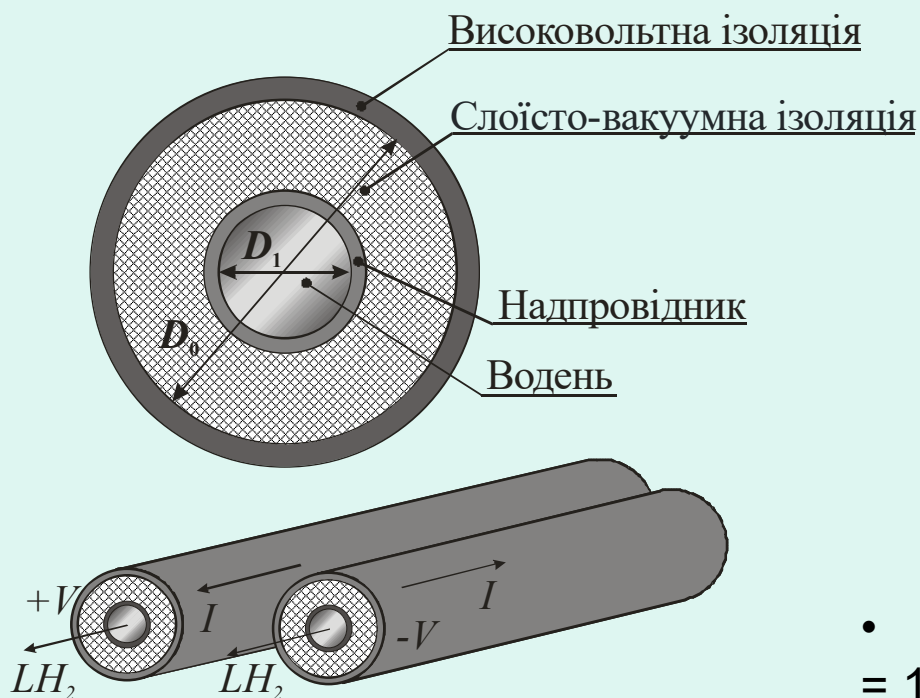


ВИКОРИСТАННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРОЯХ

КАБЕЛІ, ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Надпровідникові кабелі як трубопроводи для енергоносіїв



Поперечний переріз
надпровідникового
кабелю-трубопроводу,
що охолоджується рідким
воднем

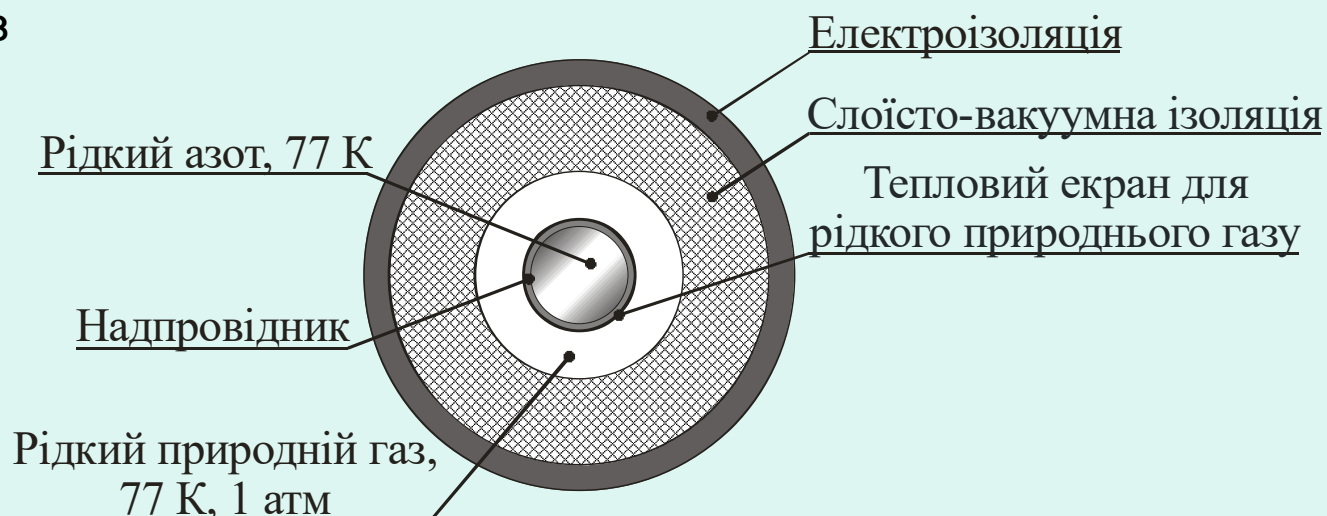
Основні характеристики кабелю-
трубопроводу:

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

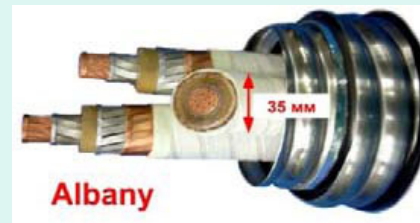
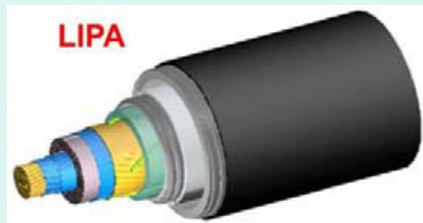
Поперечний переріз надпровідникового **кабелю-трубопроводу**, що переносить водень та охолоджується рідким азотом



Поперечний переріз надпровідникового кабелю-трубопроводу, що несе зріджений природний газ із додатковим охолодженням рідким азотом



