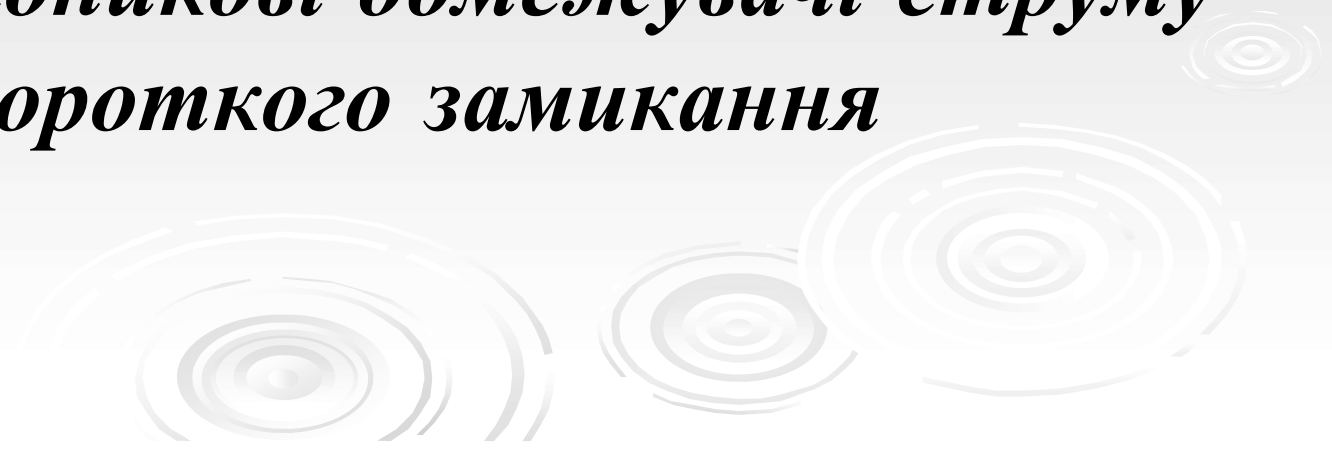


ВИКОРИСТАННЯ НАДПРОВІДНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРОЯХ

*Надпровідникові обмежувачі струму
короткого замикання*



Існуючі електричні апарати і методи керування струмами короткого замикання

Вимикачі, плавкі запобіжники, реактори

Недоліки:

автоматичні вимикачі мають межу по обмеженню струмів і досить велику інерційність спрацьовування;

плавкі запобіжники хоча і є простими та недорогими, але енергосистема залишається непридатною на час заміни запобіжника після кожного спрацьовування;

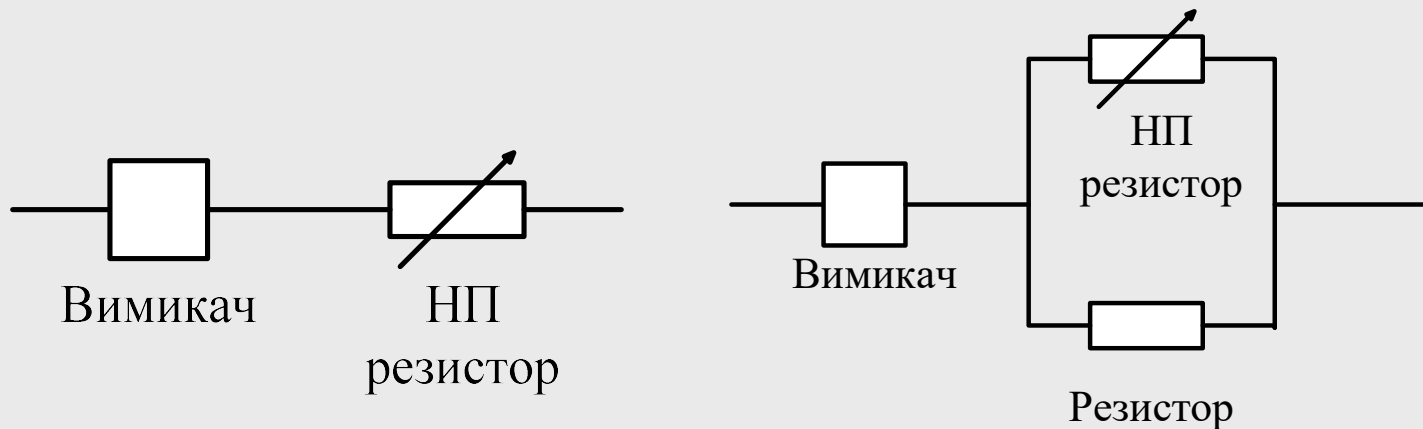
використання високоімпедансних трансформаторів і реакторів стратегічного розміщення з повітряним осердям для забезпечення керування максимумом струму короткого замикання і стабільності призводять до неефективної роботи системи, втратам потужності і небажаним падінням напруги;

в реакторі головним недоліком є втрати активної і реактивної потужностей в номінальному режимі роботи.

Надпровідникові обмежувачі аварійних струмів

1. Можуть використовуватися замість масляних вимикачів, силових плавких вставок, піротехнічних захисних пристроїв, перевершуючи останні по таким технічним параметрам, як швидкість спрацьовування в діапазоні мілісекунд та витрати енергоспоживання.
2. Допускається плавне дистанційне регулювання напруги, яке сприяє збільшенню пропускної здатності електромереж, збільшенню числа споживачів енергосистеми без вмикання додаткових комутуючих пристроїв та трансформаторів, і забезпечує певні функціональні переваги.
3. Повні втрати в струмообмежувачі повинні бути менше втрат в трансформаторі. В надпровідниковому струмообмежувачі повні втрати складаються з втрат на змінному струмі в НП елементах, втрат в нормально провідних елементах конструкції і споживаної енергії на охолодження.
4. Перевага застосування НП струмообмежувачів полягає в зменшенні ваги, розміру і вартості електроенергетичного устаткування, можливості використання автоматичних вимикачів з більш низькими характеристиками переривання струму і застосуванні більш ефективних схем роботи електромережі
5. Можливість мати істотно нижчий опір порівняно з традиційними струмообмежувальними реакторами в нормальному режимі і практично безінерційно збільшувати його до необхідної величини при короткому замиканні. Це дозволяє використовувати ВТНП струмообмежувач в мережах високої напруги з метою координації струмів КЗ з вимикаючою здатністю комутаційної апаратури.
6. Використання ВТНП струмообмежувачів в електричній системі дозволить подовжити термін служби комутаційної апаратури і створить умови для її поступової заміни сучасним устаткуванням без перебудови.

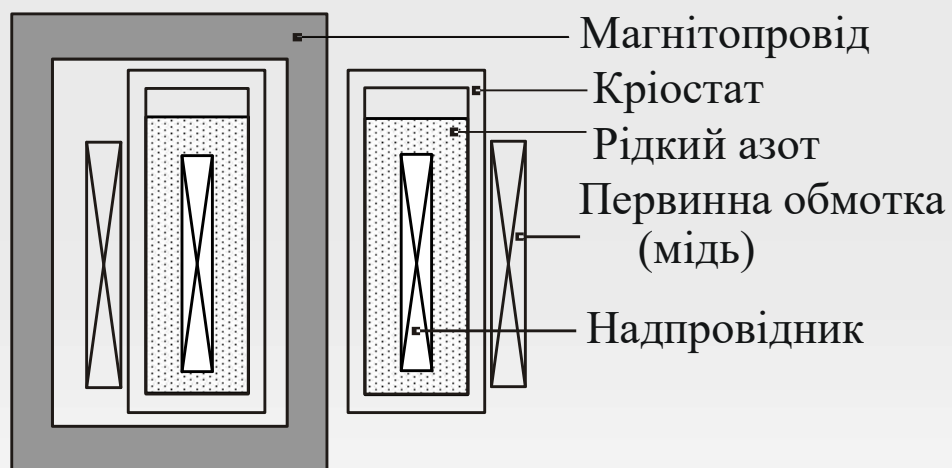
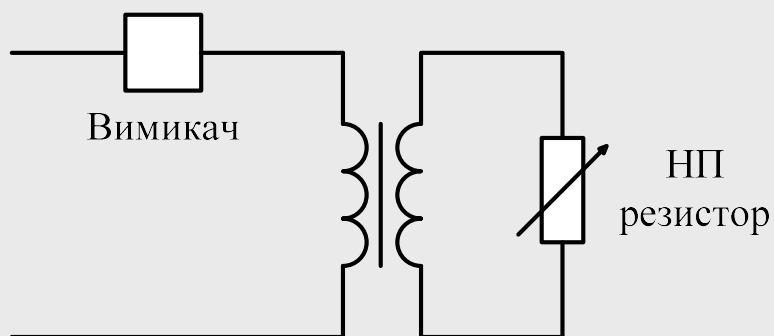
Конструкція та принцип дії надпровідникового обмежувача струму короткого замикання



