

ВИКОРИСТАННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРОЯХ

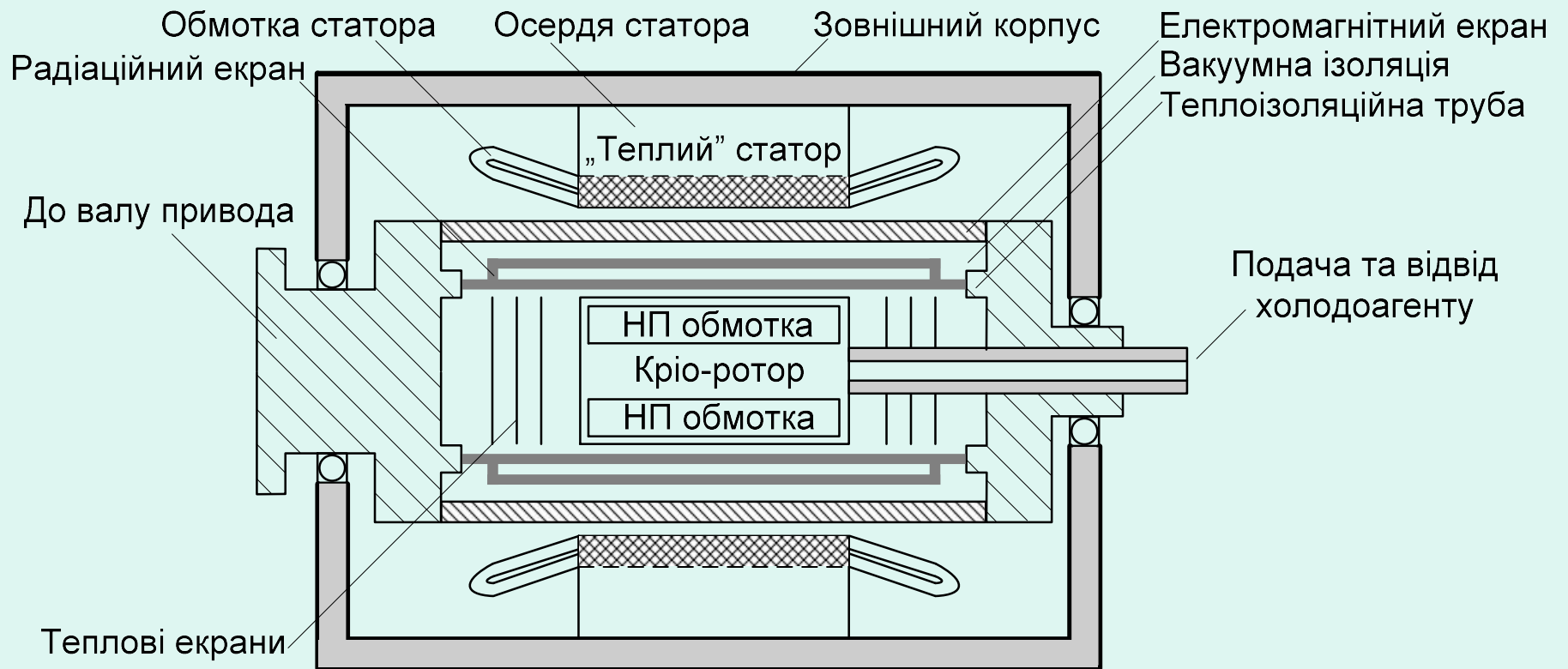
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Надпровідникові генератори змінного струму

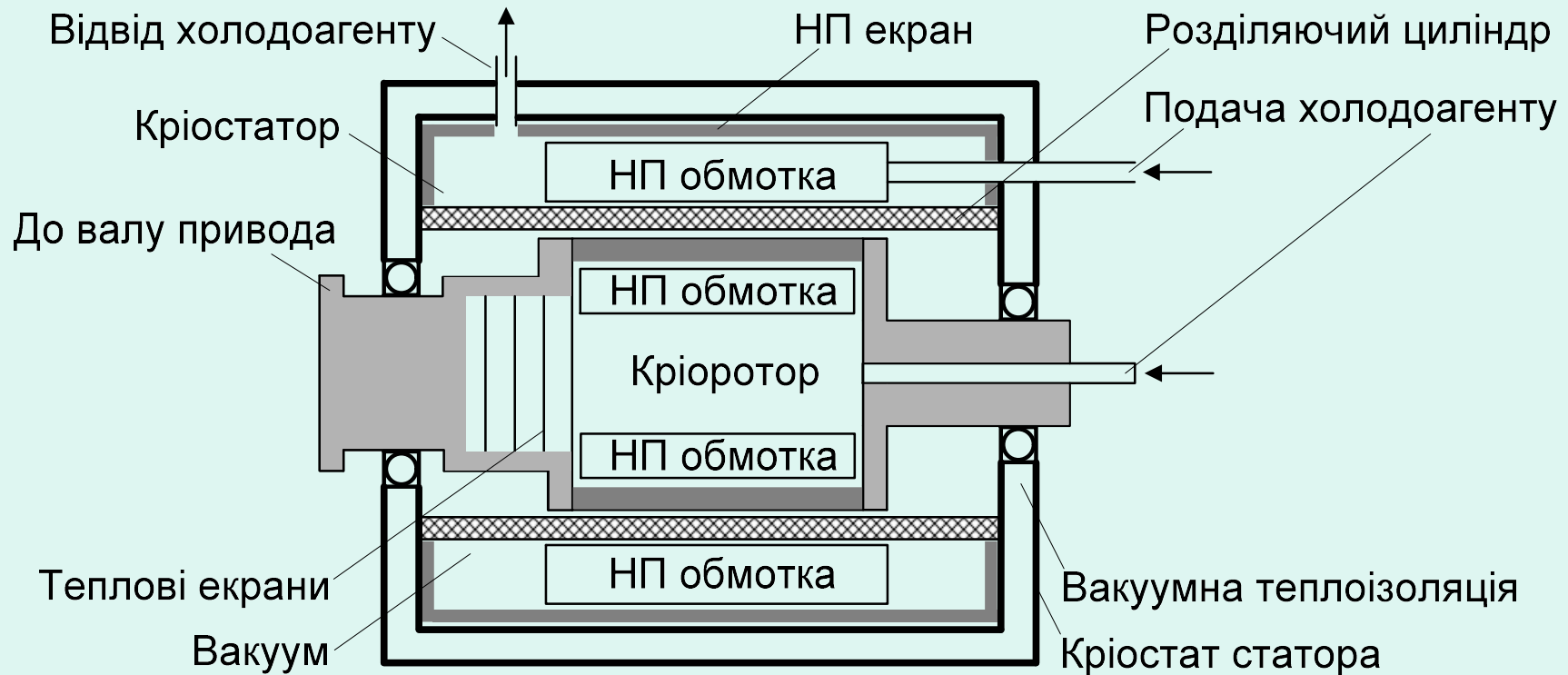
- забезпечується підвищення ККД вище 99 % з одночасним зменшенням маси і об'єму (до 60 %).
- знизити експлуатаційні і амортизаційні витрати, зменшити забруднення навколишнього середовища на одиницю виробленої енергії.
- генерувати електроенергію з напругами ліній електропередачі, що виключає необхідність установки спеціальних трансформаторів на генеруючих станціях.
- дозволяють підвищити стабільність енергосистеми:
 - 1) підвищення динамічної стійкості за рахунок більш низького реактивного опору.
 - 2) підвищення статичної стійкості і стабільності напруги за рахунок підвищення максимально допустимої напруги при роботі з низьким збудженням.
- 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 надпровідникових пристроїв.
- НП генератор може працювати як синхронний компенсатор, тобто генерувати реактивну потужність.