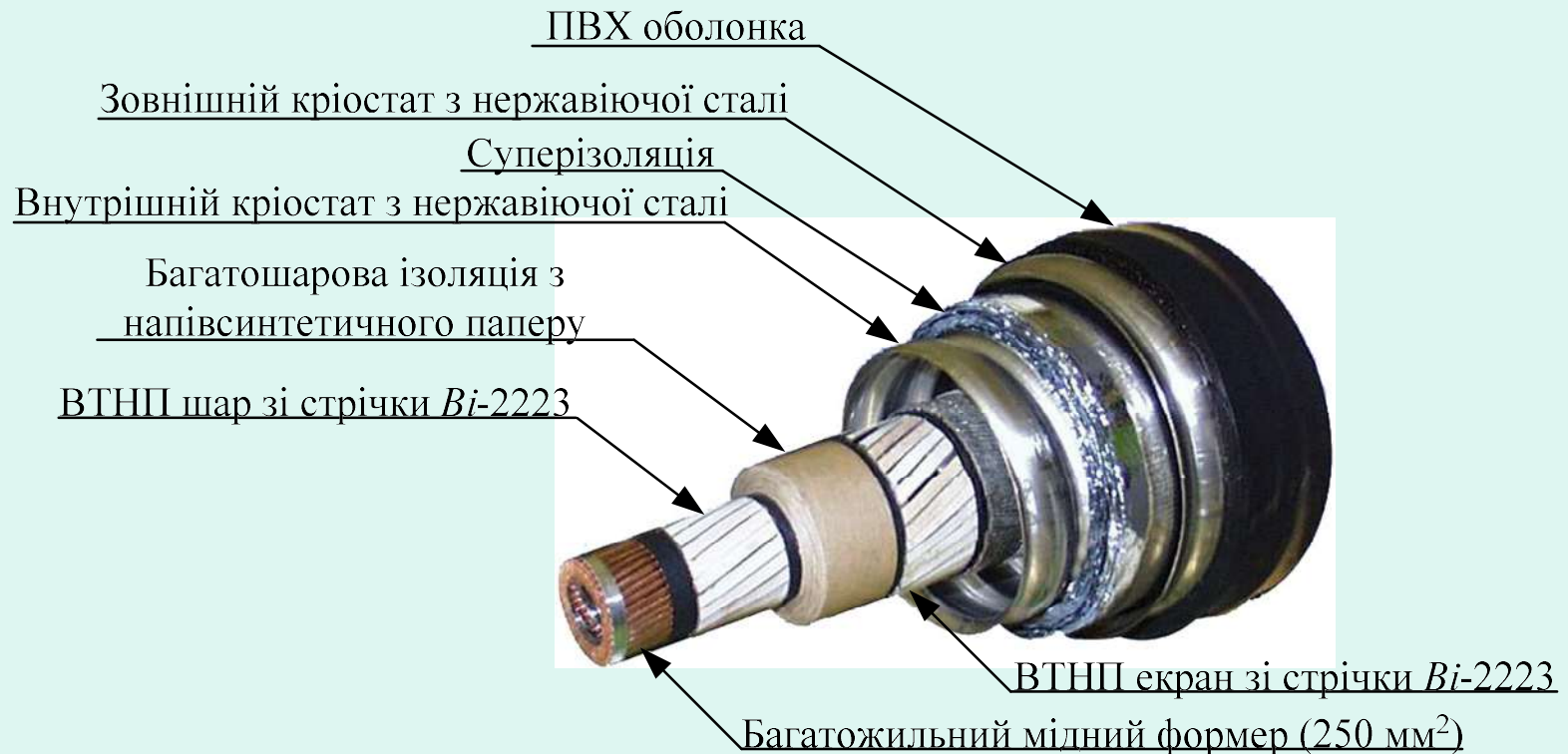
Найбільші ВТНП кабельні проекти



кабелі *Super-ACE* (а), *LIPA* (б), *Albany* (в) та *Southwire – ULTERA* (г)

Назва проекту / країна	<i>Super-ACE</i> Японія	<i>Project LIPA</i> США, Німеччина, Франція	<i>Albany Project</i> США, Японія	<i>Southwire - ULTERA</i> США, Данія
Строки виконання	2000 - 2005 рр.	2003 - 2007 рр.	2003 - 2006 рр.	2003 - 2006 рр.
Строки випробуван	Закінчені в 2005 р.	Розпочаті в 2007 р.	закінчені влітку 2008 р.	Розпочаті в серпні 2006 р.
Матеріал	Ві-2223 стрічка <i>Furukawa</i>	Ві-2223 стрічка <i>AMSC</i>	Ві-2223 стрічка <i>Sumitomo*</i>	Ві-2223 стрічка <i>AMSC</i>
Тип кабелю	Однофазний	Три окремі фази в індивідуальних кріостатах	„Три в одному” плюс з'єднувальна муфта	Триаксіальний
Робоча напруга, кВ	77	138	34,5	13,8
Потужність, МВА	133	574	48	69

