 64 К. Магнітопровід броньового типу виготовлений з аморфної сталі марки 5БДСР, яка має питомі витрати у 20 разів нижчі порівняно зі звичайною електротехнічною сталлю.

3) Синхронний двигун із ВТНП елементами потужністю 50 кВт.

Розроблений, виготовлений і випробуваний дослідний зразок багатодискового синхронного двигуна вертикального виконання [150] складається із трьох дискових індукторів на основі рідкоземельних постійних магнітів Nd-Fe-B і одного дискового індуктора на основі ВТНП масивів з ітрієвої кераміки (рис. 3.35). Багатодискова конструкція дозволяє легко нарощувати потужність двигуна.

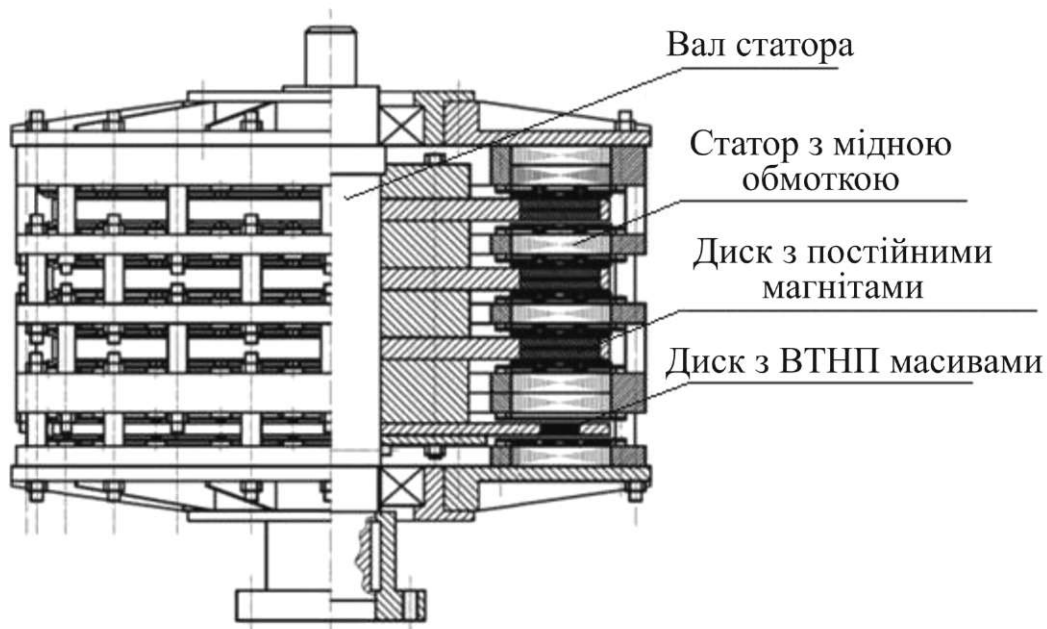


Рисунок 3.35 – Конструктивна схема багатодискового синхронного ВТНП двигуна потужністю 50 кВт

Синхронний ВТНП двигун розміщений у криостаті з рідким азотом (77,3 К). Диск із ВТНП масивними елементами (YBCO) розміщений внизу. При криогенних температурах величини залишкової індукції і коерцитивної сили магнітів Nd-Fe-B зростають (при температурах 120–130 К коерцитивна сила зростає у 5 разів, індукція постійних магнітів збільшується більш ніж на 18 %). Таким чином, підтримуючи в активній зоні багатодискового синхронного двигуна оптимальний температурний режим, можна забезпечити істотне підвищення вихідної потужності. Основні параметри ВТНП електродвигуна наведені в табл. 3.18.

Таблиця 3.18 – Основні параметри ВТНП електродвигуна

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	50
Номінальна лінійна напруга, В	380
Номінальний фазний струм, А	91,8
Номінальна частота обертання, об/хв	375
cos φ	0,9
Номінальна частота, Гц	50
Число пар полюсів	8
Число котушок статора	24
Число дисків статора	8
Висота двигуна, мм	600
Діаметр двигуна, мм	680
Синхронний індуктивний опір, в.о.	0,5
Маса, кг	100

Двигун працює у сполученні з напівпровідниковим перетворювачем частоти з ланкою постійного струму на основі некерованого випрямляча з ємнісним фільтром і інвертора напруги із широтно-імпульсною модуляцією на базі транзисторів, роботу яких регулює мікропроцесорна система керування.

4) Трифазний ВТНП кабель на першому етапі випробувань був виготовлений за методом електродинамічного моделювання у вигляді трьох соленоїдних котушок і за своєю індуктивністю відповідає НП кабелю довжиною приблизно 70 м.

Завершуючи огляд робіт щодо створення надпровідних ЕМ, необхідно згадати про ЕМ, обмотки яких виготовлені з використанням дібориду магнію – бінарної сполуки із критичною температурою 39 К.

Лідер у розробленні діборидмагнієвих проводів, американська компанія *Hyper Tech Research, Inc.*, за контрактом із *NASA* розробляє демонстраційний генератор. Проект має назву „Розроблення  $MgB_2$  надпровідних котушок для авіаційних електродвигунів і генераторів” [41]. На другому етапі проекту був виготовлений ротор повністю із дібориду магнію. Кінцевою метою проекту є виготовлення 4-полярного ротора для генератора потужністю 2 МВт для надзвукового літака. Для виготовлення кожного полюса (рис. 3.36) знадобилось 580 м діборидмагнієвого проводу, який був намотаний у формі „рейстрек” навколо мідного формера. Частота обертання ротора складає 20 тис. об/хв; охолоджується він рідким воднем.



Рисунок 3.36 – Фрагмент 4-полярного ротора з діборидмагнієвого проводу (для генератора) виробництва *Hyper Tech*

Інший проект *Hyper Tech*, також за контрактом із *NASA*, має назву „Діборидмагнієвий надпровідний статор для електрорушійної системи”. На рис. 3.37 зображений сегмент статорної котушки, намотаної з семіжильного діборидмагнієвого проводу ( $J_k=310$  кА/см<sup>2</sup> при 20 К).

Фахівцями *Kyushu University* та *Kyoto University* (Японія) за підтримки *NEDO* було розроблено повністю надпровідний синхронний двигун до кріонасоса для перекачування рідкого водню [152]. Обмотки статора і ротора виготовлені з моножильного діборидмагнієвого проводу діаметром 1 мм і критичним струмом 150 А (при 20 К).

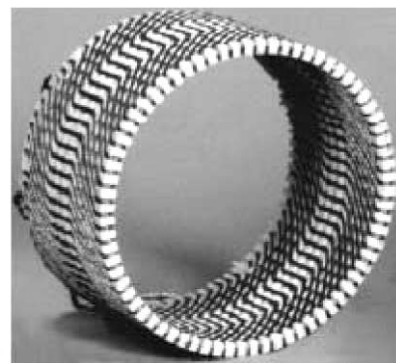


Рисунок 3.37 – Сегмент статорної котушки виробництва *Hyper Tech*

З використанням діборидмагнієвого проводу у Технологічному інституті штату Флорида у співпраці із *CAPS* було розроблено концепцію ротора для синхронних машин – двигунів, генераторів або синхронних компенсаторів [153]. Конфігурація обмотки ротора – подвійна спіраль (рис. 3.38).

Отже, можна зробити висновок, що створення НП електричних машин є найбільш близьким до промислового впровадження використання надпровідності в електроенергетиці. Більш того, є вагомими підстави сподіватися, що досягнення в технології виготовлення обмоткових ВТНП

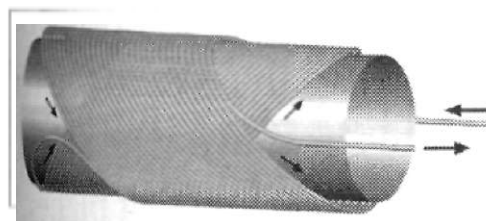


Рисунок 3.38 – Конфігурація обмотки ротора з діборидмагнієвого проводу

матеріалів 2-го покоління, новітня охолодна техніка на азотному рівні прискорять цей процес, і в цілому ряді спецпроектів ВТНП генератори та двигуни будуть більш прийнятні, ніж традиційні електричні машини.

## Розділ 4

### Надпровідні трансформатори

*Трансформатор* – це один з найважливіших електротехнічних пристроїв, без якого неможливо здійснити розподіл і передачу електричної енергії на великі відстані. За потужністю трансформатори умовно розділяють на дві групи: малопотужні різного призначення і силові – загального та спеціального призначення.

Силові трансформатори, призначені для використання в електричних мережах, можна розділити на дві групи:

1) трансформатори великої потужності, встановлені на електричних станціях безпосередньо за генераторами, які працюють на ЛЕП;

2) трансформатори, які забирають електричну енергію з ЛЕП і розподіляють її серед споживачів.

Кількість останніх набагато більше, а рівень напруги в них 35, 10 та 6 кВ. Відповідно віддаленню від електростанції одиничні потужності трансформаторів зменшуються, а втрати, віднесені до одиниці потужності, а також вартість 1 кВт втрат збільшуються, тобто саме в них відбуваються найбільш вагомі втрати електричної енергії на шляху до споживача. Якщо із магнітними втратами вдається досить ефективно боротися шляхом удосконалення існуючих і пошуком нових технічних рішень, то із електричними втратами боротися набагато складніше, і навряд чи цю проблему вдасться вирішити без використання надпровідних матеріалів.

Історія надпровідних трансформаторів почалася ще на початку 60-х років. Спочатку їх обмотки виготовляли із проводів на основі НТНП I роду, що мають порівняно невисоку струмонесучу здатність, яка сильно знижується зі збільшенням магнітного поля. Тому потужність перших НП трансформаторів залишалася невисокою, зводячи нанівець економічні переваги від низьких втрат. Помітне підвищення струмонесучої здатності стало можливим з появою довгомірних НТНП II роду і використанням для виготовлення обмоток багатожильних проводів ва їхній основі, що дозволило проектувати та будувати порівняно більш потужніші трансформатори. Однак, висока вартість криогенного устаткування гелієвого рівня температур і енерговитрати на підтримку надпровідного стану робили ці проекти неконкурентоспроможними у порівнянні з резистивними аналогами.

Новий сплеск оптимізму відносно проектування і будівництва надпровідних трансформаторів надало відкриття ВТНП, здатних працювати при темпера-

турі рідкого азоту. Через десять років у лабораторіях великих енергетичних компаній і науково-дослідних інститутів промислово розвинених країн світу (США, Японія, Китай, Німеччина, Південна Корея) стартували багатообіцяючі проекти трифазних і однофазних ВТНП трансформаторів різної потужності та рівнів напруги (табл. 4.1 і 4.2) [154]. Фінансування цих проектів (у рамках довгострокових програм) здійснювали державні установи і відомства, залучаючи приватні інвестиції.