Основні конструктивні схеми турбогенераторів з надпровідними обмотками (кріотурбогенераторів)

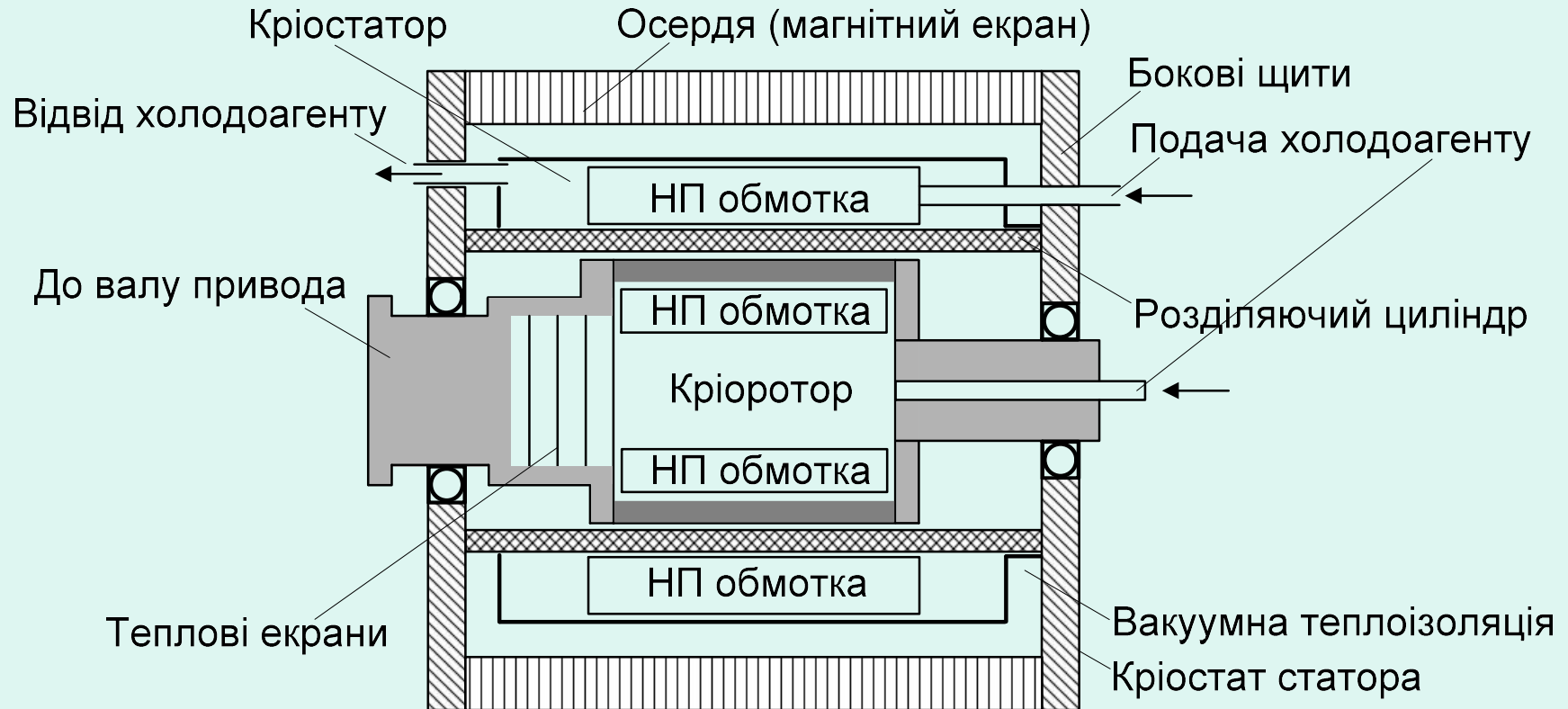
1 - гібридна схема (традиційна схема з НП обмоткою збудження)



2 - Повністю надпровідний КТГ (НП обмотки ротора і статора, НП екран)



3 - НП обмотки ротора і статора, „теплий” магнітний екран (шихтоване осердя)



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 обмотка ротора і статора, НП екран	НП обмотки ротора і статора, магнітний екран

Порівняльні характеристики КТГ та турбогенераторів з водневим і водяним охолодженням

Потужність, МВт	Охолодження ротору	Щільність струму в обмотці ротору, А/мм ²	Масо 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	<i>Водневе</i>	9,5	55,8	5,8	1,03	98,66
300	<i>5К, надпровідність</i>	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

НП генератор КТГ-20 потужністю 20 МВт на дослідному стенді

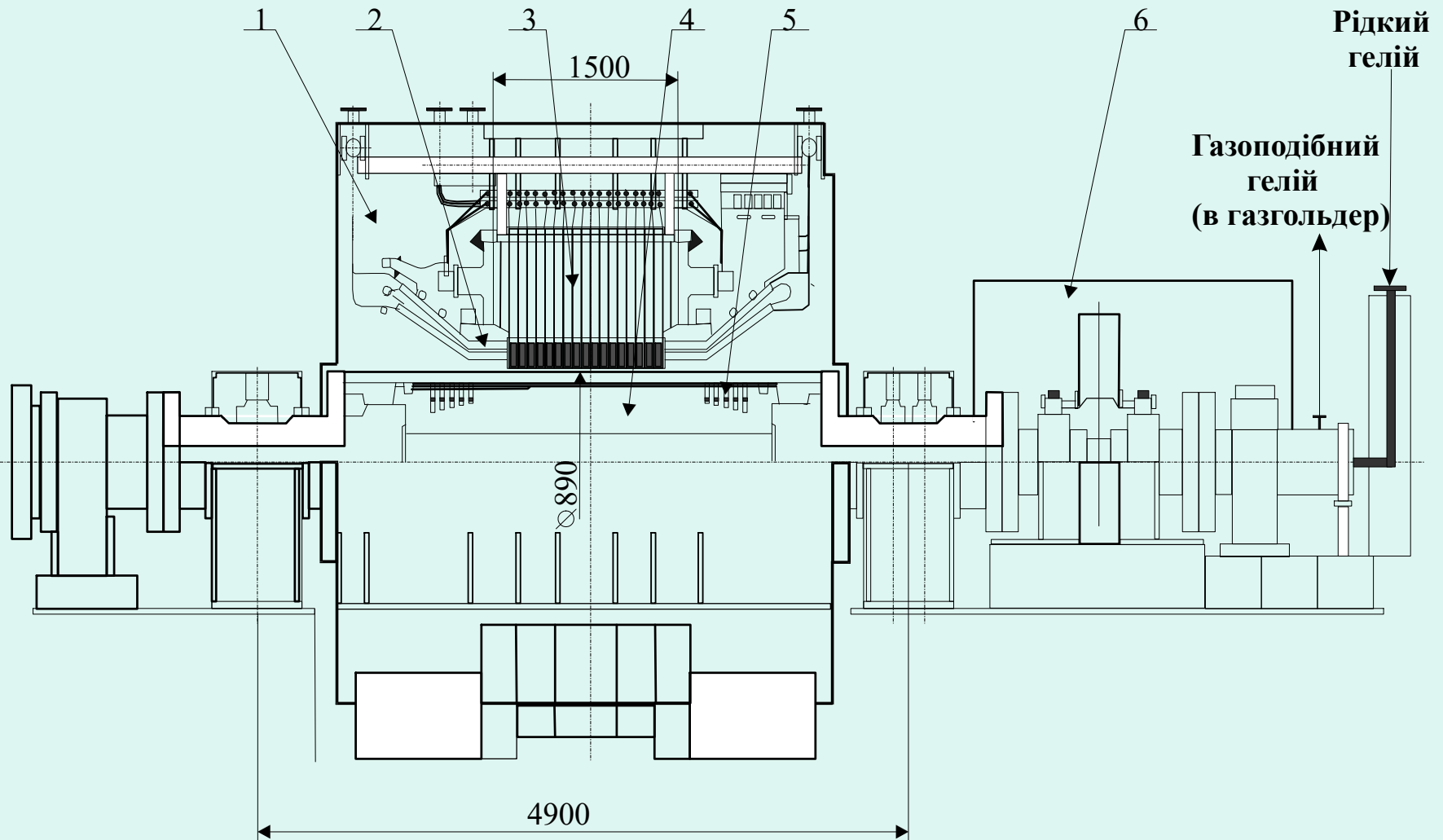


На початку 80-х кріотурбогенератор потужністю 20 МВт був створений компанією *General Electric* (США). Одночасно дослідний зразок КТГ такої потужності був розроблений і виготовлений у ВНДІ Електромаш. Він був встановлений в енергосистемі і досліджений при роботі в режимі синхронного компенсатора