Конструкція ВТНП кабелю *Super-ACE*, Японія

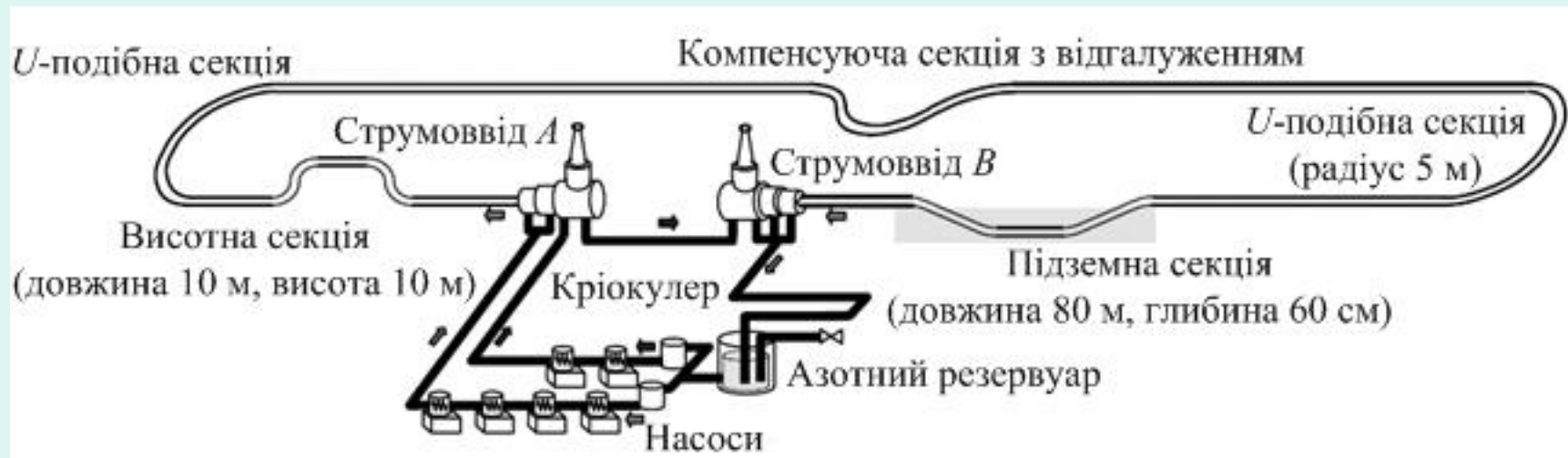


Охолодження кабелю по двох каналах – всередині мідного формеру та між внутрішнім кріостатом і ВТНП екраном

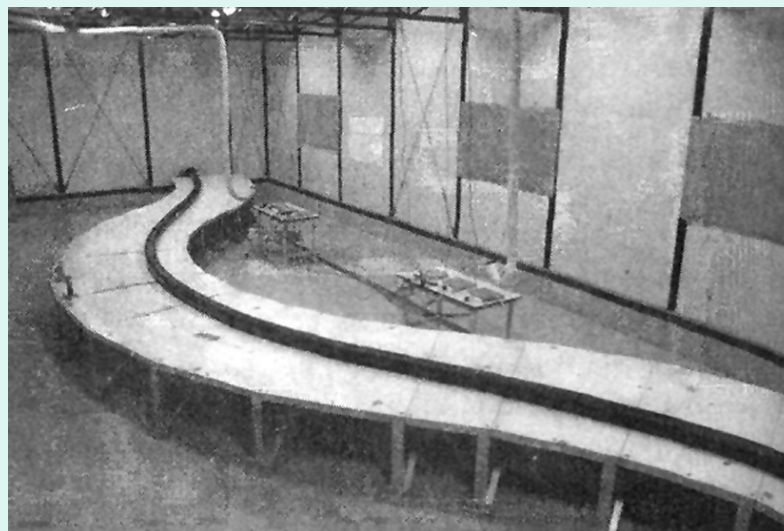
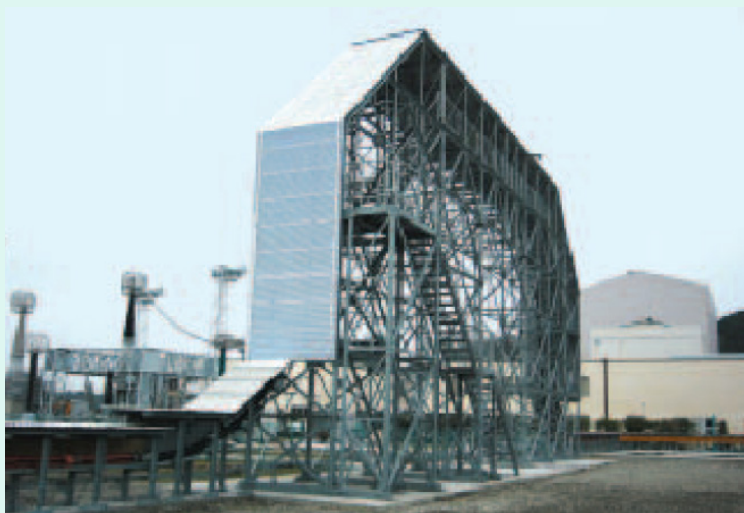
	69 К	73 К	77 К
$I_{\text{к}}$ ВТНП провідника, А	2290	1910	1570
$I_{\text{к}}$ ВТНП екрану, А	1965	1620	1350

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

Тривимірне розташування ВТНП кабелю *Super-ACE* довжиною 500 м



Зовнішній вигляд висотної секції ВТНП кабелю *Super-ACE* та компенсуючої секції з відгалуженням