Таблиця 4.1 – Основні параметри розроблених силових ВТНП трансформаторів

Параметри	Компанія – розроблювач					
	<i>Siemens AG</i> (Німеччина) [155–157]	<i>Super-Power, ORNL, WES</i> (США) [158–161]	<i>SNU, El. Engineering &amp; Sci. Res. Inst., KPU, Hyosung Corp.</i> (Корея) [162–169]	<i>Fuji</i> (Японія) [170]	<i>Railway Techn. Res. Inst. (Токіо), Fuji, Kyushu Univ.</i> (Японія) [171–173]	<i>Niigata University</i> (Японія) [174–177]
Номінальна потужність, кВА	1000	5000 / 10000	1000	2000	4000	100000
Число фаз	1	3	1	1	1	3
Число обмоток первинних / вторинних	2 / 2	-	8 / 4	1 / 1	1 / 4 / 1*	1 / 1
Напруга первинна / вторинна, кВ	25 / 1,389	24,9 / 4,2	22,9 / 6,6	66 / 6,9	25 / 1,2 / 0,44*	132 / 66
Струм первинний / вторинний, А	40 / 360	116 / 694	44 / 152	30,3 / 298,9	160 / 750 / 909*	437 / 874
Робоча температура, К	66	30–50	65	66	66	77
Індукція в магнітопроводі, Тл	1,671	–	1,48	–	–	–
Загальна довжина надпровідника, м	6783	–	2702	–	–	173113
Критичний струм проводу, А	46	–	115	–	–	–

\* трансформатор має третинну обмотку (рис. 4.8)  
*WES* – *Waukesha Electric Systems* (США)  
*SNU* – *Seoul National University* (Південна Корея)  
*Fuji* – *Fuji Electric Systems Corp.* (Токіо, Японія)

За останні роки були досягнуті великі успіхи в розробленні ВТНП проводів, електроізоляційних матеріалів азотного рівня температур [186], систем кріостатування і теплової ізоляції та виготовленні ВТНП обмоток.

На прототипах ВТНП трансформаторів удосконалюється технологічний процес їх виготовлення, орієнтований на серійний або дрібносерійний випуск і якнайшвидшу інтеграцію в розподільні мережі загального призначення.

Разом з цим не мають однозначного рішення принципово важливі для ви-

готовлення трансформаторів питания. Найбільш гострі з них – оптимальна конструкція магнітопроводу і зниження втрат на змінному струмі у надпровідних обмотках.

Таблиця 4.2 – Основні параметри деяких малопотужних ВТНП трансформаторів (робоча температура – 77 К)

Параметри	Компанія – розроблювач				
	<i>Hebei Univ., TBEA, IIE</i> (Китай) [178–180]			<i>CNRS-CRCBT-LEG, Air Liquid DTA</i> (Франція), <i>3-C's Ltd</i> (Англія), <i>EHTS GmbH</i> (Німеччина) [181–184]	<i>SKODA Vyzkum</i> (Пльзень, Чехія), <i>Bergische Univ.</i> (Вупперталь, Німеччина), <i>Inst. Electrical Eng.</i> (Братислава, Словаччина) [185]
Номінальна потужність, кВА	9	26	45	41	14
Число фаз	1	3	1	1	1
Число обмоток первинних / вторинних	1 / 2	1 / 24	1 / 13	2 / 4	1 / 12
Напруга первинна / вторинна, В	240 / 9,6	400 / 16	2400 / 160	2050 / 410	400 / 200
Струм первинний / вторинний, А	37,5 / 937,5	37,5 / 937,5	18,75 / 281,25	20 / 100	35 / 70
Індукція в магнітопроводі, Тл	1,32	1,27	1,69	1,5	–
Загальна довжина надпровідника, м	306	318	440	219	–

*TBEA* – *Tebian Electric Apparatus Stock Co., Ltd* (Китай)

*IIE* – *Institute of Electrical Engineering* (Китай)

#### 4.1. Вибір конструкції магнітопроводу та обмоток

На цей час не вирішено питання, яке виконання магнітопроводу найбільш вигідно: „тепле” (ззовні кріостата) або „холодне” (усередині кріостата).

„Холодне” виконання (рис. 4.1), з одного боку, сприяє спрощенню конструкції кріостата і зменшенню розмірів магнітної системи, але, з іншого боку, вносить додаткові теплоприпливи, збільшуючи енерговитрати на охолодження. Зниження теплоприпливів досягають використанням в якості матеріалу магнітопроводу дорогих аморфних сталей, що мають дуже низьке тепловиділення (0,2 Вт/кг при 1,4 Т і 100 К) [187], або звичайної холоднокатаної електротехнічної сталі з поліпшеними характеристиками. Дуже цікаві роботи з удосконалення сплаву FeSi, у результаті яких отримана величина тепловиділень 0,35 Вт/кг при 1,7 Т, 50 Гц замість колишніх 0,8 Вт/кг [188].

„Тепле” виконання магнітопроводу призводить до більш складної конс-

трукції кріостата, який виконується у вигляді порожнього циліндра, збільшує розмір магнітної системи, але разом із тим зменшує теплоприпливи в холодну частину. При цьому в якості матеріалу магнітопроводу можна використовувати порівняно дешеву тонколистову рулонну електротехнічну сталь (марок 3404, 3405, 3406), що допускає магнітну індукцію до 1,6–1,65 Тл. Подібна конструкція більш ефективна для однофазних трансформаторів (рис. 4.2) [170]. У трифазних трансформаторах аналогічного виконання будуть потрібні додаткові струмовводи для електричного зв'язку обмоток.

Зниження динамічних втрат від змінного струму в обмотках трансформаторів досягають різними способами:

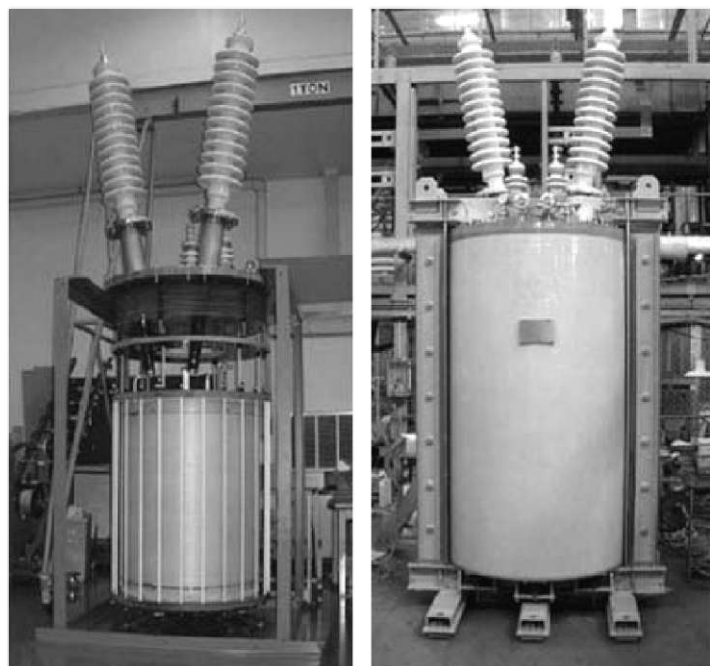
- використанням якісних ВТНП провідників;
- транспонуванням проводів;
- застосуванням багат шарових мідних обмоток, що екранують;
- чергуванням модулів високої та низької напруги;
- збільшенням кількості витків в обмотках;
- зниженням робочої температури обмоток трансформатора.

Зупинимось докладніше на цих способах.

Динамічні втрати в обмотках пов'язані з якістю використовуваних надпровідників (критична густина струму у власному полі при максимально можливій довжині куска) і анізотропією надпровідного матеріалу. Для прикладу, якісна стрічка із ВТНП 1-го покоління



Рисунок 4.1 – Трифазний ВТНП трансформатор потужністю 5/10 МВА на заводі компанії WES [158, 159]



а

б

Рисунок 4.2 – Однофазний ВТНП трансформатор з „теплою” магнітною системою і неметалічним кріостатом коаксимального типу (*Fuji*): а – у розібраному стані; б – зібраний

ня виробництва *AMSC* має критичний струм  $I_k = 115$  А при довжині до 1000 м. Щоб уникнути збільшення динамічних втрат і зниження струмонесучої здатності проводів, котушку після намотування піддають тривалому відпалу у спеціальній печі для усунення можливих механічних напруг і дефектів у структурі надпровідника, що виникли в результаті його деформації.

Заслужують на увагу також способи зниження динамічних втрат в обмотках трансформатора, які виготовляються із ВТНП проводів 1-го покоління, стабілізованих стрічками з нержавіючої сталі. Надпровідники цього типу дуже чутливі до поперечної складової магнітного поля, тому скручування або транспозиція, що застосовуються для рівномірного розподілу струмів у пакетах проводів обмоток, дуже часто призводять до збільшення втрат на гістерезис і появи кооперативних втрат, що розсіюються у матриці [181]. Однак, якщо скрутку або транспозицію робити з певним кроком, який підбирається індивідуально в кожному конкретному випадку, можливо досягти зниження динамічних втрат разом з рівномірним розподілом струмів.

Для зменшення дії магнітного поля на надпровідник при великому числі первинних і вторинних обмоток, застосовують екранування багат шаровими обмотками з мідного провідника [171–173].

Найчастіше для виготовлення обмоток трансформатора використовують модулі подвійних галет, просте застосування яких несприятливо через збільшення динамічних втрат за рахунок сильної анізотропії ВТНП проводів 1-го покоління. Однак, чергування таких модулів високої і низької напруги (відповідно, первинної і вторинної обмоток), розташованих на загальному стрижні магнітопроводу (рис. 4.3), веде до зниження втрат [162–163].

Іншим способом боротьби з динамічними втратами є зниження індукції в магнітопроводі шляхом збільшення числа витків в обмотках, однак цей спосіб збільшує загальну витрату надпровідника.

Поряд з перерахованими, найпоширеніший спосіб боротьби з динамічними втратами в надпровідниках полягає у зниженні робочої температури до 65–66 К, у результаті чого збільшується діапазон робочих полів і струмів.