Резистивний НПОС послідовного (а) та шунтованого (б) типів

Резистивна конструкція НПОС є найбільш спрощеною і малогабаритною, заснованою на нелінійності опору надпровідника. Струмообмежувач містить активний НП елемент, який послідовно з'єднаний з колом, що захищається. Конструктивно ці елементи можуть бути виготовлені як набір паралельно і послідовно з'єднаних тонких НП плівок, або масивних компонентів. В якості послідовного НПОС може використовуватися, наприклад, НП кабель.

Індуктивний НП струмообмежувач



повний опір струмообмежувача багаторазово збільшується і обмежує струм КЗ

Він складається із первинної нормально провідної металевої котушки, зв'язаної за допомогою феромагнітного осердя із вторинною короткозамкненою НП котушкою.

При нормальних умовах функціонування кола, яке захищається, вторинна котушка знаходиться в надпровідному стані.

Магнітний потік, який генерується первинною котушкою, компенсується потоком, викликаним наведеними екранними струмами в короткозамкненій надпровідниковій котушці. Повний опір пристрою визначається тільки потоком розсіювання в повітряному зазорі між первинною і вторинною котушками.

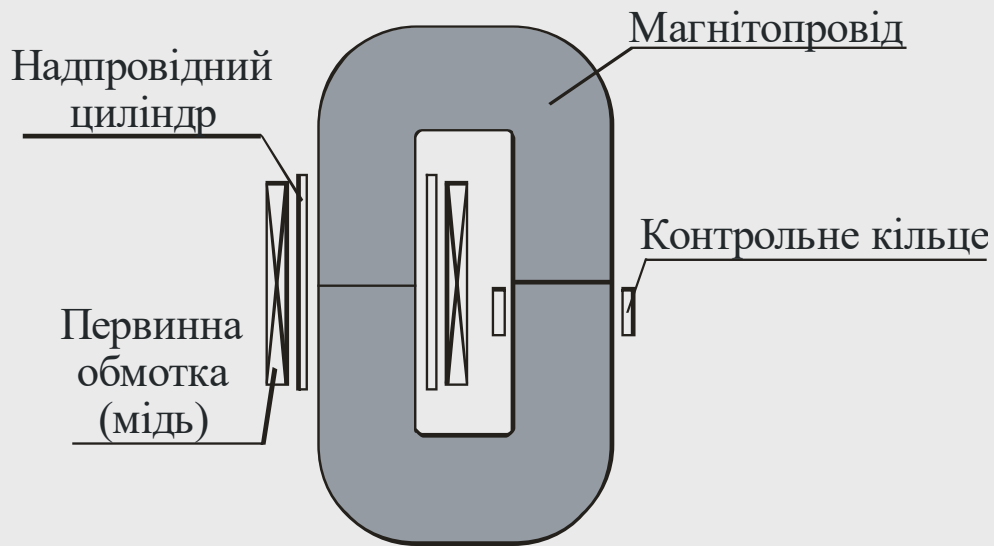
Перевагами індуктивної конструкції у порівнянні з резистивною є:

- 1) відсутність електричних з'єднань між надпровідниковими елементами і захищаним колом;
- 2) фізичний поділ криогенних і нормально провідних елементів пристрою;
- 3) більш низьке падіння напруги на активному надпровідниковому елементі в умовах КЗ;
- 4) можливість виготовлення вторинної ВТНП котушки простим способом.

Одним з основних недоліків індуктивного струмообмежувача є те, що радіуси котушок і магнітного осердя збільшуються пропорційно номінальній напрузі. На відміну від цього, в резистивному струмообмежувачі збільшення номінальної потужності і напруги можна досягти шляхом паралельно – послідовного вмикання надпровідникових перемикаючих елементів.

Загальною проблемою ВТНП струмообмежувачів є забезпечення швидкого і однорідного переходу перемикаючих елементів в нормальний стан, тому що при неоднорідному переході виникає тепловий домен, який може привести до руйнування надпровідника.

Індуктивний надпровідниковий обмежувач струму



Надпровідниковий обмежувач струму з екранованим осердям

Центральний Науково-дослідний
інститут Електроенергетики **CRIEPI**
(Японія)

Базуються на використанні циліндра виготовленого з **Bi-2212** або **Bi-2223**, для екранування залізного осердя від магнітного потоку, що утворюється мідною котушкою.

У нормальному режимі роботи магнітне поле мідної котушки екранується надпровідниковим циліндром, а при короткому замиканні струми, індуковані в надпровіднику, достатні, щоб перевести його в нормальний стан, і магнітне поле проникає в залізне осердя. Це значно збільшує індуктивність мідної котушки, і у такий спосіб забезпечує обмеження струму.

Роботи в **CRIEPI** зосередилися на надпровідникових екранах змінного струму та їх реакції на струми короткого замикання. Крім цього, в конструкції передбачене „контрольне кільце” для споживання частини енергії, що виділилась протягом короткого замикання. Це дозволяє зменшувати час охолодження екрану після аварійного режиму

Компанія *ABB* розробила „екрановану феромагнітну” концепцію обмежувача струму



Конструкція НПОС складалася з надпровідного циліндричного екрана з ВТНП Ві-2212, замкненого навколо залізного осердя, розташованого усередині текстолітового сосуда Д'юара.

Первинна ж мідна котушка намотана зовні безпосередньо на д'юар.

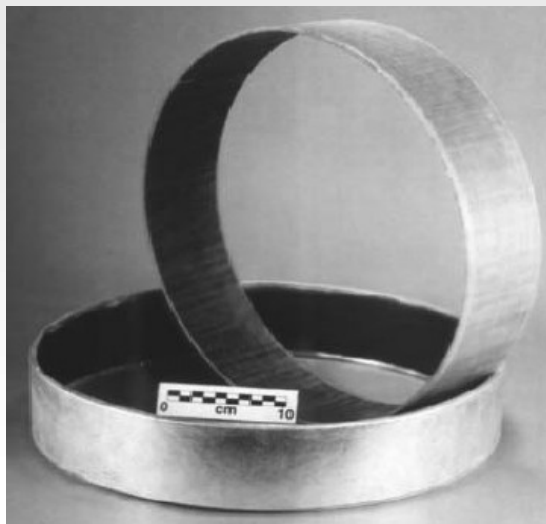
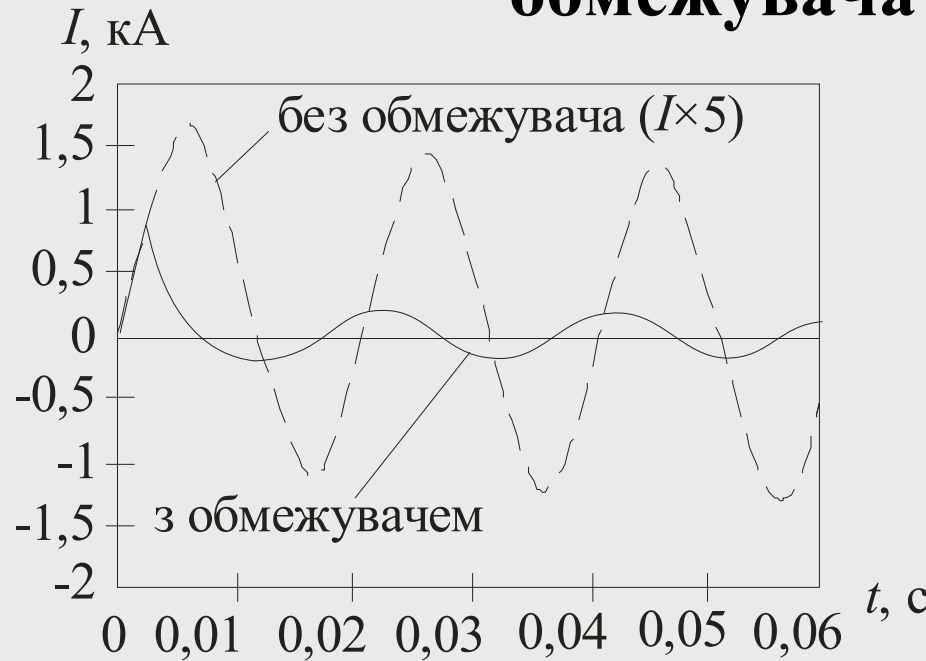
Всі ці деталі розташовуються концентрично.