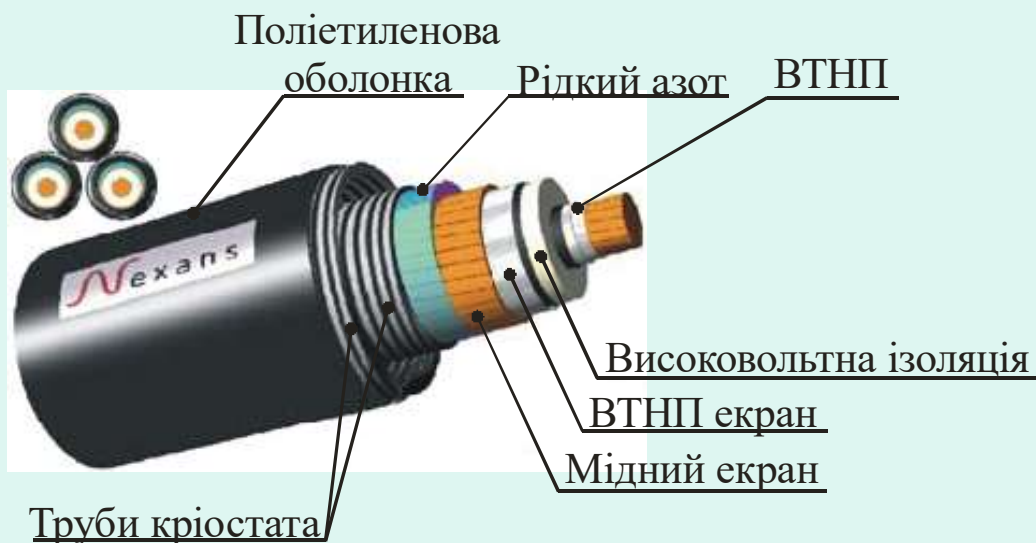


характеристики системи криогенного забезпечення кабелю *Super-ACE*

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

Трифазні ВТНП кабелі в індивідуальних кріостатах

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

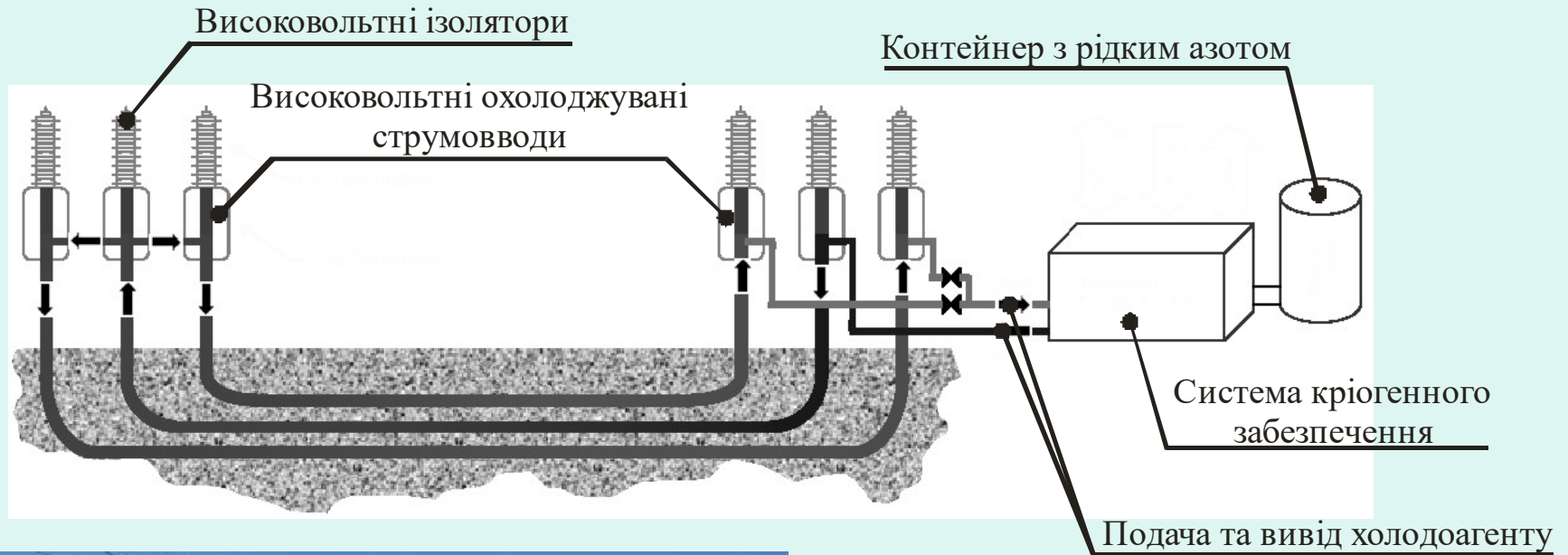


Конструкція високовольтного ВТНП кабелю виробництва *Nexans* для проекту *LIPA*



Струмовводна муфта виробництва *Nexans* у зборі із ізолятором

Кріогенна схема ВТНП кабелю *LIPA*



Струмовводні муфти та початкова частина ВТНП кабелю *LIPA* на площадці

Китайські кабельні проекти *InnoPower*, *Changtong* та *SECRI*

трифазний ВТНП кабель довжиною 33,5 м (35 кВ / 121 МВА)



Трифазний ВТНП кабель виробництва *InnoPower* довжиною 33,5 м

а) конструкція однієї фази;

б) зовнішній вигляд трьох фаз кабелю та струмовводів

трифазний ВТНП кабель *Gansu Changtong* довжиною 75 м (10,5 кВ / 1,5 кА), спрямованої на розвиток та дослідження високих технологій, у тому числі застосуванні надпровідності в електроенергетиці
Кабель виконаний з Ві-2223 проводу у срібній матриці по схемі з „теплим” діелектриком, кожна фаза кабелю перебуває у власному гнучкому кріостаті



Розташування трифазного ВТНП кабелю виробництва *IEE* довжиною 75 м

Кабель, встановлений на дослідному полігоні, розташований у формі трьох літер *U*, і імітує, таким чином, реальне розташування кабелів

планується встановити ВТНП кабель у споживчій мережі Шанхая

Ізолювання ВТНП кабелю



Укладання повивів
ВТНП стрічок



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

Для вивчення різних підходів до конструювання кінцевих струмовводних муфт і визначення оптимальної конструкції були виготовлені два варіанти



Струмовводні муфти для ВТНП кабелю

а) розробки РНЦ Курчатовський інститут;

б) розробки НДІЕФА ім. Д.Ф. Єфремова;

в) струмовводні муфти, з'єднані з електричною та криогенною системами полігону.