Рисунок 4.3 – Чергування модулів подвійних галет первинної і вторинної обмоток (КРУ, П.Корея)

Була розпочата спроба використати в якості обмоток ВТНП стрічки 2-го покоління [182], що мають більш високі густини струмів у полях, що перевершують припустимі для стрічок 1-го покоління. Поки відомо, що на їхній основі вдалося виготовити тільки одну вторинну обмотку. Маючи первинну і вторинну обмотки, виготовлені з різних матеріалів (ВТНП 1-го та 2-го покоління), розроблювачі здійснили якісне порівняння динамічних втрат у них, що довело перевагу ВТНП 2-го покоління при безперервній роботі трансформатора [189]. Було досягнуто обмеження струмів короткого замикання, обмеження стрибків струму навантаження, швидке відновлення надпровідних властивостей.

#### 4.2. Нові технологічні концепції

Певний інтерес представляє технологія формування тримірних котушок в одному процесі (осадження буферного і ВТНП покриття на обертовий Ni циліндр) і наступного формування рисунка лазерним скрайбіруванням [183, 184], розроблена англійською компанією *3-C's Ltd (Coated Conductors Consultancy)*. Цей проект фінансувався Євросоюзом (об'ємом 4,5 млн євро) і включав 10 партнерів (компанії, університети, інститути). Його метою була розробка технології довгих YBCO покритих провідників для демонстраційного варіанта трансформатора потужністю 41 кВА.

У 2004 р. засновником компанії *3-C's Ltd* та координатором описаного вище проекту доктором Емоном Ф. Махером була розроблена нова концепція технології виготовлення електричних машин без використання процесу намотування – „покритий провідний циліндр”, що також може бути використана для виготовлення обмоток трансформаторів, резистивних і індуктивних струмообмежувачів, для модулів надпровідних індуктивних накопичувачів і модулів лінійних двигунів. Ця розробка привернула на себе увагу тим, що не вимагає виготовлення довгих ВТНП стрічок.

Нова концепція використовує процеси осадження плівок і літографію, широко використовувану в напівпровідниковому виробництві, тільки у 3-мірному (об'ємному) варіанті. Буферний і надпровідний (YBaCuO) шари осаджують безпосередньо на обертовий нікелевий циліндр (поверхня якого попередньо текстурована), потім у суцільній плівці літографічно формують смужки заданої ширини – або скрайбірують лазером, або „витравлюють”.

У цьому випадку багат шарові надпровідні структури мають відразу циліндричну форму, що і потрібно при виробництві обмоток трансформаторів (рис. 4.4). Такий процес дозволяє досягти високих інженерних густин струму і знизити втрати на змінному струмі. Необхідний етап текстурування (достатньо

повільний) у даній технології використовують тільки один раз, а наступні шари повторюють текстуру першого.

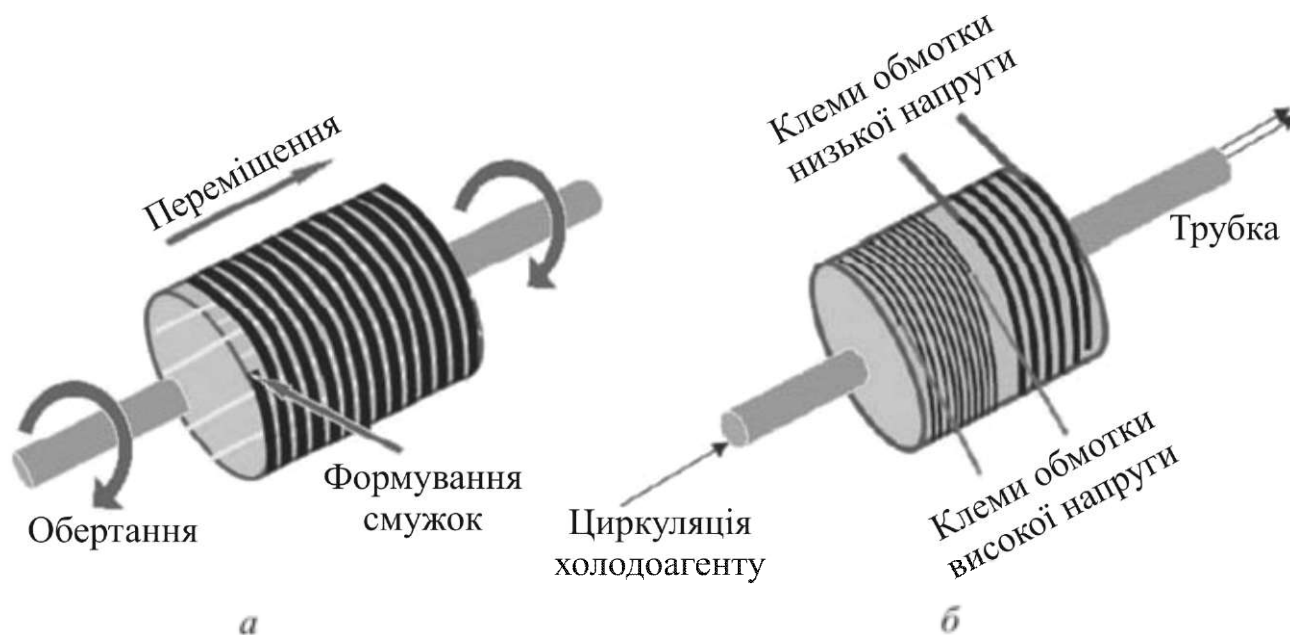


Рисунок 4.4 – Обмотки, отримані за допомогою процесу осадження YBCO і літографії:  
*а* – процес формування стрічок (проводів обмотки);  
*б* – взаємне розташування первинної і вторинної обмоток на підложці

Етапи виготовлення котушки (переміщення циліндра між різними камерами для різних етапів процесу) подані на рис. 4.5 [183, 184].

*Переваги нової технології:*

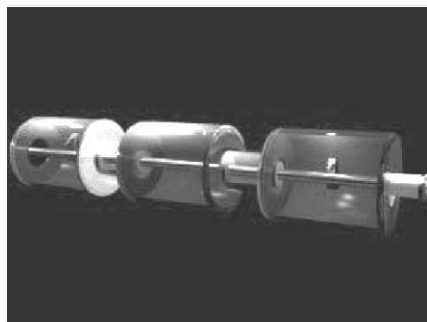
- гнучкість конструкції у зв'язку із широкими можливостями формування рисунку плівки;
- спрощення осадження плівки через коаксіальну симетрію;
- збільшення однорідності плівки через обертання підложки;
- виключення процесу деформації плівки при намотуванні;
- зменшення розміру і ваги, що приводить до зниження вартості.

*Приклади використання нової технології в інших електротехнічних пристроях:*

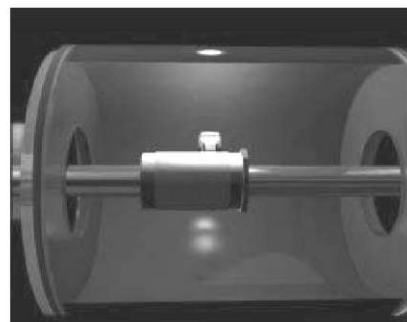
- ▼ багатомодульні надпровідні індуктивні накопичувачі – можливість з'єднання окремих модулів між собою;
- ▼ багатомодульні двигуни і генератори – легкість заміни елементів;
- ▼ лінійні ряди модулів для формування лінійних двигунів;
- ▼ модульні системи струмообмежувачів зі змінюваним рівнем навантаження і можливістю регенерації залежно від схеми з'єднання.

Удосконалювання технології виробництва ВТНП трансформаторів і її доведення до промислових масштабів дозволить налагодити їхній комерційний випуск і поступову заміну трансформаторів традиційного „теплого” виконання.

ВТНП трансформатори мають багато переваг: витримують дворазові перевантаження протягом 48 год. і не призводять при цьому до нагрівання і старіння ізоляції [159], у той час як трансформатори традиційного „теплого” виконання припускають перевантаження лише у 1,3 рази протягом 2 год. Десятикратні перевантаження НП трансформатори здатні витримувати протягом 2–5 хв., що принципово неможливо на традиційному устаткуванні. Крім того, ВТНП трансформатори більш екологічні, пожеже- і вибухобезпечні через відсутність у них масла, мають істотно менші масогабаритні показники і дуже низькі втрати холостого ходу і короткого замикання. Використання НП трансформаторів дозволить відмовитися від закладання резервних потужностей, що сприяє скороченню капітальних витрат на модернізацію устаткування підстанцій. Поряд з усіма переліченими перевагами вони мають можливість обмежувати струми короткого замикання за рахунок переходу однієї або декількох обмоток (залежно від виду короткого замикання) у нормально провідний стан.



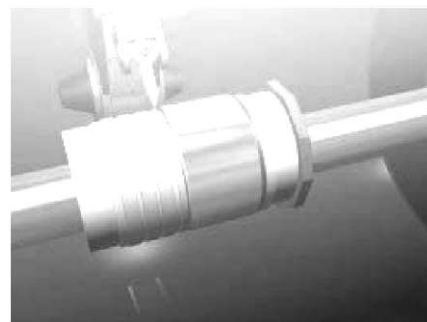
*a*



*б*



*в*



*г*

Рисунок 4.5 – Етапи виготовлення котушки:

- a* – циліндр переміщується між вакуумними камерами на кожному етапі;
- б* – перший етап – текстурування поверхні нікелевого циліндра;
- в* – другий етап – осадження ВТНП і золотого шарів;
- г* – третій етап – формування рисунка ВТНП шару – лазерне скрайбірування

### 4.3. Трансформатори для розподільних енергомереж

Здійснювались спроби включення ВТНП трансформатора (630 кВА; 18,7 кВ / 420 В) з „теплим” магнітопроводом, створеного в рамках спільного проекту *ABB, Ed (Electricite de France), AMSC і SIG (Services Industriels de Geneve)*, у діючу енергомережу. Однак, ВТНП обмотки не були оптимізовані для використання на змінному струмі, втрати в них виявилися неприйнятно високими (3 Вт на 1 кА·м), тому в енергомережі трансформатор пропрацював ледве більше року і був виведений з неї [190–192].

Другий проект цієї ж групи виконавців – ВТНП трансформатор потужністю 10 МВА (63 кВ / 21 кВ) [190–192] у 2001 р. пройшов повний цикл лабораторних випробувань і в 2002 р. був включений в енергосистему Франції.