Був виготовлений і протестований дослідний зразок на 100 кВт, екран якого складався із чотирьох кілець Ві-2212 довжиною 8 см і діаметром 20 см.

Робоча напруга дорівнювала 480 В, струм короткого замикання – 8 кА.

Наступний прототип трифазного НПОС фірми *ABB* – 1,2 МВА (10,5 кВ, 70 А), який пройшов ретельні стендові випробування, був установлений у вересні 1996 р. у Женевській енергосистемі на електростанції в *Lontsch*)

Струмообмежувальна характеристика ВТНП обмежувача струму *ABB*



ВТНП кільця
Vi-2212, фірма *ABB*

ВТНП екран виготовлений зі стопки кілець Vi-2212 кераміки.

Діаметр кільця – 38 см, висота – 8 см, товщина стінки кільця – 1,8 см, у стопці по 16 кілець.

В момент, коли відбувається коротке замикання, перевищується критичний струм у ВТНП елементу, зникає ефект екранування і раптово з'являється набагато більший повний опір контуру, внаслідок цього зменшується струм короткого замикання.

Збільшення нагріву ВТНП елемента при нормальному опорі призводить до зменшення струму короткого замикання

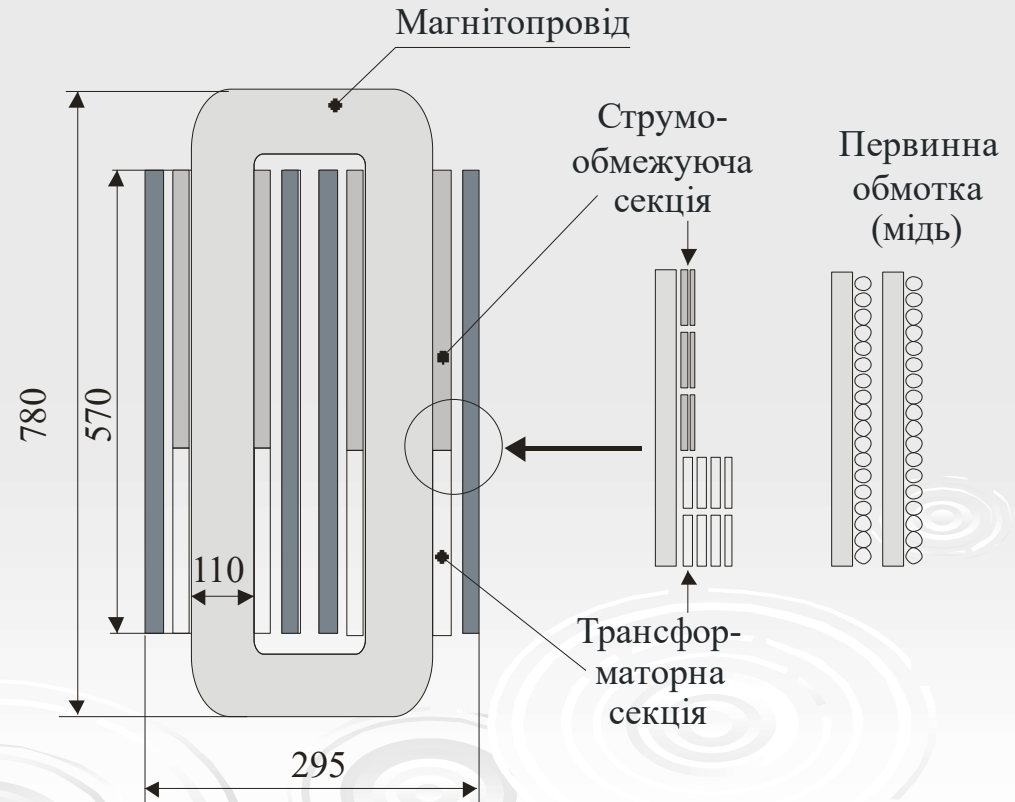
Резистивна концепція обмежувача струму

Найбільша всебічно охоплююча програма по ВТНП обмежувачах струму в Європі проводилася в співробітництві між компаніями *Electricite de France*, *GEC Alstom*, *Alcatel Alstom*. Головна мета програми полягала в забезпеченні такими обмежувачами струму мереж електропередачі **Франції** напругою 225 кВ.

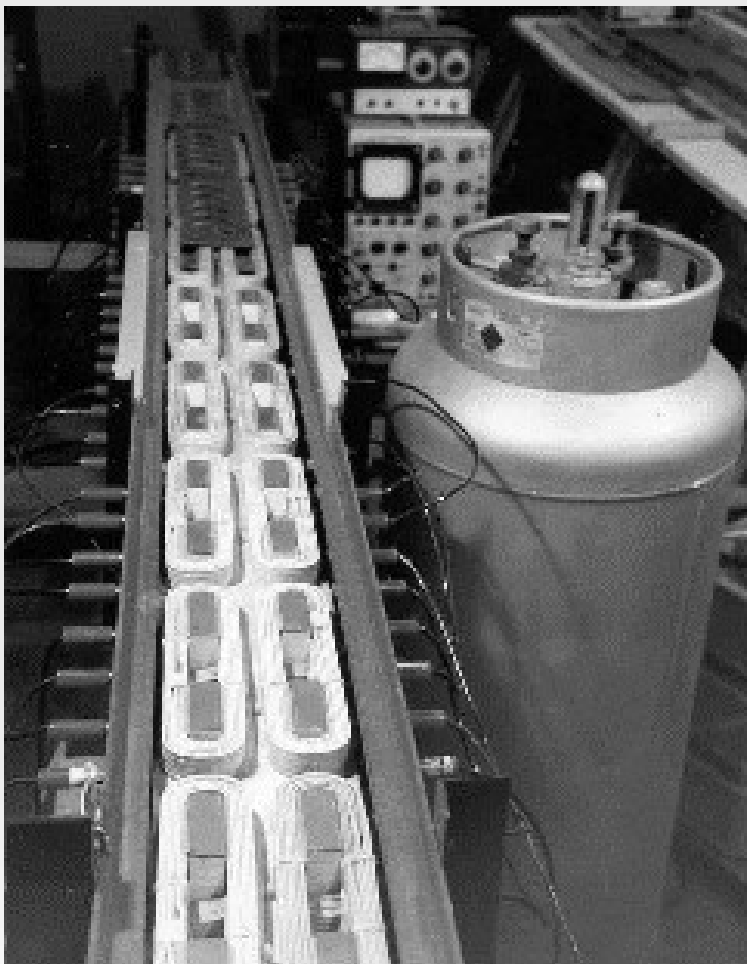
Дослідницька група вибрала резистивну концепцію обмежувача струму. Проведені випробування показали ефективну роботу апарату при діючому значенні напруги мережі 40 кВ

У **Японії** також був розроблений струмообмежувальний пристрій, що використовує конструкцію трансформатора. Його випробування пройшли в 2006 р. в університеті м. Нагоя.

Такий пристрій об'єднав у собі функції як обмежувача струму, так і трансформатора.