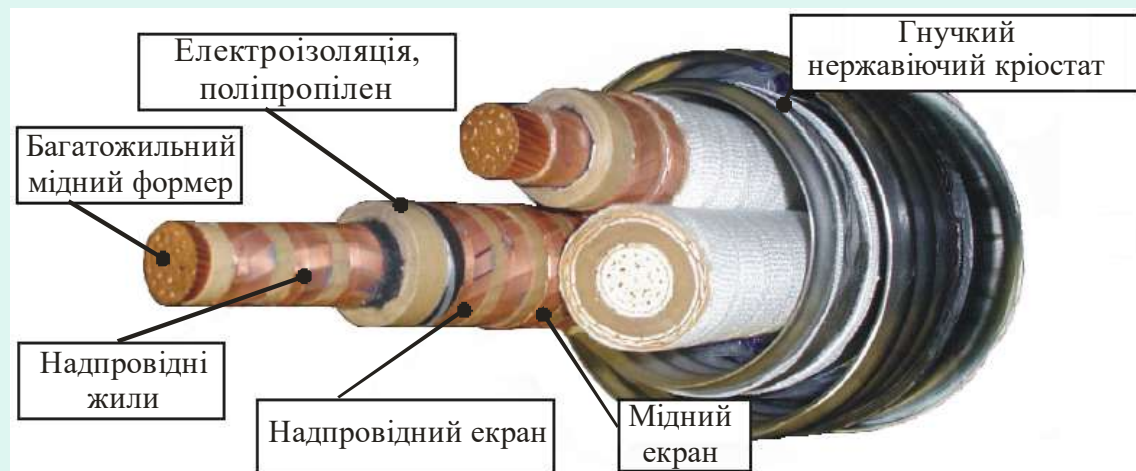
робоча напруга струмовводних муфт складає 20 кВ, вони мають витримувати перевантаження по струму до 4 кА, їхня електрична ізоляція повинна витримувати короточасні перенапруги до 70 кВ протягом 1 хв.

Система криогенного забезпечення полігону поставлена компанією Стірлінг (Нідерланди). Стандартний блок типу *LPC4* був адаптований під потреби полігону. Блок дозволяє використовувати два криокулера одночасно. Холодопродуктивність системи криогенного забезпечення – до 3,4 кВт на рівні 77 К (при роботі одного криокулера) і може бути збільшена до 7 кВт, якщо встановити другий.



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

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



До складу системи кріогенного охолодження входять:

азотний резервуар; термосифон, що допускає охолодження азоту як кріокулером (основний варіант), так і рідким азотом з відкачкою (резервний варіант);

насоси, що прокачують переохолоджений рідкий азот по замкнутій петлі ВТНП кабелю.

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

Кріогенна система виробництва компанії *BOC Group* для кріозабезпечення проекту *ALBANY*

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



За перші десять місяців роботи ВТНП кабель напрацював більше 7000 годин. В процесі роботи кабелю у мережі відбулося одне коротке замикання тривалістю 0,2 с, при якому струм у кабелі досяг 7,5 кА, що майже в 10 разів перевищує номінальний струм кабелю, але ніяких неприємних наслідків не відбулося, і після перевірки кабель знову був включений у роботу в мережі.

Японські кабельні проекти Токійської електроенергетичної компанії TEPCO (2002 р)