На початку 1998 р. був успішно випробуваний прототип ВТНП трансформатора потужністю 1 МВА, виготовлений для компанії *Rochester Gas & Electric* компанією *WES (Waukesha Electric Systems, США)* із ВТНП стрічок першого покоління, поставлених *SuperPower* [96, 193]. Наукову підтримку проекту здійснювали Окридзька Національна лабораторія (*ORNL*) і Ренселарський політехнічний інститут (*Rensselaer Polytechnic Institute*). У 2004 р. на заводі фірми *Waukesha* пройшов випробування новий варіант трансформатора на 5/10 МВА (див. рис. 4.1), розроблений і виготовлений тим же складом виконавців. Розроблений і успішно випробуваний прототип трифазного ВТНП трансформатора потужністю 10 МВА на основі ВТНП провідників першого покоління має первинну напругу 24,9 кВ, а вторинну – 4,2 кВ (див. табл. 4.1) [158–161]. Таким чином, *WES* разом із *ORNL* продемонстрували як технічну можливість, так і економічну доцільність ВТНП трансформаторів з потужністю 10 МВА і вище.

У 2007 р. *ORNL* і *WES* під патронажем і при фінансовій підтримці *DOE* почали розроблення спеціальної високовольтної ізоляції та струмових уведень, призначених для максимального спрощення і здешевлення конструкції ВТНП трансформатора напругою 138 кВ [66].

ВТНП трансформатори мають бути конкурентоспроможними за ціною, вагою, габаритами, витратами на експлуатацію і терміном служби. Конструкція ВТНП трансформатора потужністю 18 МВА, охолоджуваного рідким азотом, показана на рис. 4.6. У табл. 4.3 наведено співставлення капітальних витрат і витрат на експлуатацію ВТНП трансформатора потужністю 18 МВА та звичайного „теплого” потужністю 24 МВА протягом 30 років. І хоча великої різниці на користь ВТНП трансформатора начебто немає, слід визначити, що, як вже було вказано, його використання дає можливість покращити умови експлуатації електричних мереж, обмежувати струми короткого замикання та інше.

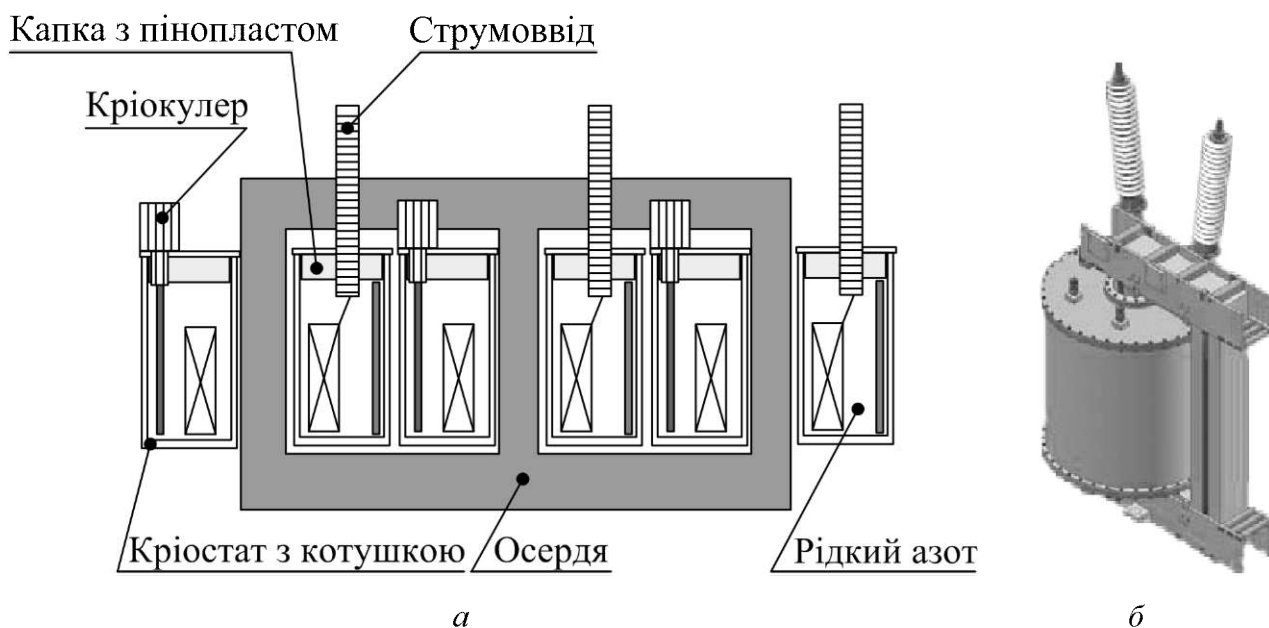


Рисунок 4.6 – Трифазний ВТНП трансформатор *ORNL* і *WES* (а) і його однофазний прототип (б)

Таблиця 4.3 – Співставлення капітальних витрат і витрат на експлуатацію ВТНП та звичайного „теплого” трансформаторів протягом 30 років, тис. дол.

Види витрат	ВТНП потужністю 18 МВА	„теплий” потужністю 24 МВА
Капітальні витрати	621	550
Втрати в осерді	32,5	42,5
Омічні втрати	немає	150
Витрати на охолодження	32	немає
Протипожежні міри	немає	100
Заміна масла	немає	30
Обслуговування кріокулерів	161	немає
Обслуговування кріостата	20	немає
УСЬОГО	866,5	872,5

У 2006 р. компанія *AMSC* і Китайський електротехнічний інститут *IEE* (*Institute of Electrical Engineering*) продемонстрували перший НП трансформатор в енергетичній мережі Китаю [81–83, 194, 195]. Цей трансформатор трифазний, потужністю 630 кВА, призначений для зниження напруги від 10,5 кВ до 400 В. Струми первинної та вторинної обмоток складають, відповідно, 34,64 та 909,33 А, магнітна індукція 1,275 Тл, робоча температура 77 К, частота 50 Гц. Раптовий струм короткого замикання  $25 \times I_{н}$ , імпульсна перенапруга 75 кВ.

Трансформатор був виготовлений *IEE* у співробітництві з *TBEA Industrial Transformer Group* – найбільшим виробником трансформаторної продукції у Китаї. У якості струмонесучого елемента були застосовані ВТНП стрічки на

основі сполуки Ві-2223 у срібній матриці виробництва *AMSC* із поперечним перерізом  $5,27 \times 0,78 \text{ мм}^2$  (разом із ізоляцією). Первинна обмотка соленоїдного типу намотана у 8 шарів по 262 витки у кожному із продольними охолоджувальними каналами з поперечним перерізом  $10 \times 0,2 \text{ мм}^2$ . Внутрішній та зовнішній діаметри первинної обмотки – 488 та 504 мм, висота 342,5 мм.

Вторинна обмотка виконана з 23 увімкнених паралельно дводискових катушок (подвійних галет), по 10 витків у кожній з них. Внутрішній та зовнішній діаметри вторинної обмотки – 581 та 608 мм, висота 355 мм.

Сталеве ядро має розміри: діаметр 396 мм, висота 870 мм, ширина 780 мм.

Трансформатор виконаний за схемою з „теплим” магнітопроводом. Обмотки його виконані за галетною схемою і охолоджуються рідким азотом, що суттєво спрощує як його конструкцію, так і експлуатацію. Трансформатор має три охолоджувальні канали. Кожна з фаз трансформатора розміщена в індивідуальному діелектричному кріостаті, через центр якого проходить магнітопровід. Внутрішній та зовнішній діаметри кріостата – 410 та 760 мм, висота 680 мм.

Повний ККД трансформатора (з урахуванням зниження втрат за рахунок використання ВТНП проводу і аморфного осердя) становить 98,3 %. При цьому розроблювачі вважають, що за рахунок оптимізації конструкції можна буде досягти ККД 99,9 %. ВТНП трансформатор працює у силовій мережі *Changji* провінції *Xinjiang*, обслуговуючи завод *TBEA* (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Трифазний ВТНП трансформатор *IEE / TBEA* потужністю 630 кВА (10,5 кВ / 400 В)

Відповідно до оцінки Міністерства енергетики США щорічний світовий ринок трансформаторів потужністю вище 10 МВА перевершує 1 млрд дол. з тенденцією швидкого зростання продажів за межами США. Наприклад, у Китаї у 2001 р. ріст енергоспоживання становив 9 %, а вже у 2004 р. ця цифра збільшилася до 14,8 %. У США за той же період відзначено збільшення річного енергоспоживання, приблизно, на 2–3 %. Представники Китаю вважають, що настільки бурхливий ріст енергоспоживання має бути підкріплений упровадженням інноваційних технологій, таких як НП трансформатори, обмежувачі струму, лінії електропередач. Така заміна стане гарантією надійності і стабільності роботи енергетичних систем у цілому.

У Японії в рамках проекту *Applied Basic Project* з 2007 р. розробляється трансформатор на робочі напруги 66 / 6,9 кВ потужністю 20 МВА для роботи в розподільних мережах [196–198]. Основними завданнями, які потрібно вирішити на даній фазі проекту, є зменшення втрат на змінному струмі, підвищення струмонесучої здатності провідника і діелектричної стійкості ізоляції.

Зокрема, розробляється наступна технологія зниження втрат на змінному струмі у ВТНП проводах другого покоління: за допомогою лазера із шириною пучка в декілька мікрон у надпровідному шарі YBCO і шарі срібла випалюються смужки однакової ширини. Таким чином, ВТНП плівки з'єднуються тільки через хастелоеву підложку з високим питомим опором. Однак, внаслідок власного магнітного поля розподіл струмів по окремих смужках не буде однорідним, для забезпечення балансу струмів смужки через певні інтервали, замкнені перемичками. У рамках *Applied Basic Project* було виготовлено 16-шарову катушку із проводу довжиною 34 м і шириною 10 мм, розділеного на 3 смужки. У порівнянні з катушкою зі звичайного ВТНП проводу було виявлено зниження втрат на змінному струмі у 3 рази, при цьому через всі смужки протікав однаковий струм. Надалі планується перевірити, чи будуть у проводі довжиною 74 м і шириною 5 мм, розділеному на п'ять смуг, втрати на змінному струмі знижені у 5 разів. У випадку успішних тестових випробувань подібна технологія зниження втрат на змінному струмі може бути використана і для інших ВТНП пристроїв.

Для подальшого підвищення струмонесучої здатності ВТНП провідників у рамках *Applied Basic Project* планується створення і дослідження транспонованого проводу на 1 кА, що складається з декількох паралельних жил.

Для розроблення способів поліпшення діелектричної стійкості ізоляції були створені модельні катушки, які зараз випробовуються на відповідність нормативам *JEC2000* (імпульсна перенапруга 350 кВ, максимальна перенапруга 140 кВ).