Електромагнітний надпровідниковий обмежувач струму



ВТНПОС „*Cryo-Pinch*” (4160 В)

В США заснована фірма *Power Superconductor Applications* (Піттсбург).

Маючи угоду з Лос-Аламоською національною лабораторією на сумісну розробку тонкоплівкового надпровідникового проводу (YBCO) для обмежувача струму змінного струму на 15-38 кВ, *Power Superconductor Applications* випустила серію таких струмообмежувальних реакторів з ВТНП обмотками

Ці НПОС успішно випробувані в діючих енергосистемах і одержали назву „*Cryo-Pinch*”. Їх можна віднести до індуктивного типу тому, що обмеження струму КЗ здійснюється за рахунок зміни індуктивного опору.

Це відбувається в результаті зміни геометрії магнітопроводу.

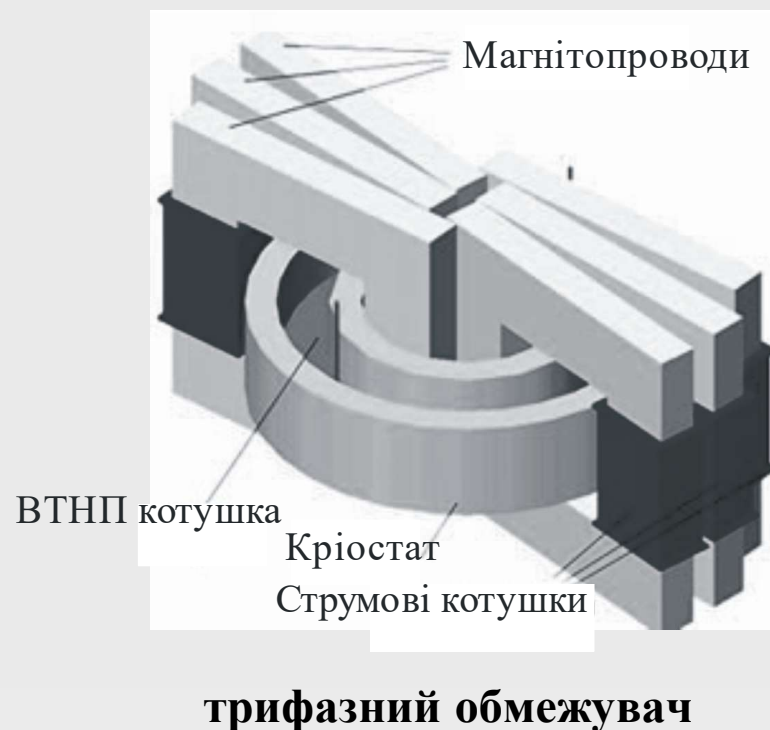
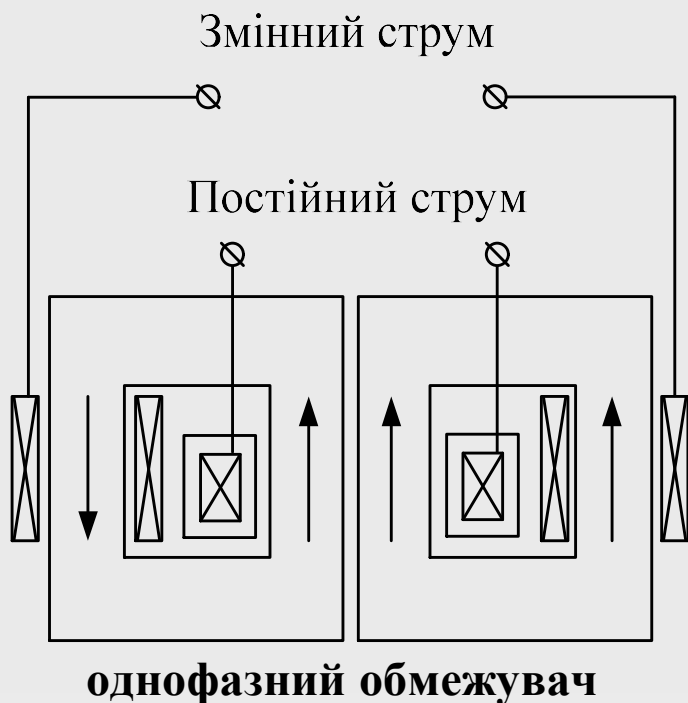
Основні характеристики реакторів „*Cryo-Pinch*”

Модел ь	Робоча напруга, кВ	Робочий струм, А	Аварійний струм, А
LX-4	0,480	600	5000
LX-5	5	600	12000
LX-6	7,5	600	12000
LX-7	7,6	1200	28000
LX-8	15	600	12000
LX-9	15	1200	28000
LX-10	23	400	32000
LX-11	38	200	42000

НПОС

1. усувають необхідність мати в енергетичних системах різні електромагнітні пристрої для розриву електричного кола (наприклад, масляні вимикачі на великі струми),
2. здатні замінити струмообмежувальні реактори традиційного виконання,
3. дозволяють відмовитися від використання елементів, що руйнуються при протіканні крізь них аварійного струму (силові плавкі вставки, піротехнічні захисні пристрої).
4. дозволяють здійснювати дистанційне керування енергетичною системою для обмеження аварійних струмів.

Схема струмообмежувача з насиченим магнітопроводом



Два магнітопроводи з мідними котушками, що вмикаються в мережу змінного струму. Магнітопроводи охоплюються кільцевим криостатом із ВТНП котушкою, крізь яку протікає постійний струм. У номінальному режимі роботи обидва магнітопроводи завдяки цій котушці насичені, отже, індуктивний опір пристрою невеликий. У випадку короткого замикання магнітопроводи поівперіодно виходять з насиченого стану, що приводить до зростання індуктивного опору і обмеження струму протягом цілого періоду. Обмеження струму не супроводжується переходом з надпровідного стану в нормальний

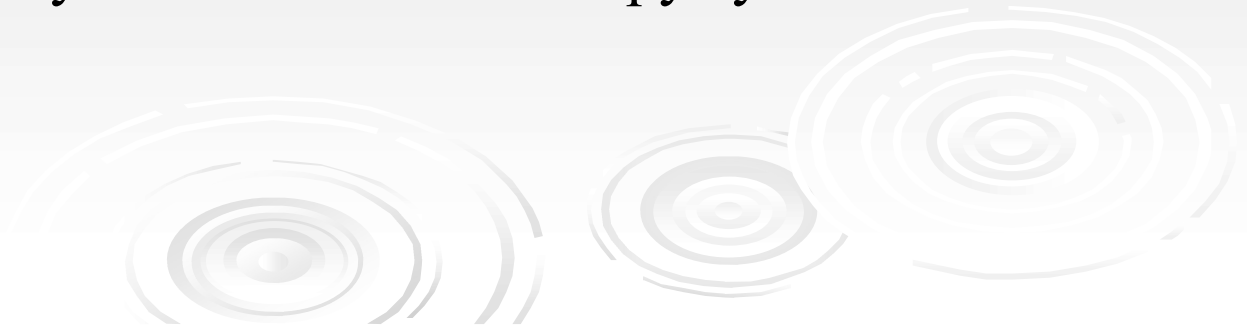
Струмообмежувач з насиченим магнітопроводом

Забезпечує переваги:

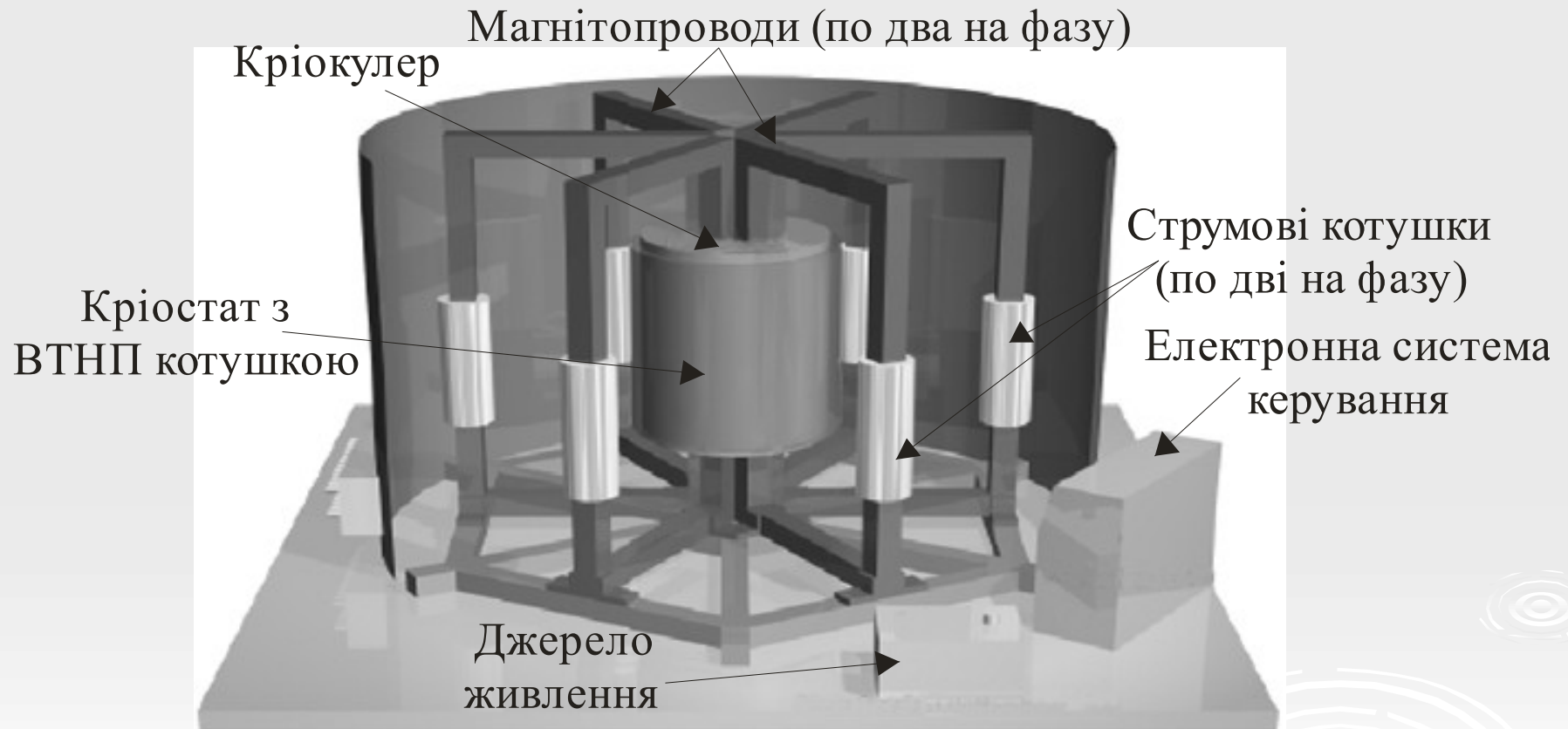
- автоматичне і негайне спрацьовування;
- пасивне і негайне відновлення після аварії;
- надійне спрацьовування;
- збереження струмопровідного стану;
- підтримка селективності мережі;
- здатність управляти і налаштовувати обмежувач струму на різні параметри для певних вимог та місць установки.

Недоліки:

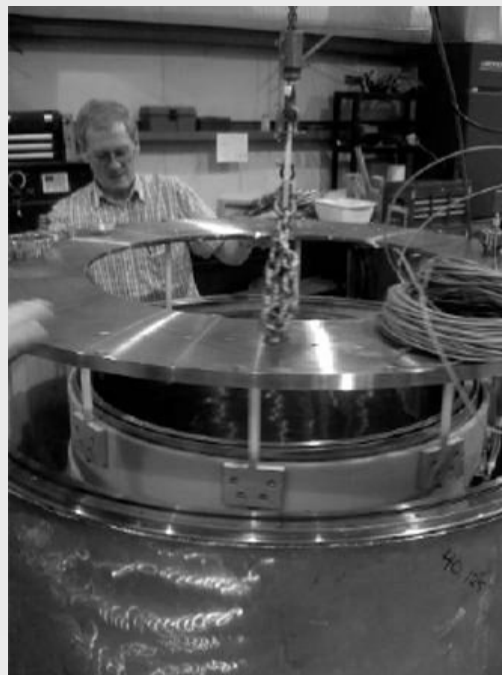
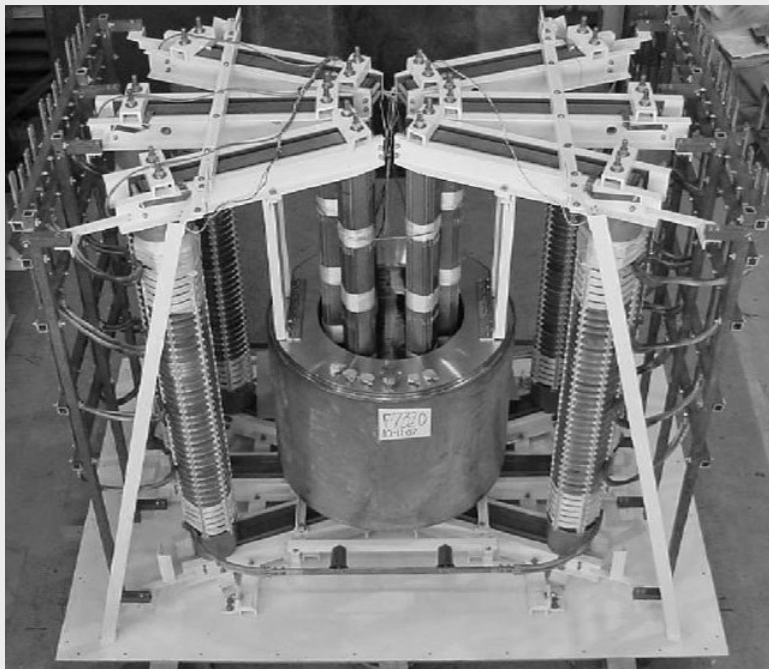
- надмірні габарити і вага
- впливу потокозчеплення між мережевими котушками і НП котушками підмагнічування постійного струму.



Трифазний обмежувач струму із насиченим магнітопроводом *SC Power* (12 кВ; 1,2 кА) для Каліфорнійській енергомережі (2007 р.)



Прототип НПОС виробництва *SC Power, США* (13 кВ / 10 кА)



a) зовнішній вигляд;

б) криостат з ВТНП котушкою;

в) встановлені криокулери

Проект передбачає розробку НПОС для встановлення у високовольтні лінії електропередачі класу напруги 138 кВ

Обмежувач струму з насиченим магнітопроводом потужністю 90 МВА. Компанія *Innpower*, Китай