Демонстраційна лінія
ВТНП кабелю в Токіо

Специфікація
випробуваного
кабелю довжиною
100 м
компанії *Sumitomo
Electric*

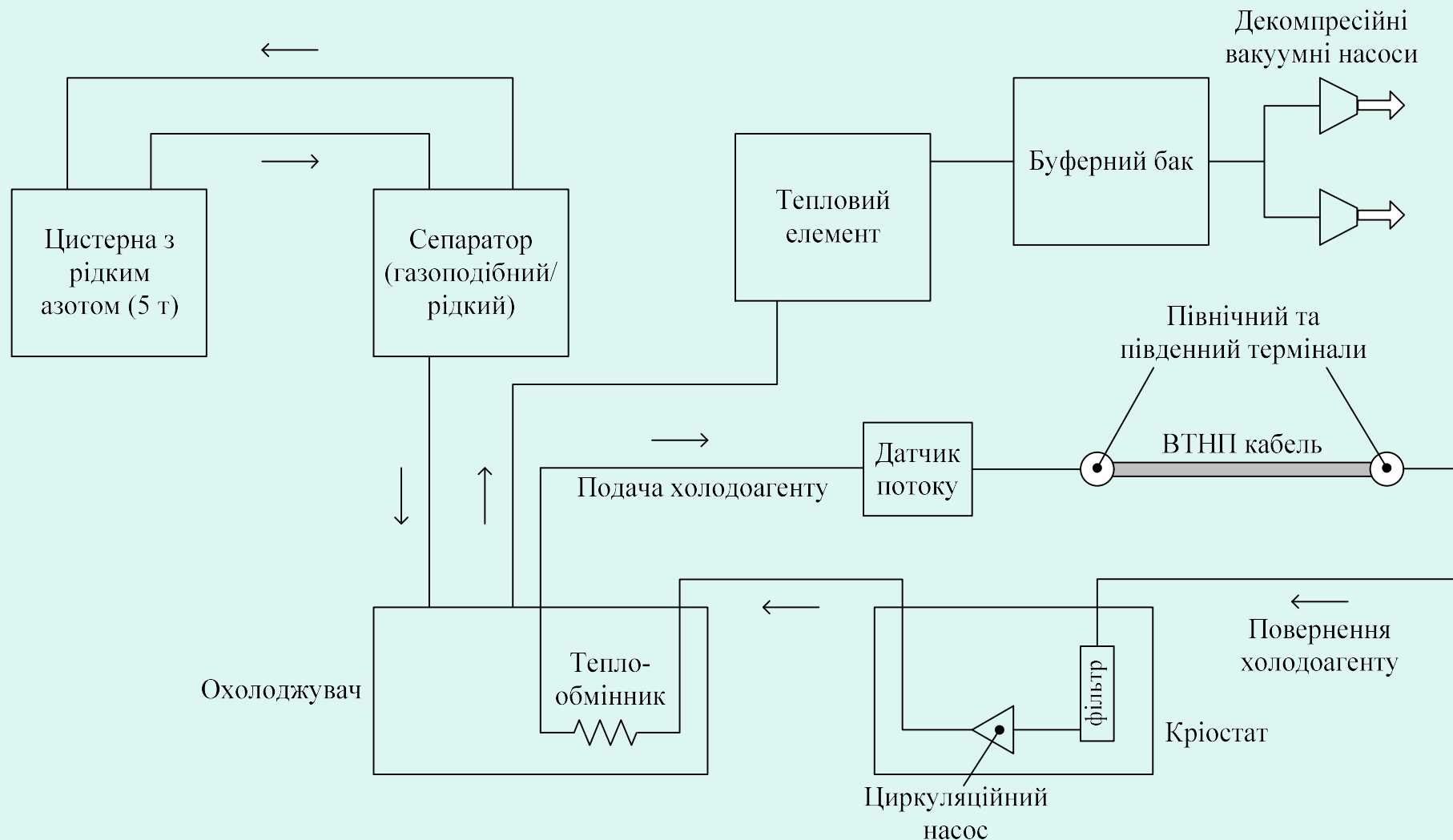
Параметр	Значення
Діюче значення напруги, кВ	66
Діюче значення струму, кА	1
Номінальна потужність, МВА	114
Розташування	наземний, установлений у трубопроводі діаметром 150 мм
Охолодження	циркуляція переохолодженого рідкого азоту
Характеристики кабелю	
Форма	3 жили в одному кріостаті
Електрична ізоляція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

ВТНП кабельні проекти Південної Кореї

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



Схема системи охолодження кабельної системи на полігоні *KEPRI*



Кабельна система складається з кабелю довжиною 100 м, двох струмовводів та системи охолодження, яка працює за розімкненим циклом

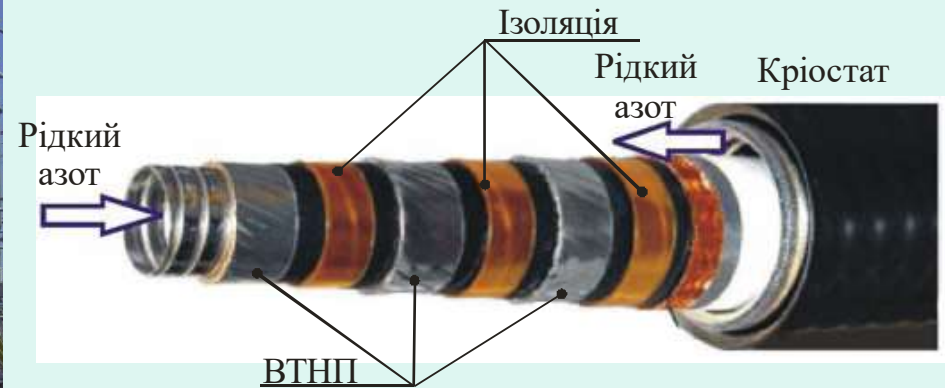
KEPCO та *KEPRI* планують розпочати новий ВТНП виготовлення кабелю довжиною 500 м на напругу 22,9 кВ і струм 1250 А (потужністю 50 МВА), який буде придатний для розташування у реальній розподільній енергомережі.

ВТНП кабель *ULTERA*

Введений в експлуатацію на підстанції компанії *American Electric Power (AEP)* у Біксбі, штат Огайо, трифазний ВТНП кабель *Triax* (триаксіального типу) потужністю 69 МВА, довжиною 200 м, напругою 13,8 кВ і робочим струмом до 3 кА