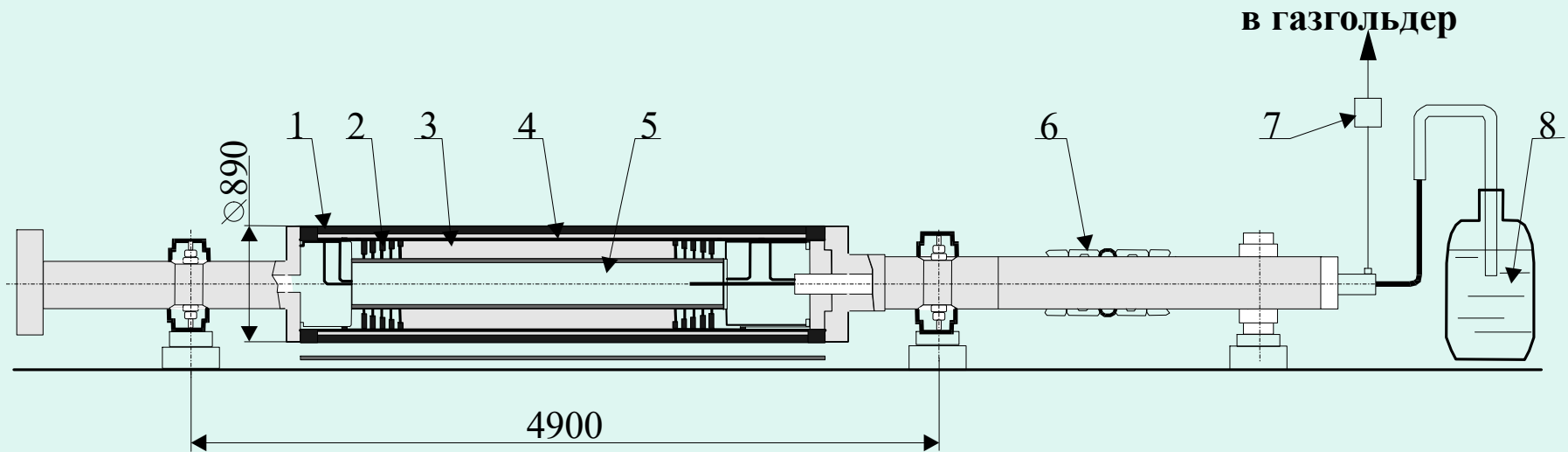
Генератор *Super-GM* потужністю 70 МВт (Японія)
У 2000 р. проект увінчався створенням промислового НТНП генератора з рекордною вихідною потужністю в **70 МВт**

Конструктивна схема кріотурбогенератора потужністю 70 МВт



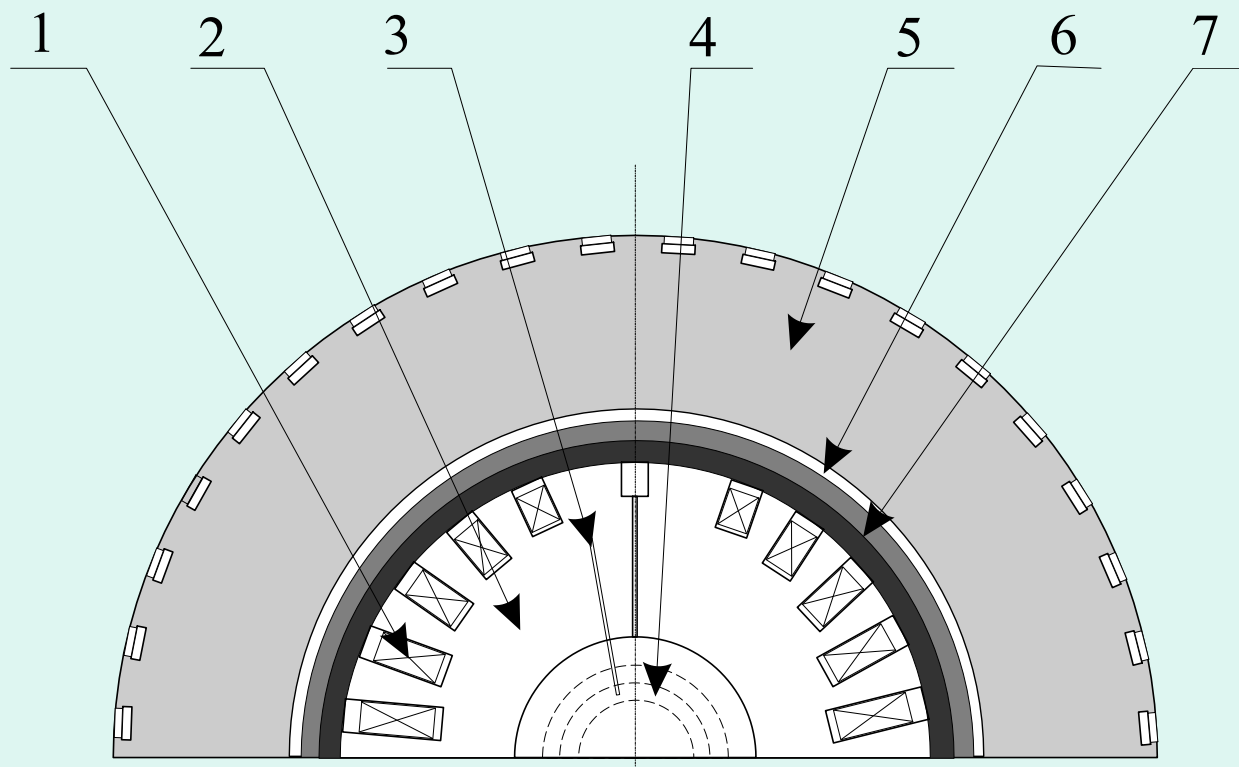
1 – статор; 2 – обмотка статору з водяним охолодженням; 3 – осердя статору; 4 – ротор; 5 – НП обмотка збудження; 6 – щітковий апарат

Ротор кріотурбогенератора потужністю 70 МВт



- 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

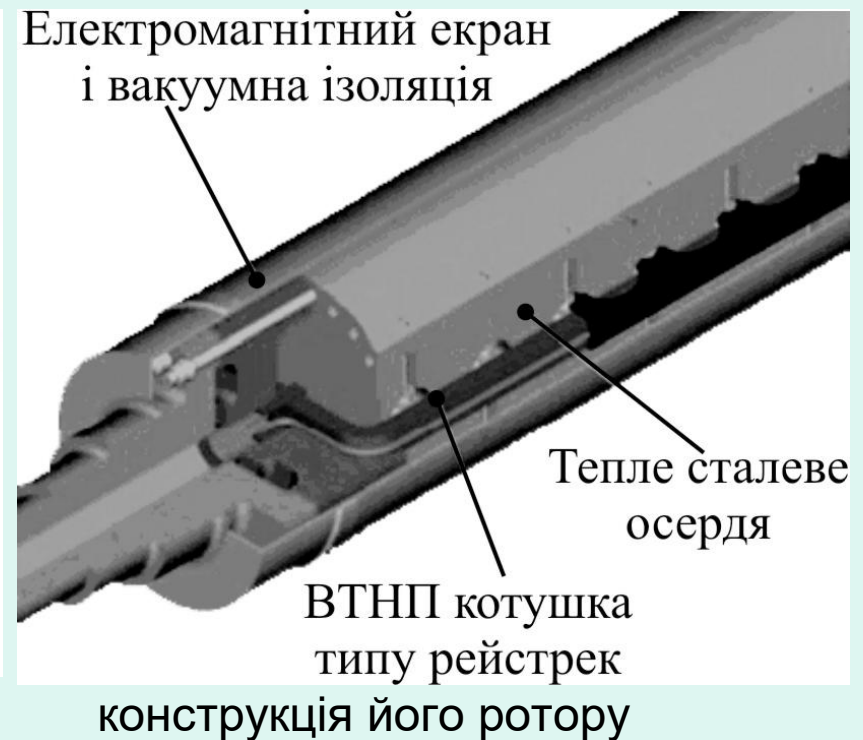
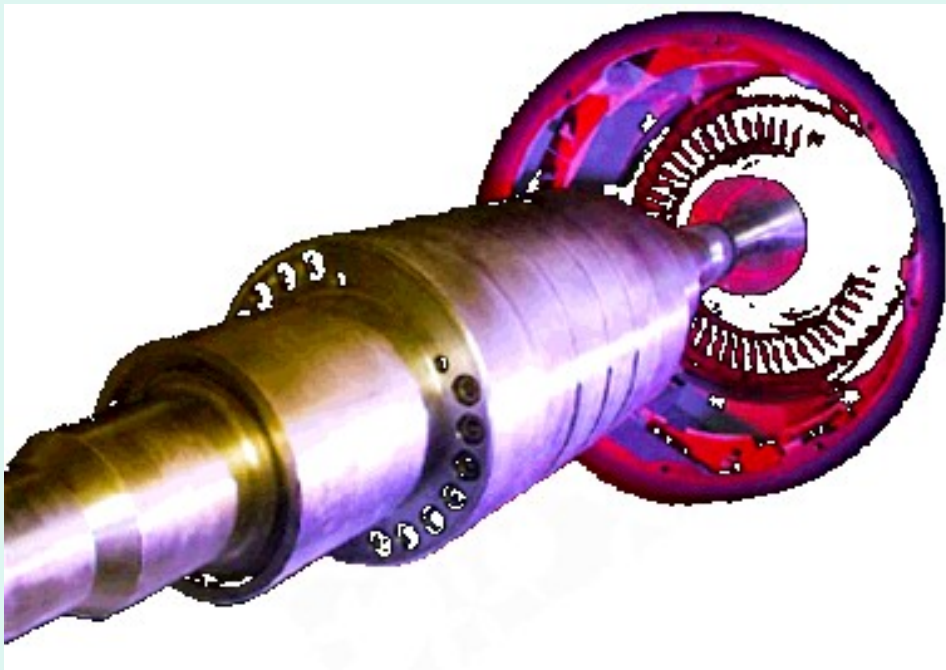
Переріз ротору кріотурбогенератору