В університеті м. Нагая сумісно з *Forschungszentrum Karlsruhe Institute of Technical Physics (FZK)* за фінансової підтримки Міністерства освіти, науки і технології Японії пройшли випробування прототипу ВТНП струмообмежуючого трансформатора потужністю 100 кВА [199–201]. ВТНП трансформатор виконаний за схемою з „холодним” ярмом, охолоджується рідким азотом, а робоча температура його складає 77 К. Первинна обмотка трансформатора виконана мідною (6,6 кВ / 8,7 А), вторинна – намотана з ВТНП проводу 2-го покоління (210 В / 275 А). Створенню даного трансформатора передували роботи з макетом ВТНП струмообмежуючого трансформатора на основі ВТНП проводу 1-го покоління Ві-2212.

НП обмотка складається з двох секцій (рис. 4.8) – струмообмежуючої та трансформаторної.

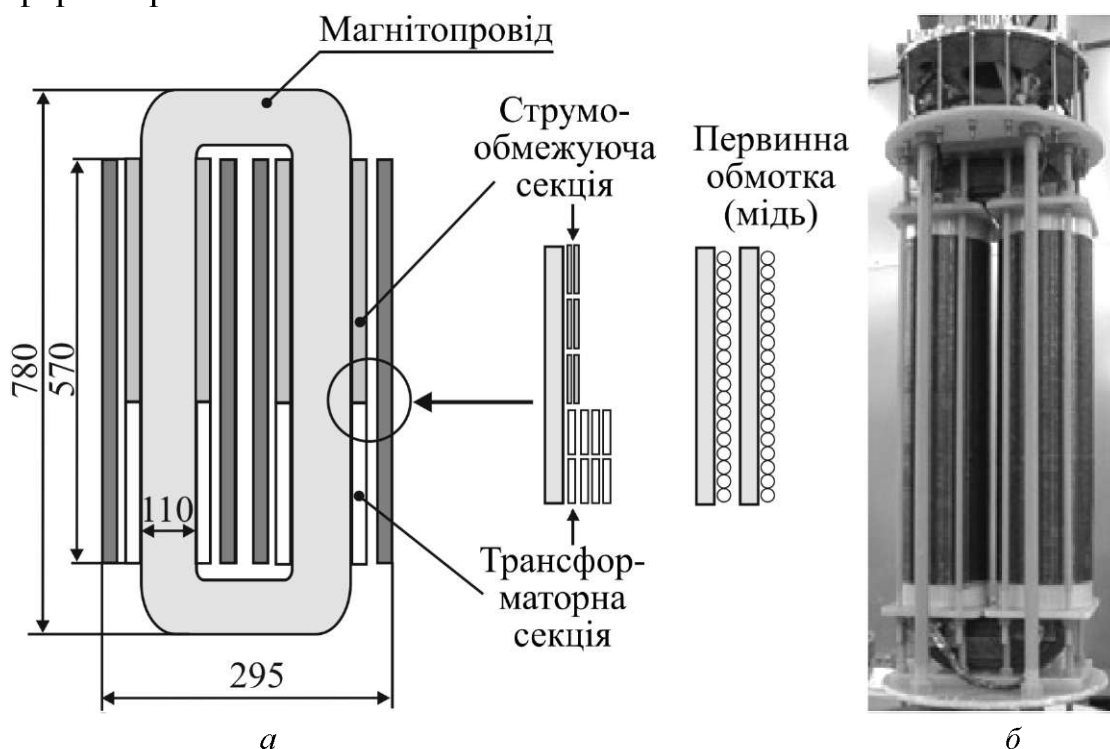


Рисунок 4.8 – ВТНП струмообмежуючий трансформатор потужністю 100 кВА (6,6 кВ / 210 В):  
*a* – конструкція; *б* – зовнішній вигляд

*Струмообмежуюча* секція намотана з ВТНП проводу шириною 12 мм з високим питомим опором. Товщина хастелоевої підложки складає 100 мкм, товщина шару YBCO – 1 мкм. ВТНП, отриманий за технологією хімічного осадження з газової фази, не має мідного покриття, а критичний струм його складає 131 А. Для забезпечення необхідної струмонесучої здатності намотка виконувалась двома провідниками паралельно.

*Трансформаторна* секція намотана з ВТНП проводу з низьким питомим опором. Для цього використовувалась стрічка з мідним стабілізуючим шаром шириною 4 мм із критичним струмом 71 А; намотка виконувалась чотирма стрічками паралельно.

Така конструкція дозволяє змінювати струмообмежуючі властивості трансформатора без впливу на його основні характеристики.

У ході роботи над проектом розробники досліджували різні способи паралельного з'єднання ВТНП стрічок – „підложка до підложки”, „ВТНП до підложки” і „підложка до ВТНП” і виявили велику розбіжність величин критичного струму (від 263 до 480 А) для різних конструкцій пакету з ВТНП стрічок. Найбільшого значення критичного струму вдалось досягти при з'єднанні стрічок „підложка до підложки”.

У ході стендових випробувань було виявлено, що трансформатор обмежує ударний струм з 980 до 516 А (рис. 4.9), а після припинення КЗ вторинна обмотка практично миттєво повертається у надпровідний стан.

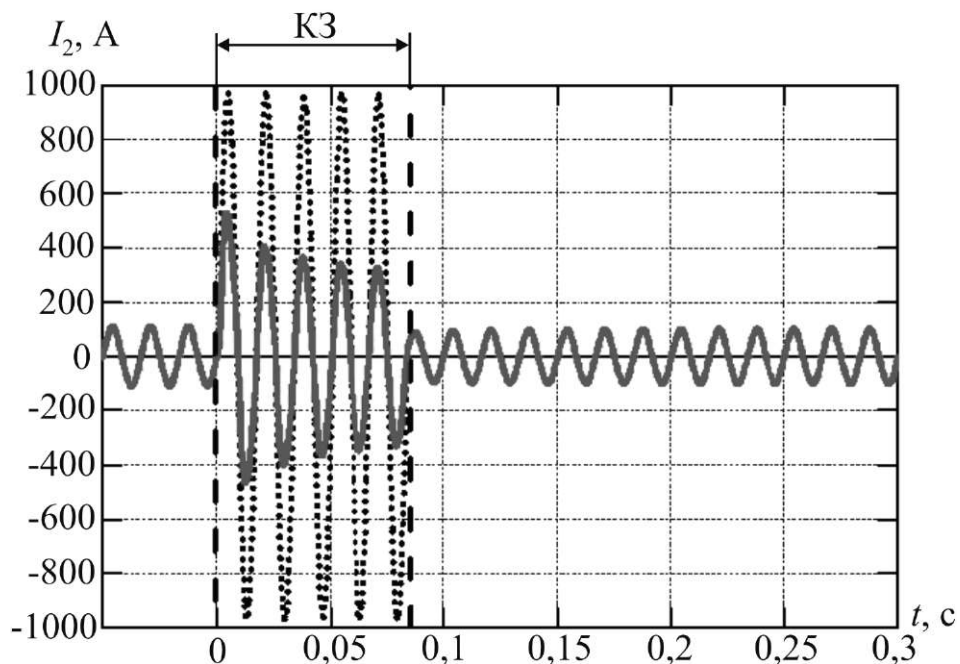


Рисунок 4.9 – Крива струму вторинної обмотки  $I_2$  ВТНП струмообмежуючого трансформатора при виникненні КЗ (пунктиром позначений очікуваний струм КЗ без струмообмеження)

Тепловиділення у кріостаті трансформатора, пов'язані з втратами на змінному струмі у надпровіднику і магнітопроводі, складають 94,2 Вт.

Очевидно, що наявність подібних пристроїв у передавальних та розподільних енергомережах призведуть до підвищення потужності та надійності енергосистеми.

У рамках десятирічної державної програми Південної Кореї *DAPAS*, мета якої – дослідження, розроблення і комерціалізація ВТНП пристроїв, Корейським політехнічним університетом *KPU* (*Korea Polytechnic University*) у 2005 р. був виготовлений і випробуваний при  $T = 65$  К однофазний ВТНП трансформатор потужністю 1 МВА на напругу 22,9 кВ, запланований у першій фазі програми *DAPAS* (2001–2003 рр.) [162–164, 202], у другій фазі – однофазний ВТНП трансформатор потужністю 5 МВА на напругу 154 кВ [165]. У рамках третьої фази (2007–2010 рр.) планується виготовити трифазний ВТНП трансформатор потужністю 100 МВА на напругу 154 кВ [166–169].

Стандартна потужність масляних трансформаторів на напругу 154 кВ у П. Кореї становить 60 МВА, складаються вони з трьох однофазних трансформаторів потужністю 20 МВА. Створення ВТНП трифазних трансформаторів потужністю 100 МВА дозволить замінити ними трансформатори 60 МВА в

рамках існуючої інфраструктури. Це накладає обмеження стосовно габаритів і маси трансформаторів, що розроблюються: висота має бути менше 7,6 м, ширина < 5,56 м, товщина < 2,45 м, вага < 35 т.

Основні параметри розроблених у рамках програми *DAPAS* ВТНП трансформаторів наведені у табл. 4.4 та 4.5.

Розроблений у 2001 р. однофазний ВТНП трансформатор потужністю 1 МВА із осердям броньового типу і „теплим” виконанням магнітопроводу має ВТНП обмотки, виготовлені зі стрічок виробництва *AMSC* на посиленій нержавіючій сталій підложці. Охолоджуються обмотки до температури 65 К переохолодженим рідким азотом, виконані вони у формі подвійних галет (двотискових котушок). Чергування модулів високої і низької напруги (відповідно, первинної і вторинної обмоток), розташованих на загальному стрижні магнітопроводу (див. рис. 4.3), веде до зниження динамічних втрат.

У 2006 р. були спроектовані однофазні трансформатори потужністю 5 та 33 МВА (табл. 4.5). Перший з них був призначений не для комерційного застосування, а для попередніх досліджень щодо створення у майбутньому трансформатора потужністю 100 МВА.

Трансформатор потужністю 33 МВА виготовлений із відводами, що дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації під навантаженням (*on load tap changers - OLTC*) [166]. Цей трансформатор стане однією фазою трифазного трансформатора потужністю 100 МВА. Трансформатор має третинну обмотку. Передбачається, що у трифазному трансформаторі первинна і вторинна обмотки будуть з'єднані зіркою, а третинна – трикутником, щоб усунути третю гармоніку струму у кожній фазі. Оскільки первинна і вторинна обмотки з'єднані зіркою, напруги на них будуть у  $\sqrt{3}$  раз менше, тобто 89,91 та 13,22 кВ.