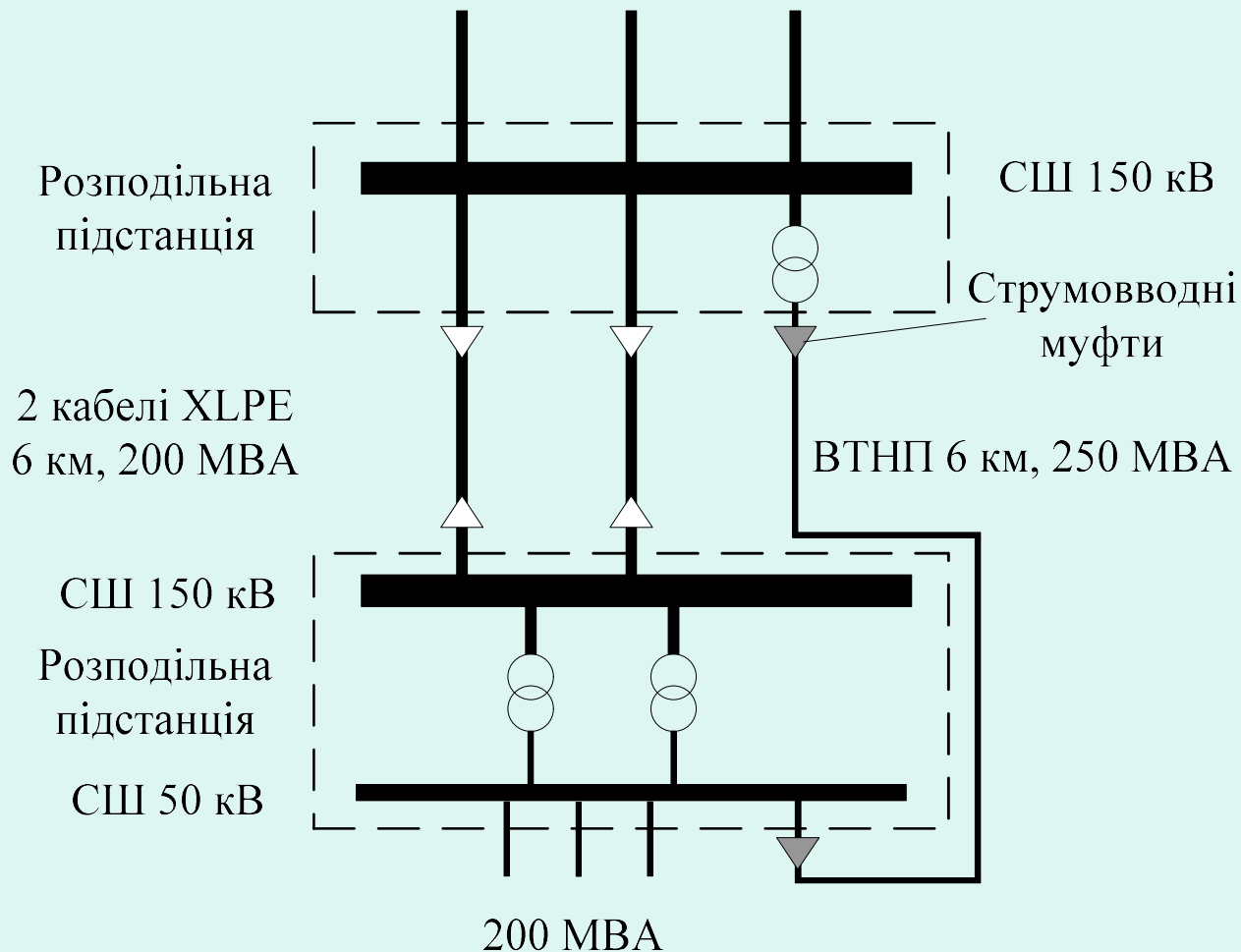
Початкова частина триаксіального ВТНП кабелю довжиною 200 м, встановленого на підстанції Біксбі, штат Огайо (США)



Трифазний кабель *Triax* за проектом *Ultera* розрахований на середню напругу від 10 до 72 кВ і потужність до 400 МВА

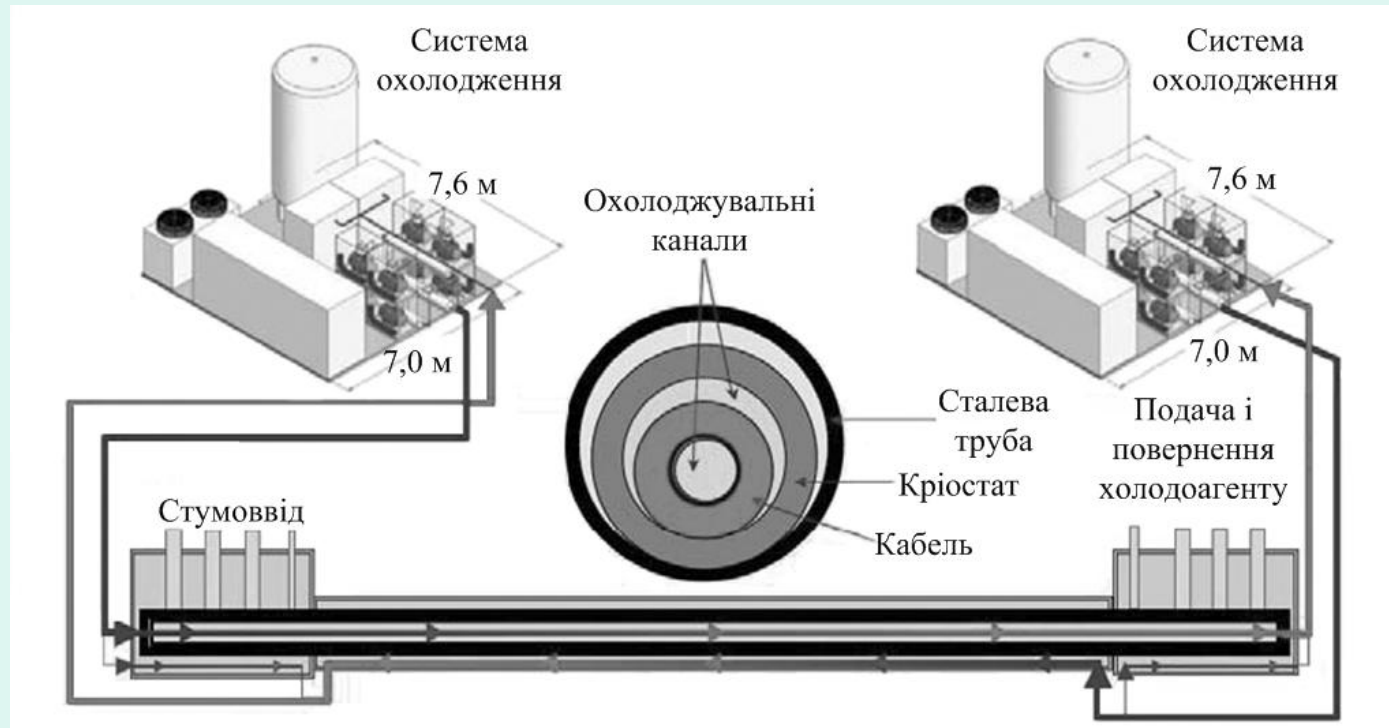
Кабельний проект в Амстердамі

трифазний ВТНП кабель довжиною 6 км в діловій частині Амстердаму
(50 кВ, 2900 А, 250 МВА)