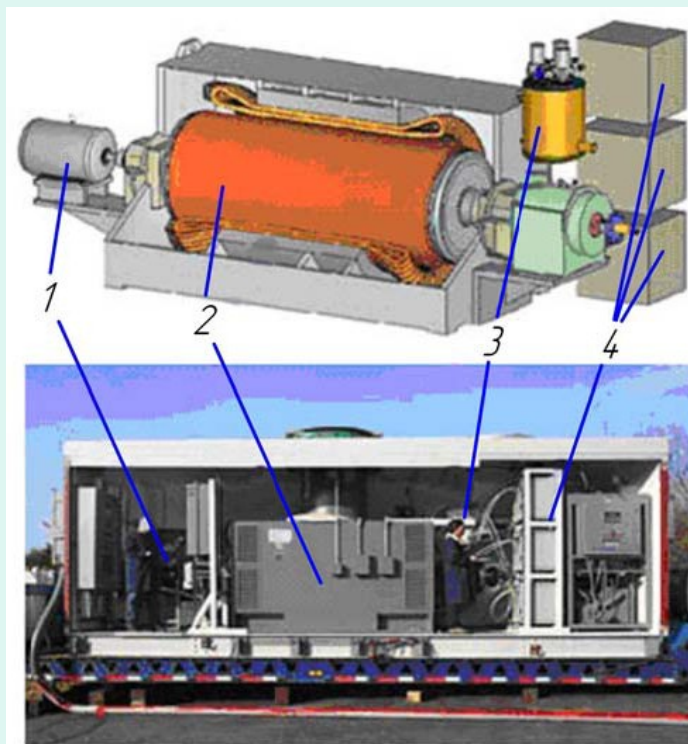
- 1 – котушки НП обмотки збудження;
- 2 – опорна конструкція обмотки збудження;
- 3 – датчик рівня рідкого гелію;
- 4 – рідкий гелій;
- 5 – теплий екран з демпферною решіткою;
- 6 – вакуумний проміжок;
- 7 – холодний екран.

Генератори з ВТНП обмотками

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



динамічний синхронний компенсатор з надпровідниковими обмотками



НПДСК
SuperVAR

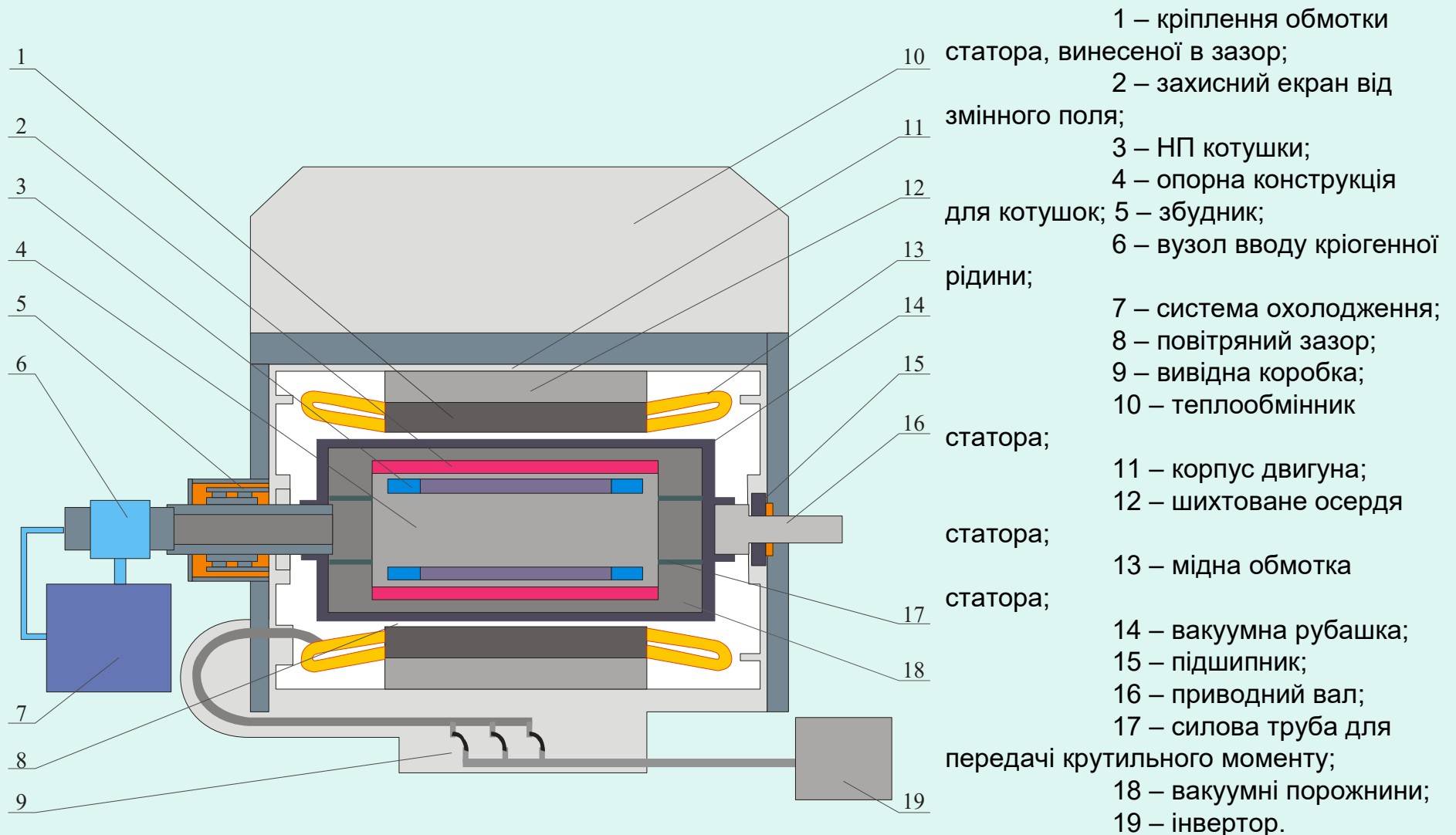
1 – пусковий електродвигун,
2 – синхронний компенсатор,
3 – кріокулер,
4 – компресори кріокулера.

2003 р. Перший прототип НПДСК із номінальною реактивною потужністю ± 8 Мвар напругою 13,8 кВ був випробуваний протягом 2004-2005 р. у мережі електричної компанії *TVA*, що живить дугову піч на сталеплавильному заводі у м. *Gallatin* успішно працює в одній з електричних мереж штату Огайо