Первинна обмотка розділена на дві частини, намотані обмотки на стрижень концентрично у наступному порядку: третинна, одна частина первинної, вторинна, друга частина первинної (рис. 4.10, *a*). Внутрішня частина первинної обмотки виконана у вигляді безперервного диска (рис. 4.10, *b*), а зовнішня – у вигляді двотискових котушок (подвійних галет), бо вона має відводи, що дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації відносно до навантаження. Ці відводи зображені на рис. 4.10, *в*.

Обидва, зазначені в табл. 4.5, трансформатори мають практично однакові вагу і габарити, однак, трансформатор потужністю 33 МВА має значно більші втрати на змінному струмі, ніж трансформатор потужністю 5 МВА (значно вище, ніж у 33/5 разів). Через це ретельні дослідження цих втрат були виконані для трансформатора потужністю 5 МВА [165].

Таблиця 4.4 Основні параметри ВТНП трансформаторів потужністю 1 МВА, розроблених у рамках першої фази програми *DAPAS*

Параметр	Значення	
Номінальна потужність, МВА	1	1
Рік виготовлення	2001	2003
Номінальна напруга (первинна / вторинна), кВ	22,9 / 6,6	
Номінальний фазний струм (первинний / вторинний), А	44 / 152	
Кількість фаз	1	
Частота, Гц	60	
<b>ВТНП обмотки</b>		
Кількість витків	888 / 256	832 / 240
Напруга кожного витка, В	25,8	27,5
Матеріал стрічки	Ві-2223	
Довжина стрічки, м	1248 / 1454	
Ширина стрічки, мм	4,1	
Товщина стрічки, мм	0,203	
Критичний струм стрічки, А	115 (77 К, власне поле)	
Кількість стрічок в обмотці (первинній / вторинній)	1/4	
Кількість обмоток первинних / вторинних	8/4	40/20
Зовнішній діаметр, мм	472/488	
Внутрішній діаметр, мм	416/416	
Конструкція ВТНП обмотки	див. рис. 4.3	
Робоча температура, К	65	
<b>Сталеве осердя</b>		
Матеріал	Кремнієві сталеві пластини	
Висота, мм	1384	1580
Ширина, мм	998	1340
Поперечний переріз, см <sup>2</sup>	590	715,16
Максимальна індукція, Тл	1,7	1,48
<b>Кріостат</b>		
Матеріал	<i>GFRP</i>	
Зовнішній діаметр, мм	698	948
Внутрішній діаметр, мм	300	334
Висота, мм	1089	1200

*GFRP* – *glass fiber reinforced plastic* – пластик, посилений скловолокном

У результаті цих досліджень був виявлений помітний вплив на величину втрат на змінному струмі наступних параметрів трансформатора:

- зазору між обмотками і зазору між секціями в обмотці (пряма пропорційність);
- величини напруги кожного витка (зворотна пропорційність);
- розташування обмоток навкруг центрального стрижня, а також майже відсутність впливу висоти вікна між ярами та ширини вікна між стрижнями.

Таблиця 4.5 Основні параметри ВТНП трансформаторів, розроблених у рамках другої фази програми *DAPAS*

Параметр	Значення	
Номінальна потужність, МВА	5	33
Рік виготовлення	2006	2006
Номінальна напруга (первинна / вторинна / третинна), кВ	89,91 / 13,22 / 6,6	
Номінальний фазний струм (первинний / вторинний / третинний), А	56,2 / 378,3 / 252,5	370 / 2500 / 1600
Кількість фаз	1	
Частота, Гц	60	
ВТНП обмотки		
Кількість витків	888 / 132	
Напруга кожного витка, В	100	
Матеріал стрічки	YBCO (плівкові, або покривні)	
Довжина стрічки, км	5,5	
Ширина стрічки, мм	4	
Товщина стрічки, мм	0,2	
Критичний струм стрічки, А	120 (77 К, власне поле); 228 (69 К, власне поле)	160 (69 К, 0,18 Тл)
Кількість стрічок в обмотці (первинній / вторинній / третинній)	1 / 6 / 4	5 / 30
Кількість секцій в обмотці (первинній / вторинній / третинній)	296 / 132 / 165	5 / 30
Конструкція ВТНП обмотки	див. рис. 4.10	
Робоча температура, К	69	
Втрати на змінному струмі, Вт	400	
Сталеве осердя		
Висота, мм	2440	
Ширина, мм	2700	
Поперечний перетин, см <sup>2</sup>	520	
Максимальна індукція, Тл	1,5	
Вага, т	14,4	
Кріостат		
Матеріал	GFRP	
Зовнішній діаметр, мм		1129
Внутрішній діаметр, мм		369

Для третьої фази проекту, для трифазного трансформатора потужністю 100 МВА, у 2006 р. було спроектовано систему охолодження, яка складається з трьох основних кріостатів, що містять ВТНП обмотки, вторинного кріостата і одного холодного боксу, що постачає рідкий азот п'яти кріокулерам, трьом кріонасосам та трьом теплообмінникам (рис. 4.11) [166, 167]. Переохолоджений до температури 65 К рідкий азот циркулює і охолоджує обмотки; проектне значення робочої температури складає 69 К.

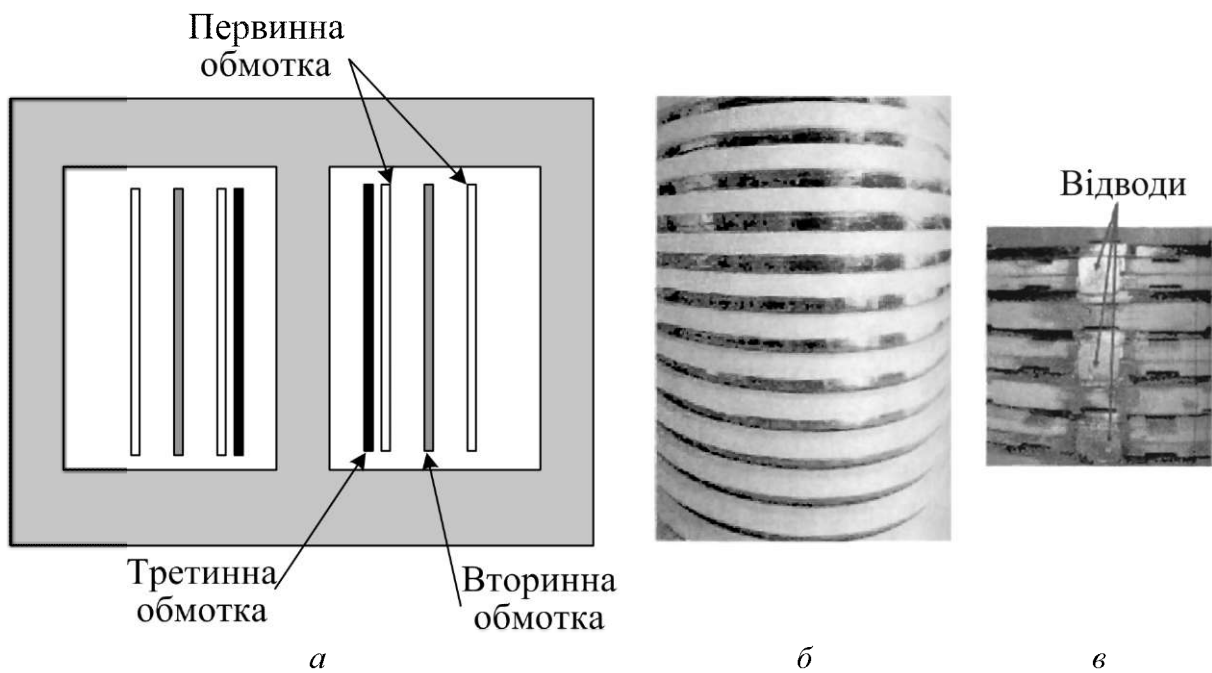


Рисунок 4.10 – Розташування обмоток ВТНП трансформатора потужністю 33 МВА із відводами *OLTC*, які дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації під навантаженням

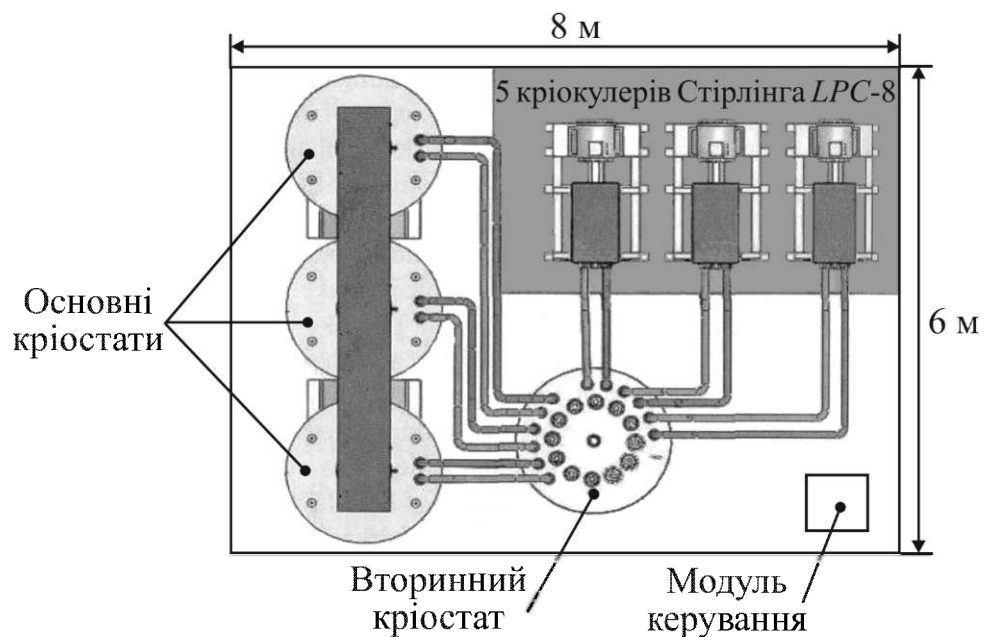


Рисунок 4.11 – Розташування компонентів системи охолодження трифазного трансформатора потужністю 100 МВА (*DAPAS*)

Розраховані теплоприпливи складають близько 25 кВт (табл. 4.6), отже система містить 5 криокулерів Стірлінга *LPC-8* із холодопродуктивністю 5,6 кВт кожний при температурі 65 К, загальна їхня холодопродуктивність складає 28 кВт. Витрата холодоагенту – 150 л/хв на фазу, а витрата електричної потужності криокулера – 480 кВт.