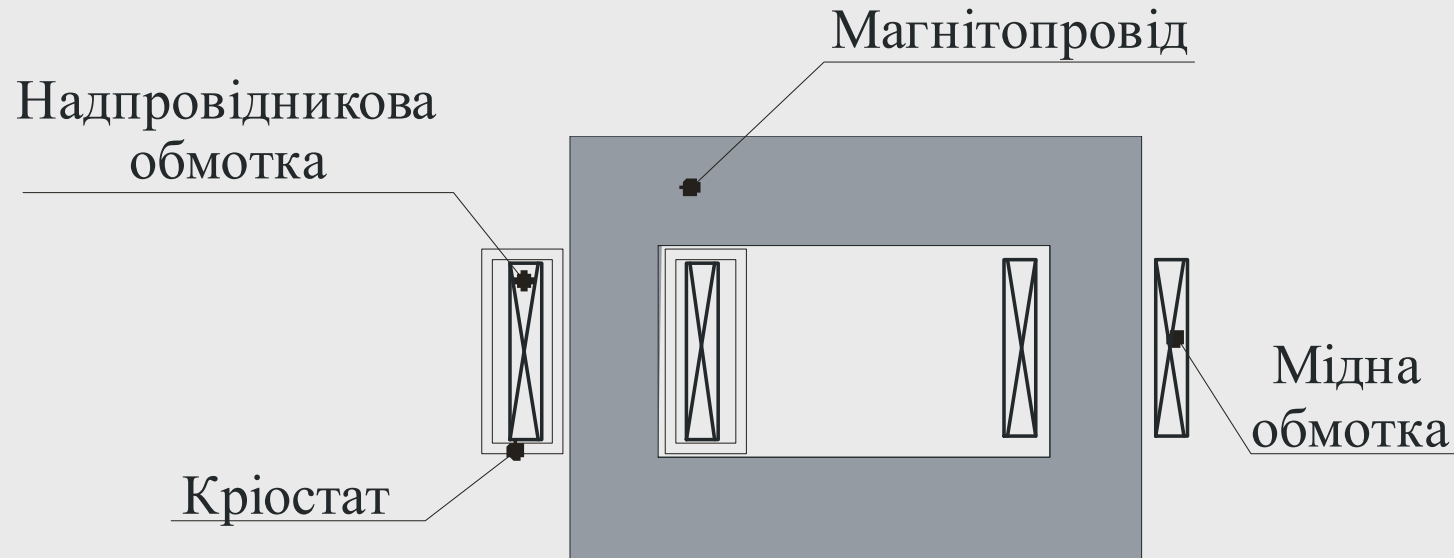
Трифазний ВТНПОС



ВТНП котушка обмежувача струму

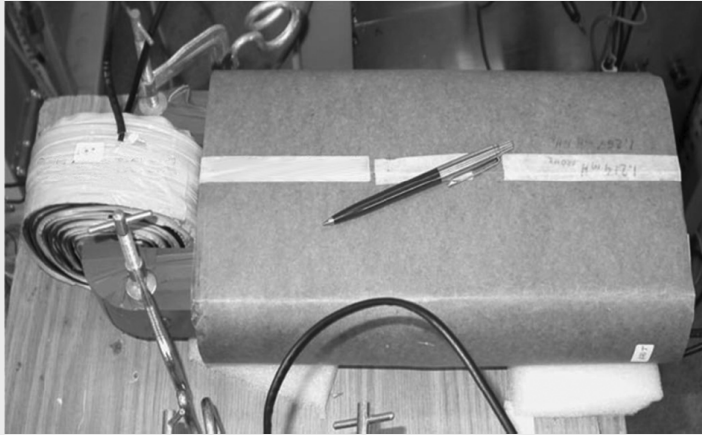
Параметр	Значення
Номинальна напруга, кВ	35
Номинальний струм, кА	1,5
Вага, т	27
Висота, м	4,2
Діаметр, м	4
Максимальний очікуваний струм КЗ, кА	41
Діаметр котушки внутрішній / зовнішній, мм	1280 / 1340
Висота котушки, мм	880
Час повного обмеження, мс	< 5
Час відновлення надпровідного стану, мс	< 800

Схема НПОС з насиченим магнітопроводом компаній *Var-Plan University* і *Ricor* (Ізраїль)

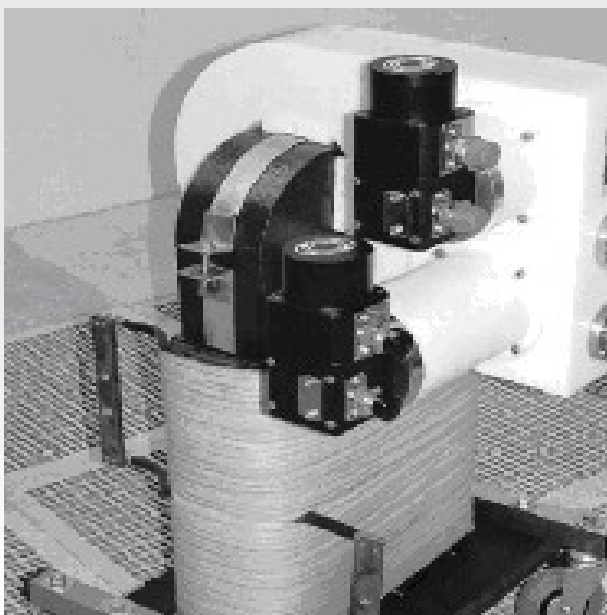


Складається з одного магнітопроводу, що охоплює кільцевий криостат із ВТНП котушкою підмагнічування. Магнітопровід служить осердям для мідної котушки, крізь яку протікає струм, що обмежується. Між обмотками струмообмежувача майже відсутній індуктивний зв'язок (1 %), що знімає проблему наведених струмів і перенапруг у ВТНП котушці. У номінальному режимі роботи ВТНП котушка вводить магнітопровід у насичений стан – індуктивний опір пристрою малий. У випадку короткого замикання релейний захист включає схему швидкого розряду, струм у ВТНП котушці швидко спадає, магнітопровід виходить із насичення, отже індуктивний опір пристрою різко зростає. Маса струмообмежувача *Ricor* більш ніж в 2 рази меншою порівняно з масою струмообмежувачів *SC Power* і *InnoST* (Китай) тієї ж потужності, однак, при цьому витрата ВТНП матеріалів також виростає в декілька разів.

НПОС виробництва *Ricor*



потужністю 4,2 кВА (400 В, 10,5 А)
(котушка підмагнічування зліва)



потужністю 120 кВА (400 В, 300 А)

НПОС потужністю 120 кВА (400 В, 300 А):

ударний струм 1...8 кА, коефіцієнт обмеження 1,6...2,4.

У номінальному режимі падіння напруги на обмежувачі струму становить 4...5 % від напруги мережі, а у режимі обмеження зростає більше ніж на 50 %.

Втрати – до 0,4 %.

Магнітопровід виконаний з перерізом 120×120 мм².

З технологічних міркувань довжина стрижня осердя становить 0,68 м.

Дві котушки змінного струму, по 20 витків кожна, були виготовлені з мідного проводу прямокутного перерізу 5×25 мм² і з'єднані паралельно.

Загальна висота котушки змінного струму – 0,44 м. ВТНП котушку постійного струму виготовили з набору 7 плоских спіралей, 180 витків кожна, що в сумі складає 1260 витків.

Для виготовлення котушки використовувався ВТНП провід Ві-2223.

Габарити приладу склали $70 \times 70 \times 130$ см включно з кріосистемою, а вага – 250 кг.

Система охолодження *Ricor* включає два кріогенних компресори потужністю 3 кВт, які керують двома кріоголівками з тепловою навантажувальною здатністю 30 і 40 Вт при температурі 77 К.

Робоча температура обмежувача струму 60 К. Кріостат неметалевий для запобігання наведення вихрових струмів.

Надпровідниковий обмежувач струму резисторного типу

Створення ВТНПОС резисторного типу пов'язане з рішенням ряду завдань:

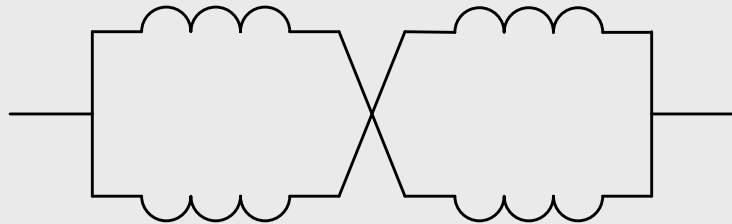
- необхідно досягти синхронного переходу надпровідних елементів ВТНПОС у нормальний стан за час менший 5 мс;
- рівномірного нагрівання надпровідного елемента;
- час остигання надпровідних елементів повинен бути менший ніж час автоматичного повторного вмикання;
- втрати у ВТНП елементах на змінному струмі повинні бути мінімізовані для здешевлення кріогенного забезпечення.
- впровадження високотемпературних струмоводів, що забезпечило зменшення рівня навантаження системи охолодження.

На сьогоднішній день є реалізація напівпромислових ВТНПОС.

До початку 2006 р. у Німеччині, Японії і США були завершені роботи зі створення дієздатних прототипів напівпромислових ВТНПОС для мереж напругою 6-10 кВ. Найбільш тривалою програмою в Японії було співробітництво між Токійською електроенергетичною компанією (TEPCO) і компанією *Toshiba*. Метою довгострокового проекту є розробка обмежувача на напругу 500 кВ із номінальним струмом 8 кА.