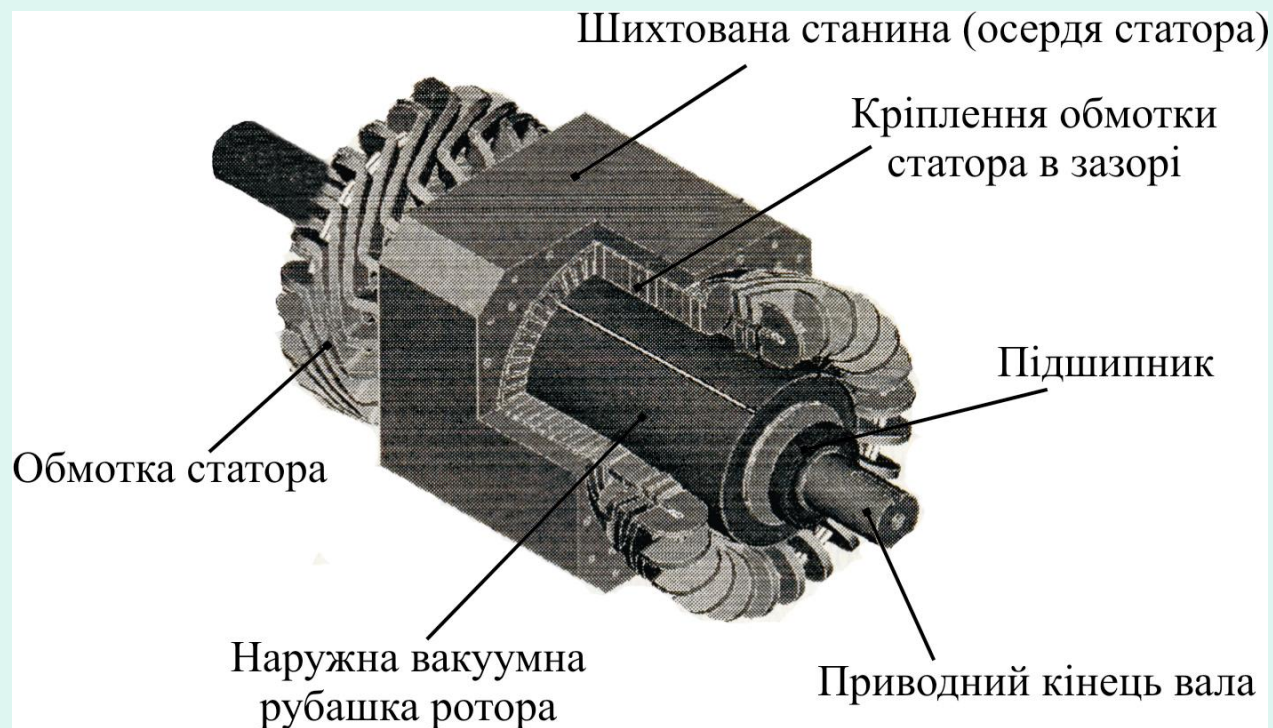
Параметр	Значення
Номінальна потужність, МВА	± 12 (промисловий варіант)
Лінійна напруга, кВ	13,8
Діапазон робочих температур навколишнього середовища, °С	-30...+50
Втрати	1,5 % від номіналу при 12 МВА, разом із потужністю пускового двигуна)– 50 кВт, 480 В

Стан розробок надпровідних електродвигунів

ВТНП двигуна потужністю 1000 к.с. (740 кВт)



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



Захисний екран від змінного магнітного поля охоплює ВТНП котушки обмотки збудження. Він прикріплений на обох кінцях до фланців холодної зони для гасіння коливань крутільного моменту на випадок відмови. Якірні обмотки і каркас охолоджуються водою за допомогою розташованих на кінцях охолоджувальних труб.

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.

В 2005 р. японський науково-промисловий консорціум розробив перший у світі ВТНП двигун практичного рівня на базі вісмутової кераміки і успішно завершив виготовлення суднової рушійної системи із цим двигуном у вигляді гондоли із гвинтом



Технічні характеристики

ВТНП двигуна і рушійної системи:

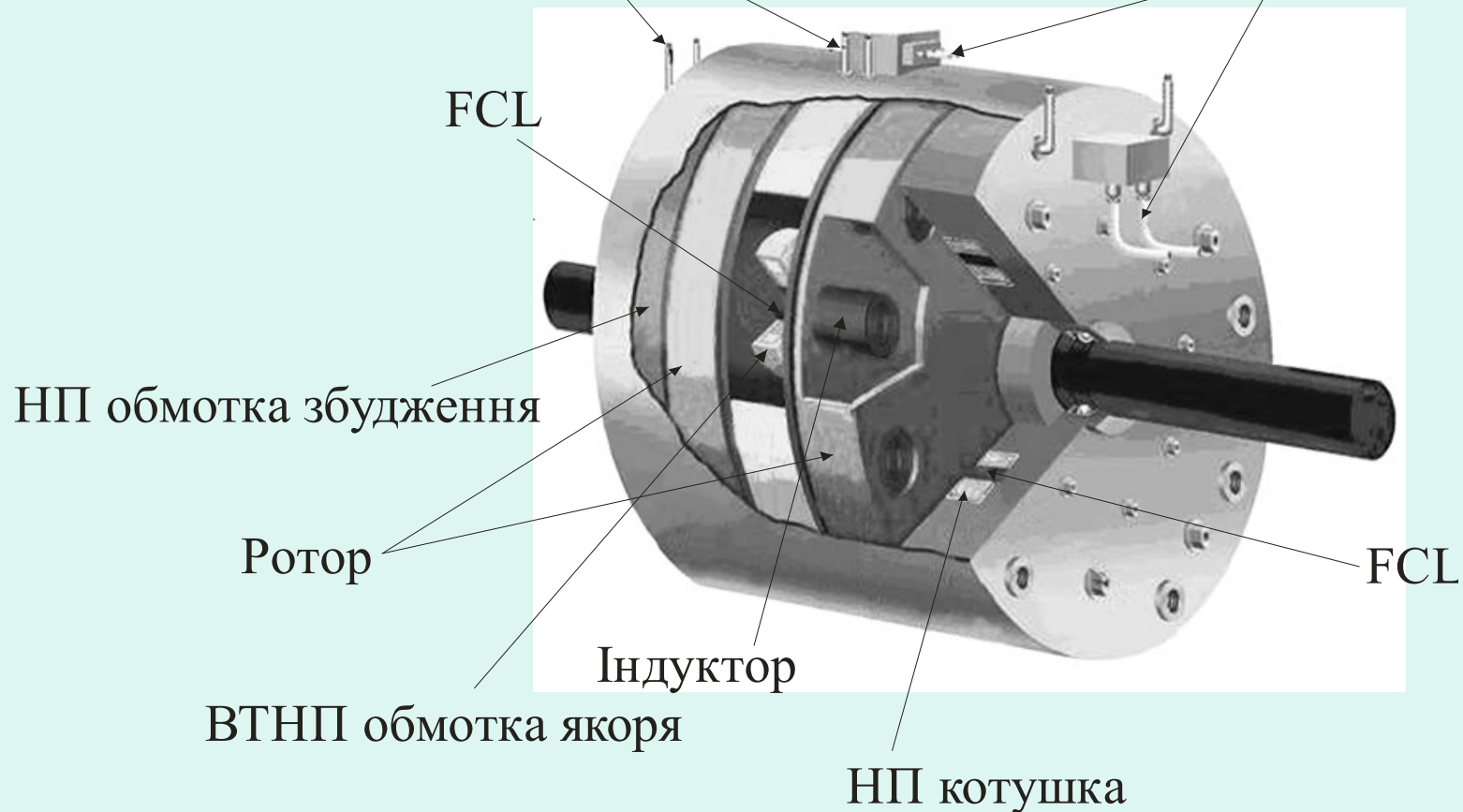
- діаметр двигуна – 0,6 м;
- довжина двигуна – 0,6 м;
- потужність на валу – 12,5 кВт (короткочасно – 62,5 кВт);
- частота обертання – 100 об/хв (при температурі рідкого азоту 66 К);
- діаметр рушійної системи – 0,8 м;
- довжина рушійної системи – 2 м;
- діаметр гребного гвинта – 1 м;
- швидкість обертання гребного гвинта плавно регулюється в діапазоні від 0 до 100 об/хв із можливістю реверса.