Таблиця 4.6 – Теплоприпливи трифазної ВТНП трансформаторної системи потужністю 100 МВА (DAPAS)

Компонент	Теплоприпливи, кВт
Основний кріостат	1,65
Вторинний кріостат	0,125
Передавальна лінія	0,093
Втрати на змінному струмі (на 3 фази)	23,1
Загалом	24,971

#### 4.4. Тягові трансформатори

Фахівцями японського науково-дослідного інституту залізничної техніки (*Railway Technical Research Institute*, Токіо), за підтримки Міністерства Земель, Інфраструктури, Транспорту і туризму Японії, був спроектований та виготовлений дослідний зразок надпровідного тягового трансформатора (рис. 4.12, табл. 4.1), призначеного для встановлення на високошвидкісний рухомий склад на новій лінії швидкісних електропоїздів „Сінкансен” („*Shinkansen*”) між станціями Сін-Осака („*Shin-Osaka*”) і Кагосіма-Тюо („*Kagoshima Chuo*”) [128, 171–173, 203].

Лінія „Сінкансен” електрифікована за системою однофазного змінного струму 25 кВ, 60 Гц, ширина колії європейська (1435 мм).

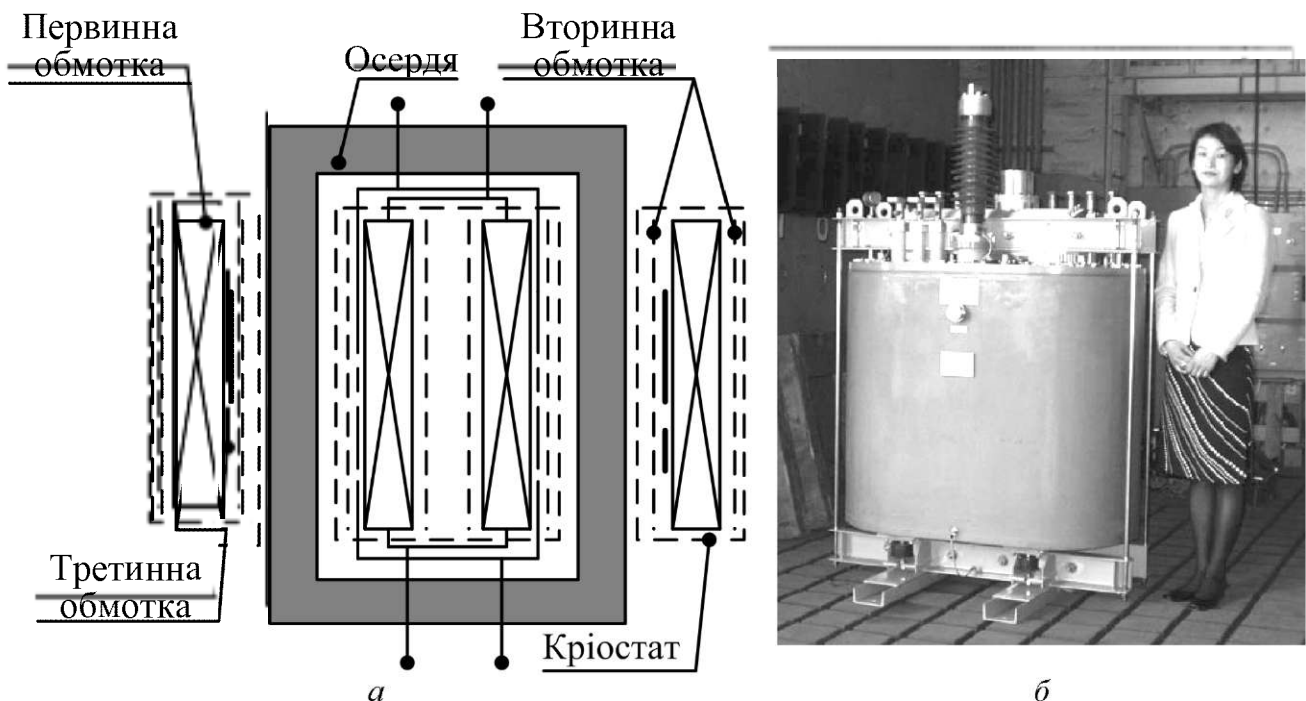


Рисунок 4.12 – Надпровідний тяговий трансформатор:  
а – конструкція; б – зовнішній вигляд

Номінальна потужність НП трансформатора становить 4 МВА, робочі напруги 25 і 1,2 кВ. Обмотки трансформатора намотані із ВТНП стрічки на основі

Ві-2223 у срібній матриці. Для охолодження обмоток до температури 66 К використовується кріокулер. Оскільки трансформатор працює разом з перетворювальним агрегатом (який включає регулятор частоти і фазорозщеплювач), що живить асинхронний тяговий електродвигун, струм у його обмотках має не синусоїдний характер, що дає додаткові тепловиділення, пов'язані із втратами у надпровідних обмотках і магнітопроводі. Для зниження навантаження на систему кріогенного забезпечення трансформатор виконаний за схемою з „теплим” магнітопроводом. Щоб знизити втрати в обмотках була спеціально оптимізована конструкція транспонованого ВТНП провідника. НП трансформатор пройшов повний цикл випробувань, що включав: дослід холостого ходу, дослід короткого замикання, високовольні випробування, роботу під навантаженням і випробування на вібростенді, який імітує коливання, характерні для високошвидкісних поїздів, що курсують по лінії Сінкансен, де планується використати трансформатор. Втрати холостого ходу трансформатора склали 0,71 кВт, втрати при номінальному навантаженні 6,2 кВт, ККД 99,8 %. НП трансформатор важить близько 2 т.

У силу специфіки експлуатації технічні вимоги і критерії економічної ефективності для електричного устаткування, що використовується на залізницях, помітно відрізняються від аналогічних для устаткування розподільних мереж загального призначення. Залізниці електрифіковані як на постійному, так і на змінному струмі. Використання надпровідного устаткування на змінному та на постійному струмі дозволить домогтися значної економії електроенергії і збільшення надійності тягових мереж (тобто мереж, що живлять електропоїзди).

У Німеччині у жовтні 1996 р. стартував проект, ціллю якого була демонстрація майбутніх перспектив НП трансформаторів для залізниць з робочою частотою 16,7 та 50 Гц, які є стандартними для постачальних енергомереж у Європі – 15 кВ / 16,7 Гц та 25 кВ / 50 Гц. На рис. 4.13 поданий однофазний ВТНП трансформатор потужністю 1 МВА (25 кВ / 1,389 кВ, 50 Гц) для приміських поїздів, виготовлений компанією *Siemens AG* [155–157, 204] (див. табл. 4.1). Розробленню трансформатора потужністю 1 МВА передували розроблення, виготовлення та випробування однофазного трансформатора потужністю 100 кВА (50 Гц, 5,5 кВ / 1,1 кВ).

Однофазний ВТНП трансформатор потужністю 1 МВА має дві ідентичні обмотки низької напруги (НН), намотані на окремі стрижні. Кожна з обмоток НН розділена на дві частини, одна з них намотана усередині обмотки високої напруги (ВН), а друга – зовні (рис.4.14). Обмотки ВН, намотані на окремих

стрижнях, увімкнені паралельно, а внутрішня та зовнішня частини кожної з обмоток НН – послідовно. Обидві частини кожної з обмоток НН намотані в один шар по 56 витків у кожному, тобто кожна з обмоток НН має 112 витків. Внутрішній та зовнішній діаметри обмоток НН складають, відповідно, 234 та 385 мм. Обидві обмотки ВН укладанням накладенням у стек дев'яти катушок по 224 витки у кожній, із загальним числом витків 2016. Діаметр обмоток ВН складає 312 мм.

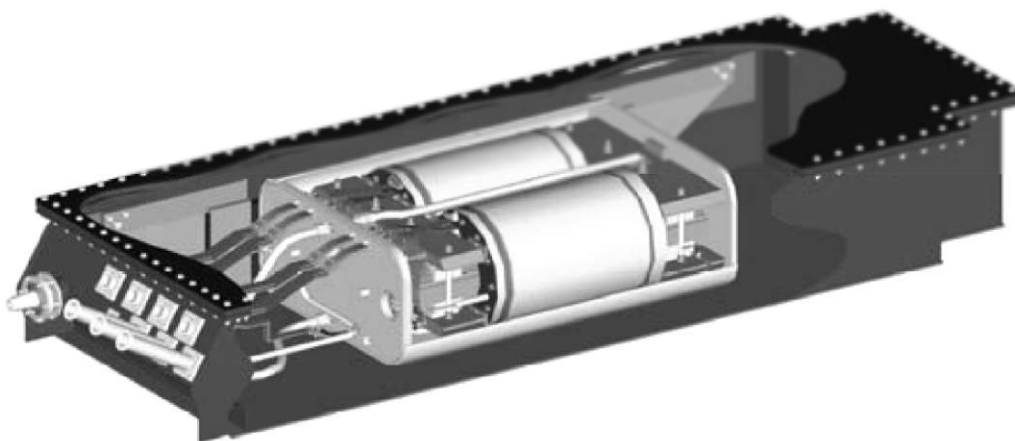


Рисунок 4.13 – Однофазний ВТНП трансформатор для приміських поїздів потужністю 1 МВА (*Siemens*)