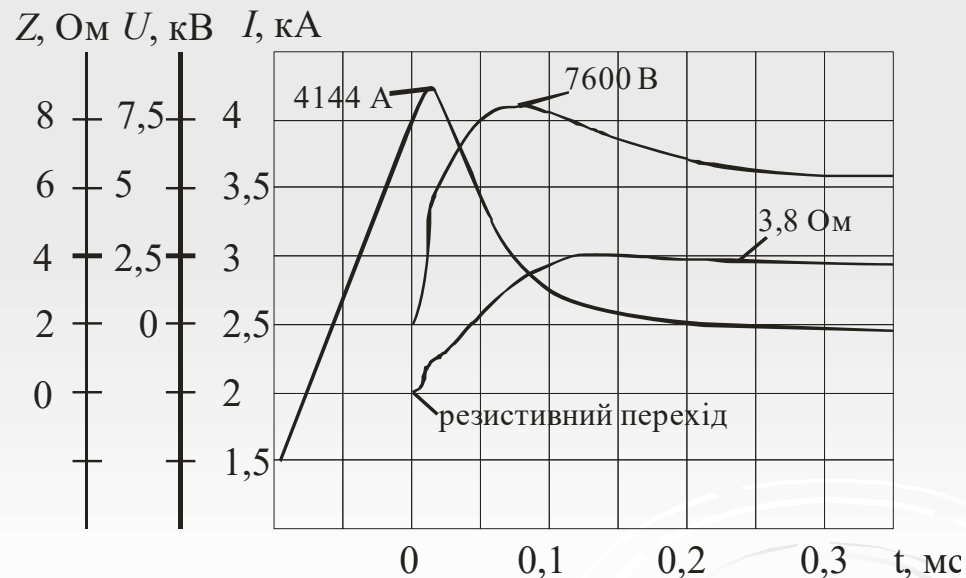
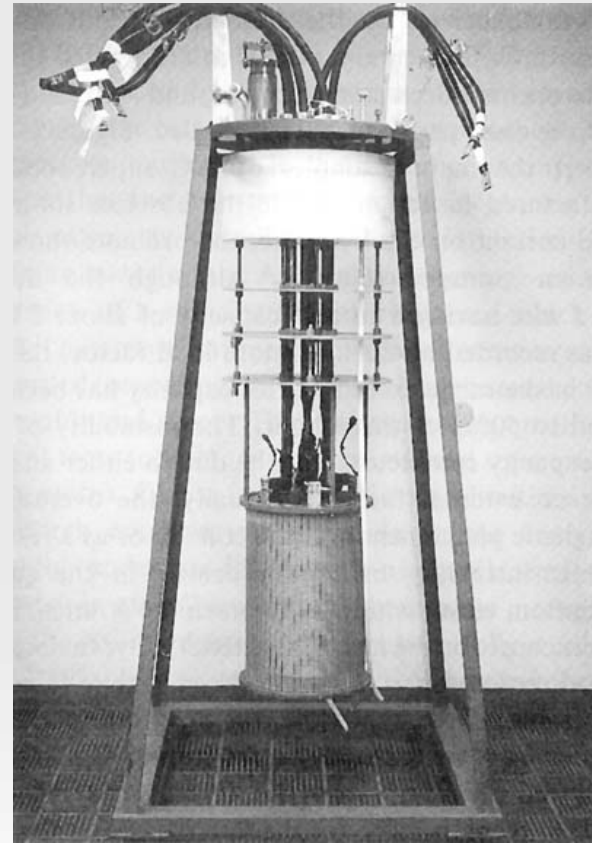
Конфігурація котушок НПОС розробки *TERCO / Toshiba* та вигляд НПОС *Toshiba* (6,6 кВ, 2 кА)

НП котушка 1 НП котушка 2



НП котушка 3 НП котушка 4

модель НПОС, яка використовує Nb-Ti елементи з низькими втратами на змінному струмі



Струмообмежувальні характеристики НПОС (*Toshiba*)

показали успішну працездатність апарата і обмеження очікуваного струму короткого замикання з 25,8 кА до 4 кА

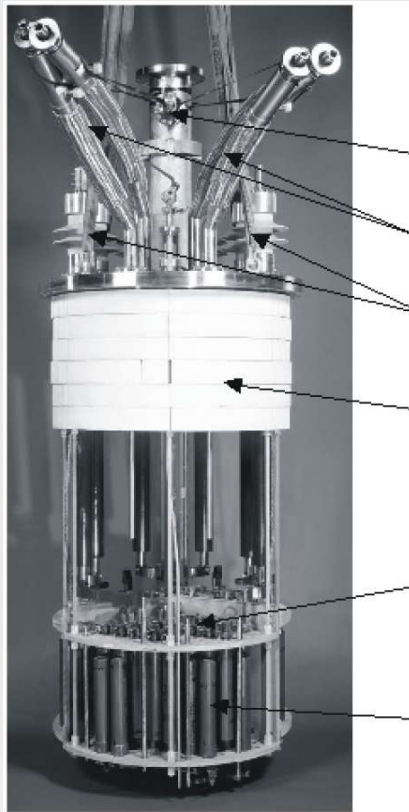
***Toshiba* і *Fujikura* у співробітництві з Міжнародним центром надпровідних технологій (*ISTEC*) і університетом Йокогами розробили й випробували трифазний струмообмежувач резистивного типу, який використовує ВТНП котушки**



ВТНП котушки струмообмежувача
Toshiba-Fujikura

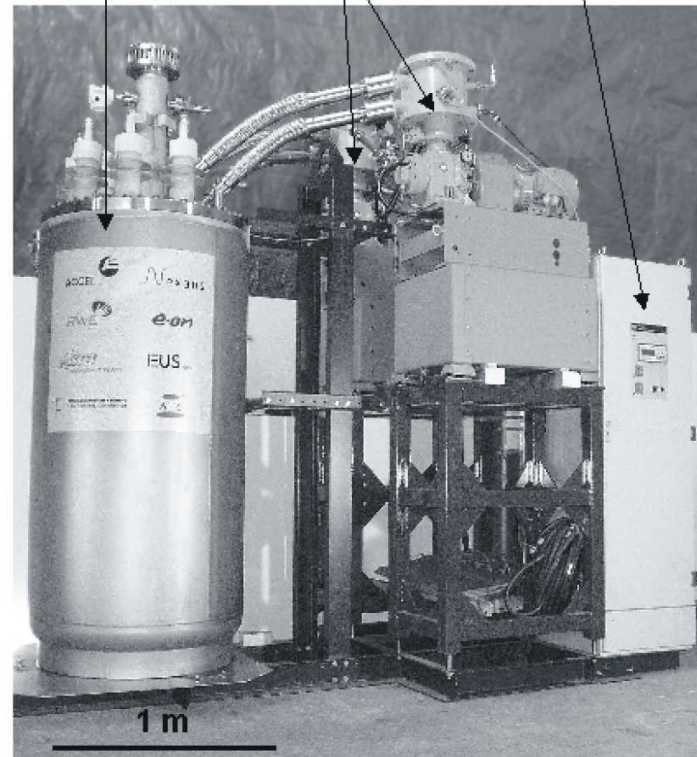
- Трифазний ВТНП струмообмежувач складається із трьох циліндричних безіндуктивних котушок, розміщених у кріостаті захолодженим до 70 К рідким азотом. Номінальний струм склав 72 А. Для підтримки в кріостаті робочої температури використовувався кріокулер.
- Для кожної з ВТНП котушок були зміряні критичні струми, як на змінному, так і на постійному струмі.
- Були проведені стендові випробування, протягом яких проводили імітацію двох- і трифазних коротких замикань. Випробування проводили при температурі 70 К і атмосферному тиску. Результати випробувань показали, що пристрій успішно обмежує ударний струм з 1560 А до 840 А (обмеження 44 %) і дозволяє зробити відключення короткого замикання за 22 мс.
- Були проведені експлуатаційні випробування ВТНП струмообмежувача, у ході яких він захищав газотурбінний генератор (*Tokyo Gas Co., Ltd*). Експлуатаційні випробування показали придатність струмообмежувача до роботи в мережі. Компанія *Toshiba* продовжує розробки резистивного НПОС і струмообмежувальних елементів зі струмом до 5 кА.