планується
демонтувати усі три
кабелі *GPC* потужністю
100 МВА і в існуючих
кабельних каналах
встановити два
традиційних підземних
кабелі *XLPE*
потужністю 200 МВА і
ВТНП кабель
потужністю 250 МВА

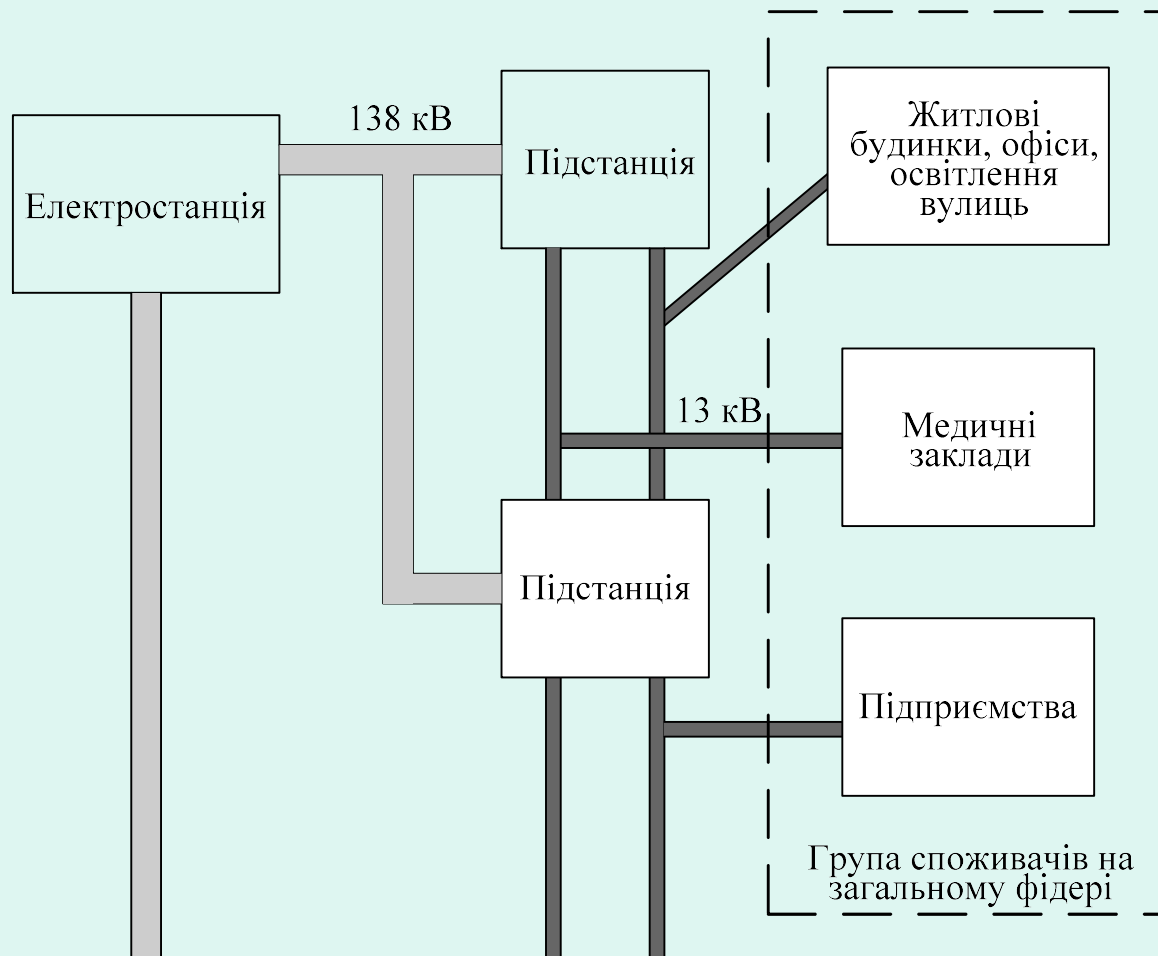
Кріогенна схема ВТНП кабелю в Амстердамі



Перевага віддана триаксіальній конструкції ВТНП кабелю. Завдяки концентричному розташуванню трьох фаз у загальному кріостаті ВТНП кабель надзвичайно компактний. Охолодження ВТНП кабелю буде вестись як по зовнішньому, так і по внутрішньому каналах. Через дефіцит вільного простору охолодження кабелю здійснюватиметься тільки двома кріогенними установками, розміщеними на його обох кінцях. Через значне тепловиділення в струмовводах ВТНП кабелю передбачено їх незалежне від кабелю охолодження.

Проект *Hydra*

впровадження нової ВТНП технології безпеки енергосистеми в мережу комерційного центру міста Нью-Йорк



Потужна лінія з'єднає дві підстанції на Манхетені

довжина кабелю – 300 м, максимальна напруга – 15,5 кВ (діюче значення), робочий струм – 4 кА (у тривалому режимі), припустимий струм КЗ – 40 кА (діюче значення), потужність – 96 МВА

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