схема повністю надпровідного двигуна потужністю 800 кВт

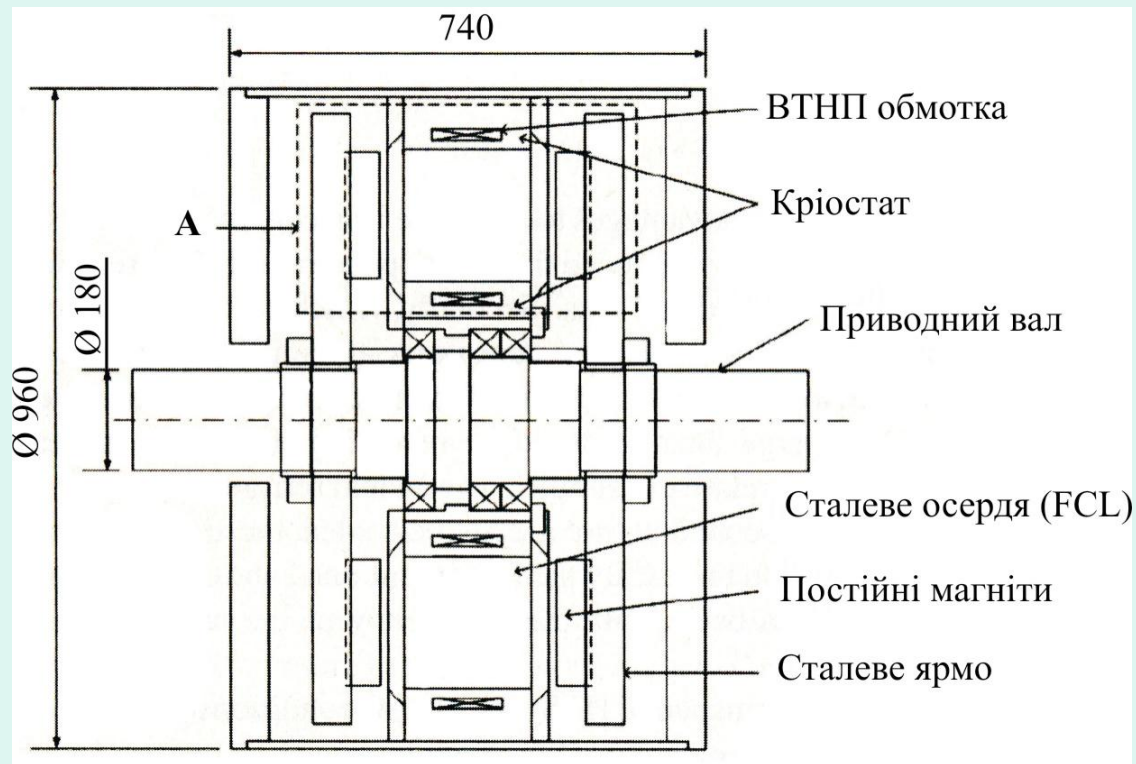
Особливістю є відсутність обертової ВТНП обмотки, що спрощує підведення холодоагенту через виключення обертового з'єднання

Ввод та вивід рідкого азоту

Силовий кабель



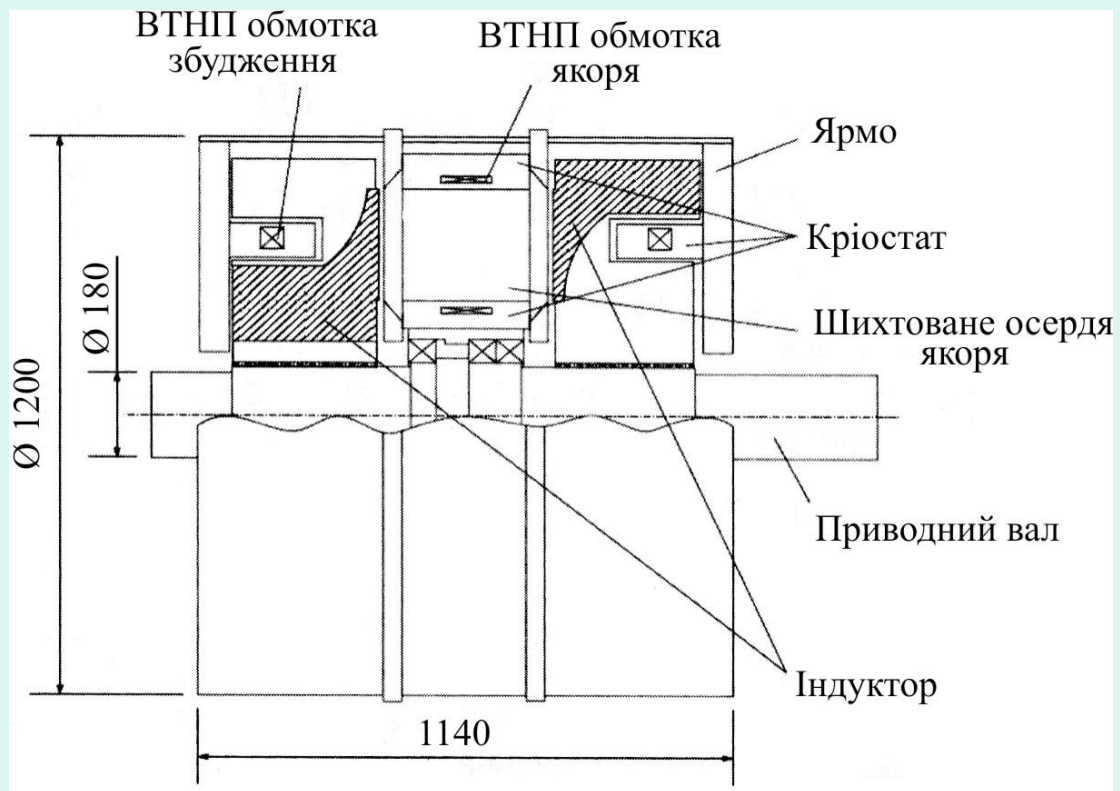
Конструктивна схема ВТНП двигуна потужністю 400 кВт з постійними магнітами



При величині змінного струму в обмотці якоря 540 А обертаючий момент двигуна становив 14,5 кН·м, що відповідає вихідній потужності 380 кВт при швидкості 250 об/хв. Двигун може забезпечити вихідну потужність 400 кВт. 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.

ВТНП двигун індукторного типу з аксіальним магнітним потоком



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.

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 в струмознімних кільцях та контактних щітках немає потреби. Крім того, важливою перевагою такої конструкції є її нерухомість щодо системи охолодження.

у березні 2007 року *AMSC* і компанія *Northrop Grumman Marine Systems* оголосили про успішне завершення заводських випробувань найбільшого у світі ВТНП суднового електродвигуна потужністю 36,5 МВт



Маса електродвигуна становить 75 т, що в три рази менше маси двигуна традиційного „теплого” виконання, а габарити його вдвічі менше. Відразу по завершенню випробувань електродвигун передали ВМС США, яке передбачає встановити його на новітній есмінець класу *DDG-1000*.

вартість проекту склала, приблизно, 90 млн. дол.

зразок заглибного насосу з реактивним ВТНП двигуном для подачі кріогенного палива – рідкого водню (LH_2 – *liquid hydrogen*) в авіаційні і ракетно-космічні

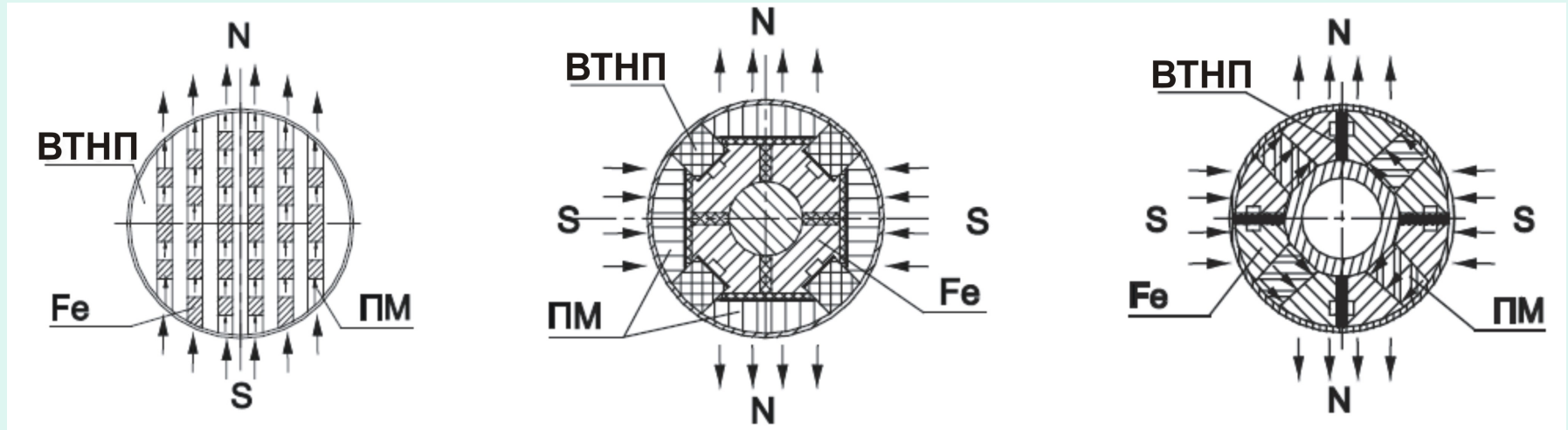


ротор кріонасоса з ВТНП елементами

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
коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$)	0,8
Розрахунковий ККД	0,9
Частота струму в статорі, Гц	50
Частота обертання ротора, об/хв	3000

Концепція ВТНП двигунів з постійними магнітами



- а) композитний ротор на основі ВТНП, РЗМ та сталі;
- б) ротор на основі ВТНП і радіальних постійних РЗМ магнітів;
- в) ротор на основі ВТНП і тангенціальних постійних РЗМ магнітів