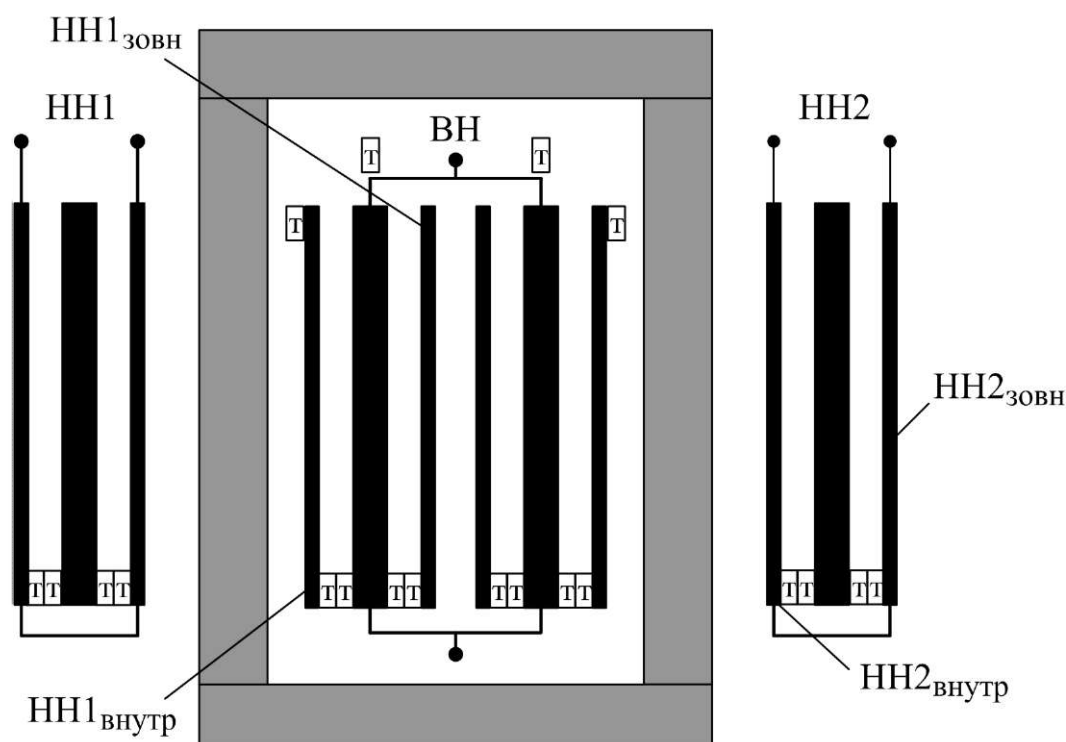


Рисунок 4.14 – Схематична конструкція обмоток та їхніх відводів однофазного ВТНП трансформатора потужністю 1 МВА (*Siemens*) із позначенням термодатчиків

Обмотки намотані з Ві-2223 стрічок, виготовлених у 1999 р. *Vacuumschmelze GmbH*. Стрічка виконана у срібній матриці із срібно-магнієвим

екраном, нетвістована, її ширина та товщина складають, відповідно, 3,65 та 0,258 мм і містить вона 55 жил. Критичний струм коливається від 36 до 56 А.

Розміри осердя із обмотками (у зібраному стані): 406×818×1080 мм, маса складає 1010 кг.

Система охолодження складається з чотирьохциліндрового криогенератора Стірлінга, електричного двигуна, об'єднуючого криостата та модуля керування. З ціллю економії холодна головка не була оптимізована під температуру 66 К. Робочий газ криогенератора – гелій. Номінальна потужність двигуна складає 45 кВт. Криогенератор має водяне охолодження.

Номінальна вихідна температура рідкого азоту регулюється швидкістю двигуна (900–1600 об/хв) і чотирма нагрівачами (кожний від 0 до 1355 Вт) на холодній головці. *GFRP* криостат з'єднує криогенератор із осердям з обмотками за допомогою вакуумних труб з рідким азотом. Він містить частотно-регульовальний кріонасос з максимальною частотою обертання 6000 об/хв (для газоподібного азоту) та 3000 об/хв (для рідкого азоту).

У 2001 р. виготовлений трансформатор пройшов системний тест за наступною схемою: синхронний генератор або трифазний трансформатор живлять ВТНП трансформатор потужністю 1 МВА, до якого підключений подвійний *IGBT*-перетворювач із проміжною ланкою постійного струму. До виходу перетворювача приєднано трифазне активно-індуктивне навантаження (або асинхронний двигун). Скінчився цей проект у вересні 2001 р., і з 2003 р. ВТНП трансформатори працюють на приміських поїздах у залізничній компанії *DB AG*.

Лідер у розробленні проводів на основі дібориду магнію ( $MgB_2$ ) – компанія *Hyper Tech Research, Inc.* (США) – за контрактом із ВМС США (*US Navy*) розробляє трансформатор і індуктор для живлення корабельного двигуна (рис. 4.15) [41, 205].

На другому етапі розроблення мають бути розроблені діборидмагнієві проводи з низькими втратами на змінному струмі і демонстраційна котушка для трансформатора потужністю 12,4 кВА, а на третьому етапі – 3-фазний трансформатор потужністю 3–5 МВА.

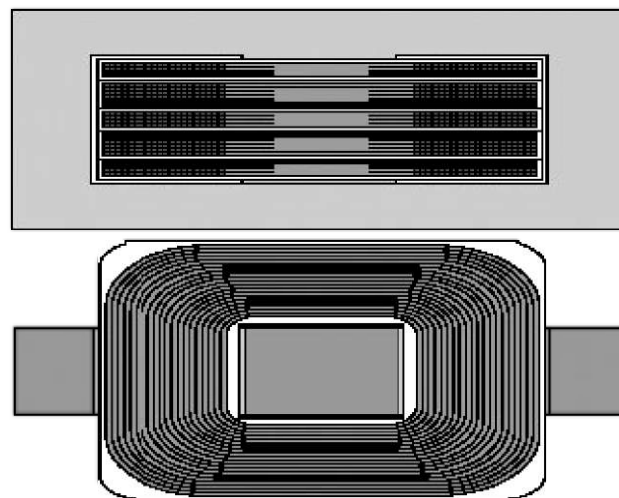


Рисунок 4.15 – Конструкція трансформатора потужністю 12,4 кВА (II фаза контракту з *Navy*)

#### 4.5. Дослідницькі роботи Росії

У Росії у 2006 р. колективом підприємств і установ Санкт-Петербурга, Москви та Єкатеринбурга закінчене виготовлення дослідної автономної електроенергетичної установки потужністю 50 кВт (рис. 3.33), одним з компонентів якої є ВТНП трансформатор потужністю 60 кВА з магнітопроводом із аморфної сталі [206, 207]. Його основні параметри наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 Основні параметри ВТНП трансформатора (Росія)

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВА	60
Номінальна лінійна напруга, В	690 / 400
Номінальний фазний струм, А	50,2 / 86,6
Частота, Гц	50
Напруга короткого замикання, %	2,1
Витрата ВТНП стрічки на 3 фази, м	610
Сумарна вага активних матеріалів, кг	100
Маса, кг	150

Дослідний зразок трифазного ВТНП трансформатора броньового типу номінальною потужністю 60 кВА (рис. 4.16) відрізняється малою масою (удвічі меншою, ніж у традиційного „теплого” трансформатора з масляним охолодженням, наприклад, ТМ 63 / 6), компактністю і малими втратами. Створенню цього трансформатора передували успішні випробування однофазної моделі потужністю 1 кВА, які дозволили вибрати оптимальні розміри магнітопроводу, що забезпечують мінімальну витрату надпровідника. Слід зазначити, що величина напруги короткого замикання у ВТНП трансформаторі в кілька разів нижче, ніж у трансформаторах традиційного виконання, що призводить до зростання сталого струму КЗ. З одного боку, це вимагає спеціальних заходів щодо обмеження струмів КЗ, з іншого боку, при роботі паралельно зі звичайними трансформаторами ВТНП трансформатор прийме на себе максимальне навантаження.

Обмотки трансформатора намотані із ВТНП стрічки Ві-2223 у срібній матриці перетином  $0,3 \times 4,3$  мм<sup>2</sup>. Робоча температура трансформатора від 77,3 до 64 К. Магнітопровід броньового типу виконаний з аморфної сталі марки 5БДСР. Результати раніше проведених досліджень довели, що питомі втрати в магнітопроводі з аморфної сталі 5БДСР приблизно у 20 разів нижче втрат у звичайній електротехнічній сталі. Броньове осердя намотувалось з окремих галет, а потім збиралось на нержавіючому каркасі.

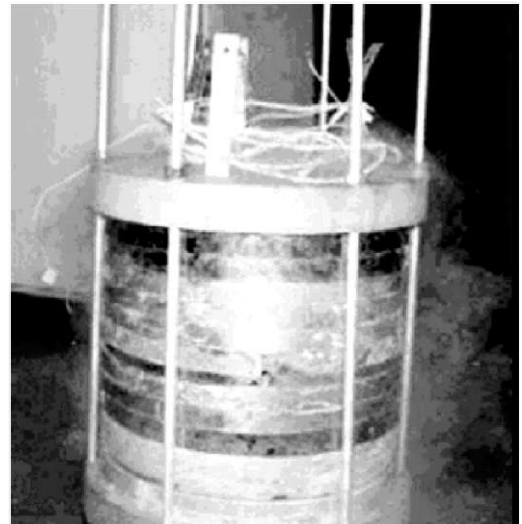
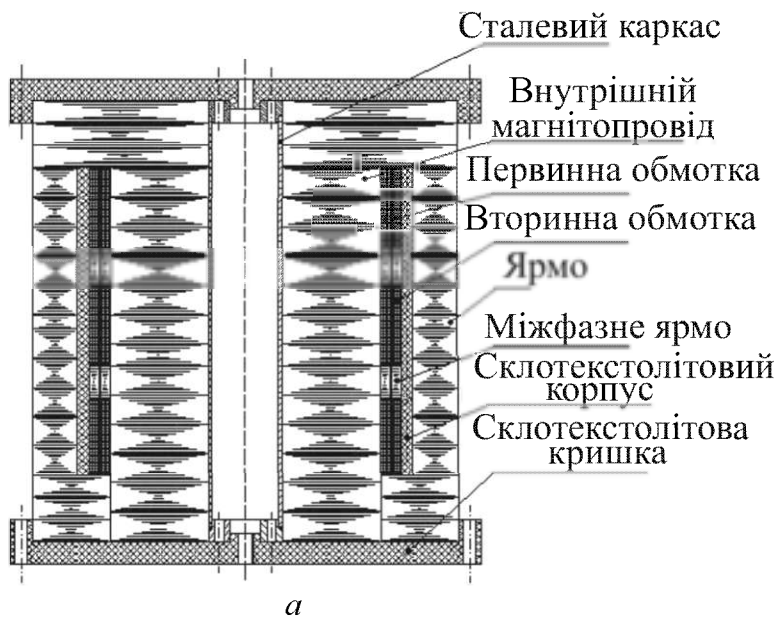


Рисунок 4.16 – Конструкція трифазного ВТНП трансформатора потужністю 60 кВА (а) і зовнішній вигляд перед установкою у склопластиковий кріостат (б)

Котушки фаз трансформатора розташовуються вертикально одна над одною. Корпусна ізоляція виконана зі склотканини, просоченою епоксидною смолою. Розроблена конструкція трансформатора забезпечує сприятливий розподіл магнітних полів у зоні ВТНП обмоток і є ремонтпридатною. Відпрацьовано варіант охолодження ВТНП трансформатора від кріокулера.

Таким чином, можна констатувати, що в більшості розвинених країн світу проводяться всебічні і системні роботи, спрямовані на організацію виробництва і впровадження в електричні мережі трансформаторів з ВТНП обмотками.