двигуни з радіальними та тангенціальними магнітами потужністю близько 20 кВт

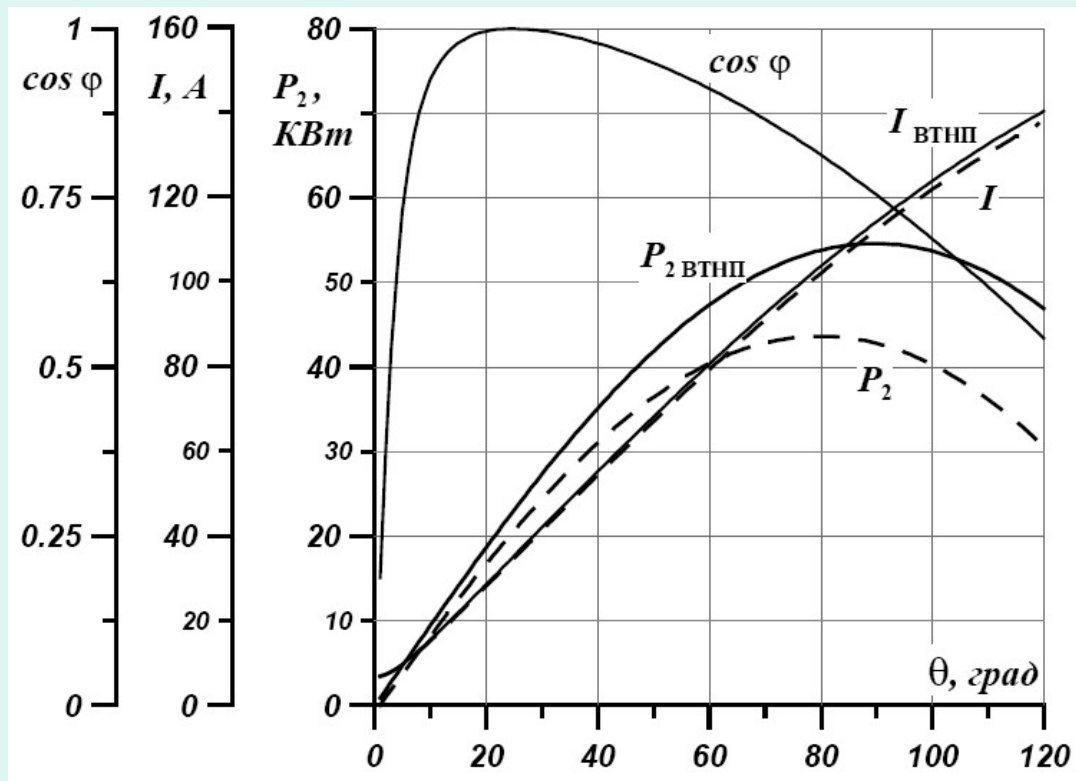
Чотирьохполюсний синхронний ВТНП двигун
з радіальними постійними магнітами в роторі



статор



ротор

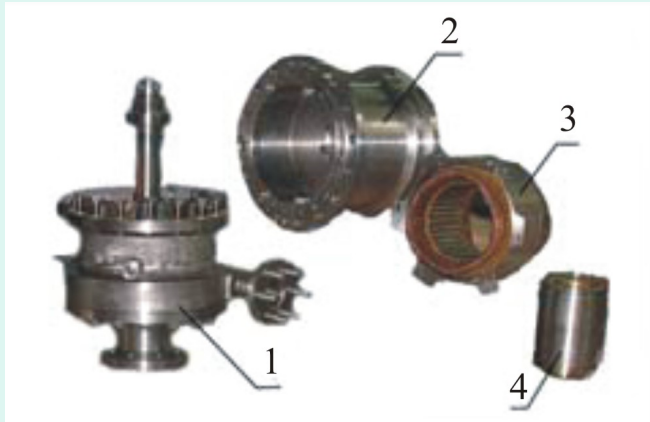


кутові характеристики ВТНП двигуна:

— ВТНП двигун;

- - - традиційний „теплий” двигун.

Кріогенний насос для ВТНП магістралі передачі електроенергії



а) кріонасос з ВТНП електродвигуном (1 – корпус насоса, 2 – корпус двигуна, 3 – статор, 4 - ротор);

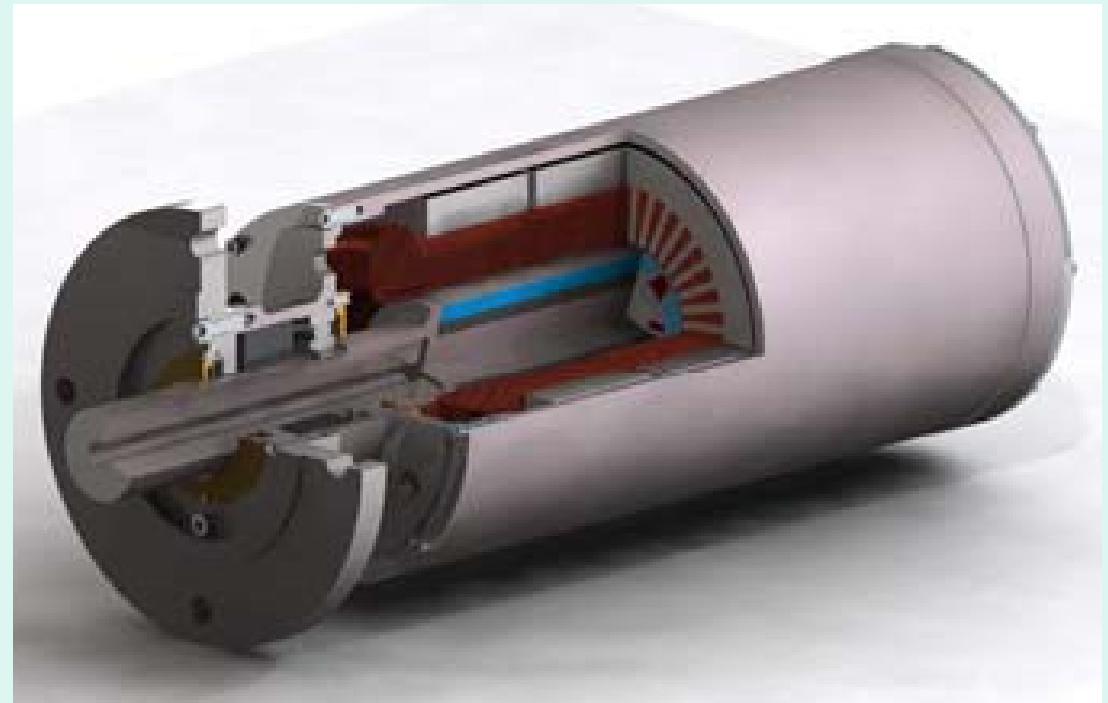
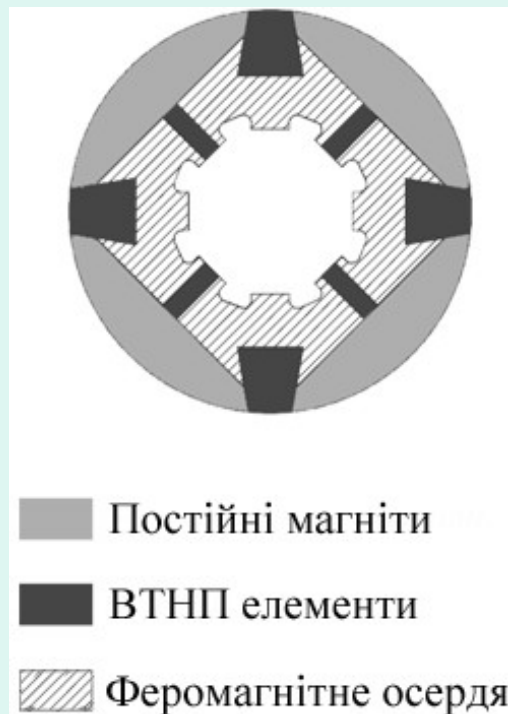
б) кріонасос з ВТНП електродвигуном разом;



в) ВТНП кріонасос під час роботи;

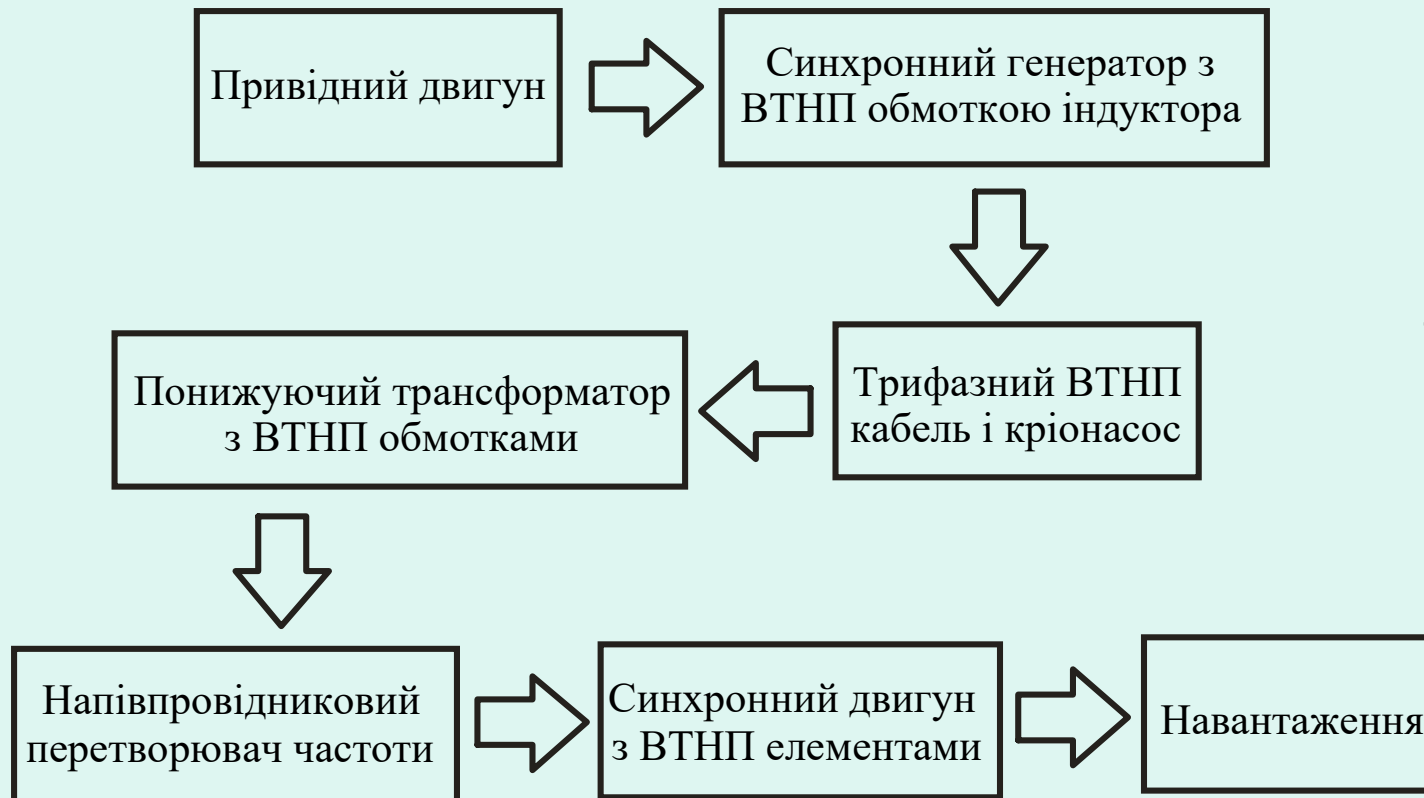
г) загальний вигляд промислового зразка ВТНП магістралі передачі електроенергії.

У рамках німецько-російського проекту „*High Dynamic HTS Motor*” фірмою „*Oswald Elektromotoren GmbH*” розроблений високооборотний 4-х полюсний ВТНП синхронний двигун потужністю близько 500 кВт із радіальними рідкоземельними магнітами та масивними YBCO елементами в роторі. Двигун розроблений для використання в автомобільних компаніях Німеччини на стендах для випробувань і тестування кузовів нових легкових автомобілів.



а) поперечний перетин ротора;
б) конструкція двигуна.

Енергетична установка потужністю 50 кВт



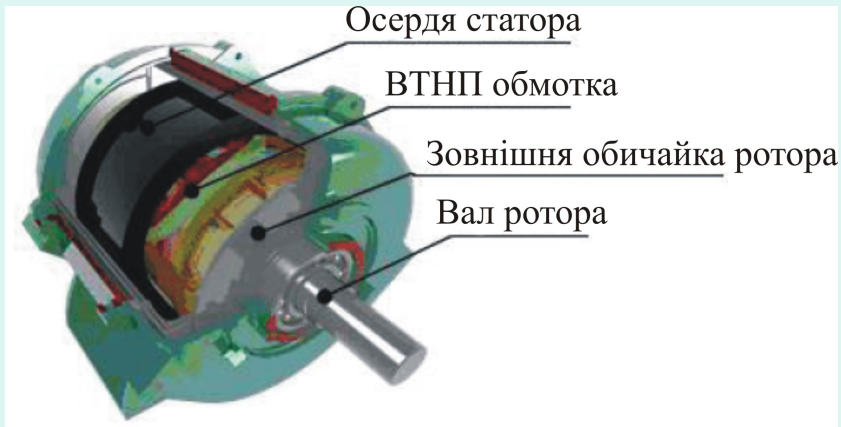
Електроенергетична установка складається з

- ВТНП синхронного генератора,
- ВТНП трансформатора,
- ВТНП кабелю і
- синхронного електродвигуна із ВТНП елементами

Генератор живить електродвигун через понижуючий трансформатор і напівпровідниковий перетворювач, для передачі енергії використовується ВТНП кабель.

ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ УСТАНОВКИ

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



2) ВТНП трансформатор потужністю 60 кВ·А з магнітопроводом з аморфної сталі

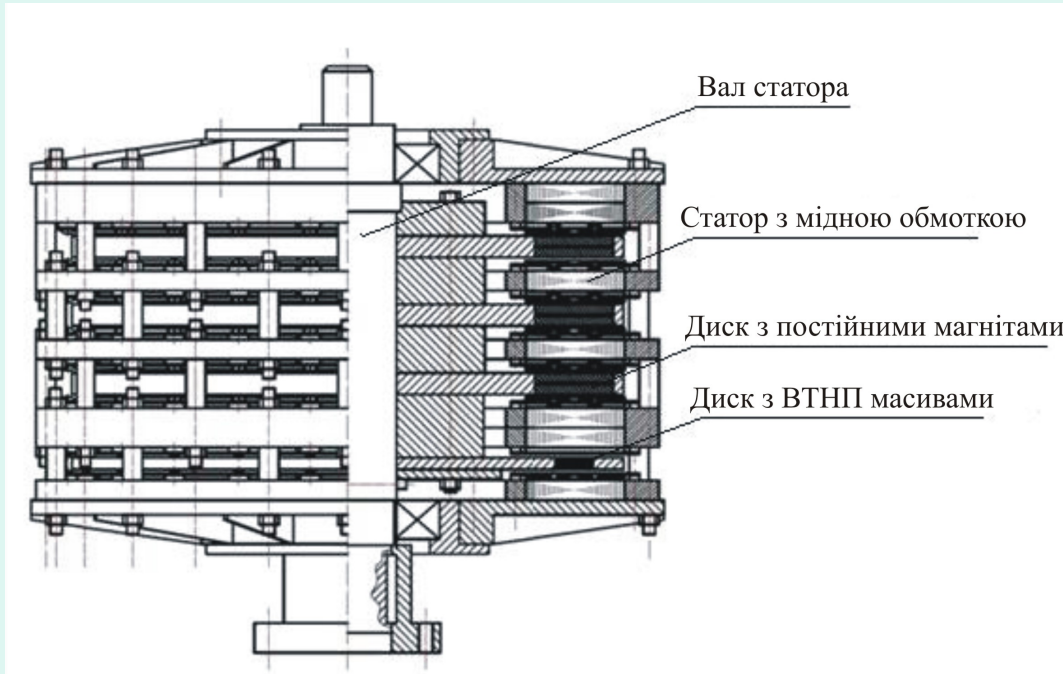
3) Синхронний двигун із ВТНП елементами потужністю 50 кВт.

4) Трифазний ВТНП кабель

Параметр	Значення
Номинальна потужність, кВт	50
Номинальна напруга, В	690
Номинальний струм, А	52,2
Число пар полюсів	2
Номинальна частота обертання, об/хв	1500
Номинальна частота, Гц	50
$\cos\varphi$	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

Конструктивна схема багатодискового синхронного ВТНП двигуна потужністю 50 кВт

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
$\cos\varphi$	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