Трифазний промисловий ВТНПОС *CULR-10* потужністю 10 МВА, Німеччина



- Захисний пристрій
- Впуск азоту
- Струмовводи
- Термоізоляція
- Настановна плита
з мідними
з'єднаннями
- Біфілярні котушки

Кріостат Кріокулери Блок керування



ВТНП обмежувач без кріостата;

CULR-10 в зборці (випробування у 2004 р.)

Трифазний ВТНП струмообмежувач *CULR-10* пропускної потужності 10 МВА (10 кВ, 600 А) був встановлений у березні 2004 року в енергосистемі *RWE Energy*. Він є самим потужним ВТНП струмообмежувачем, що працює в діючій енергосистемі.

Трифазний струмообмежувач (*CURL-10*).

Біфілярна ВТНП котушка виробництва *Nexans*

Параметр	Значення
Діаметр котушки, мм	58
Висота котушки, мм	300
Довжина надпровідникового проводу, м	5,4
Площина перерізу ВТНП проводу, см ²	0,24
Критичний струм, $I_{кр}$ (при 65 К), А	850
Критичний струм, $I_{кр}$ (при 77 К), А	290
Опір при кімнатній температурі, мОм	120
Контактний опір, мкОм	< 1
Пропускна номінальна потужність (65 К), кВА	> 100

ВТНПОС складається з 90 струмообмежувальних елементів на основі ВТНП кераміки Ві-2212. ВТНП елементи зроблені у вигляді біфілярних котушок, які з'єднані послідовно, по 30 ВТНП елементів для кожної фази. Надпровідникова біфілярна обмотка є основною частиною струмообмежувача резисторного типу.

Виготовлення Ві-2212 елементів для біфілярних котушок здійснюється розплавним методом – *Melt Cast Processed*, який включає операції: плавка, відцентрове лиття, термічна обробка, насичення киснем. Ці обмотки захищені шунтом і високовольтною ізоляцією

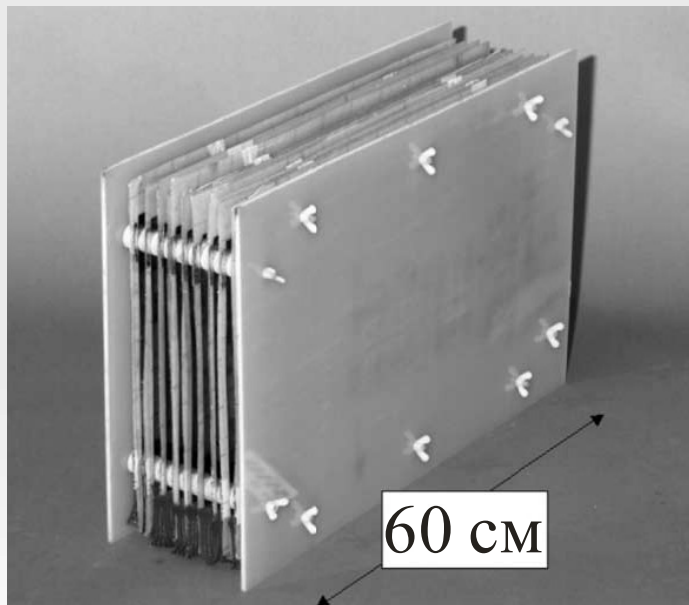


Біфілярна ВТНП котушка виробництва *Nexans*

Резистивний тонкоплівковий обмежувач струму фірми *ABB*

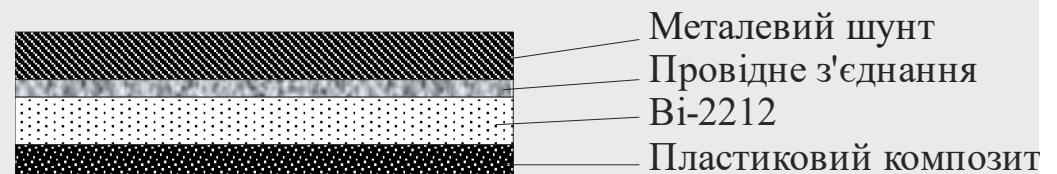
Застосування резистивної тонкоплівкової концепції є привабливим, завдяки простоті і швидкості реагування пристрою. У порівнянні з ВТНП котушками, такий струмообмежувач не потребує великої довжини НП проводу, притому допускає високу щільність струму у плівкових елементах у надпровідному стані.

прототип однофазного ВТНПОС
потужністю **6,4 МВА (8 кВ, 0,8 кА)**



ВТНП елементи (Bi-2212) зібрані
у модуль

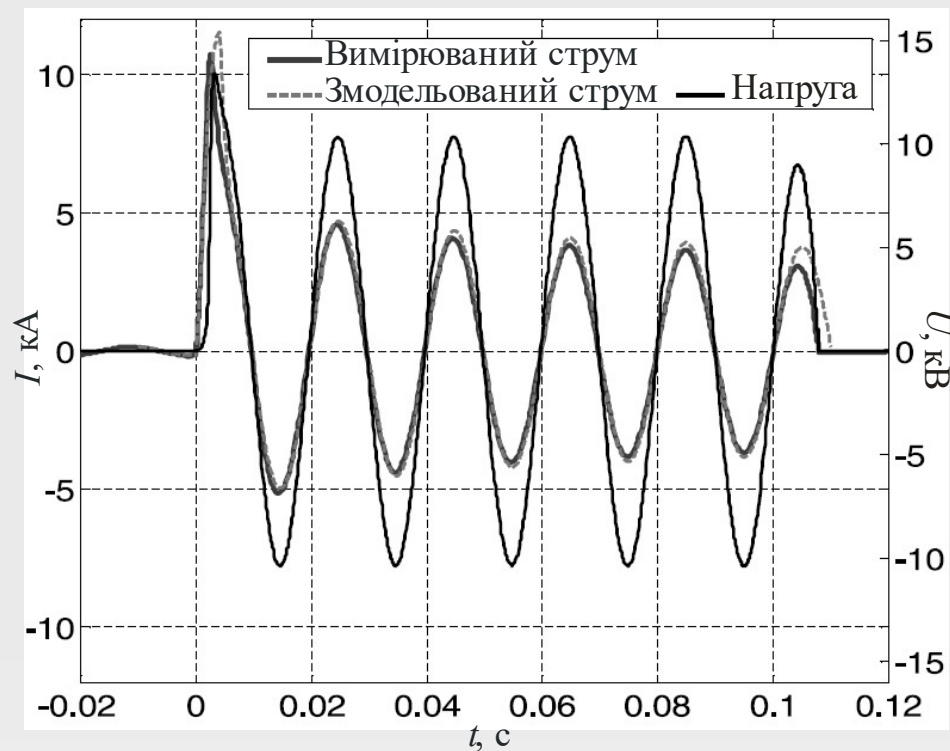
Структура ВТНП елемента



Враховуючи неоднорідність ВТНП матеріалу, фірма *ABB* звернула увагу на схильність до виникнення теплових доменів у ВТНП елементах. У структурі ВТНП елементів передбачається наявність металевого шунтуючого шару.

Такий шар дозволяє здійснити термічну стабілізацію провідника, як завдяки відводу тепла, так і забираючи надмірний струм. Аналіз показав, що найбільше для цього підходить нержавіюча сталь ($\rho = 40$ мк·Ом/см при 100 К). Металеві пластинки електрично та механічно з'єднуються з ВТНП керамікою. Структура ВТНП елементів складається з таких компонентів: шар Bi-2212 кераміки, металевий шунтуючий шар та зміцнювальний шар пластикового волокніту, армованого скловолокном

Струмообмежувальна характеристика ВТНПОС потужністю 6,4 МВА



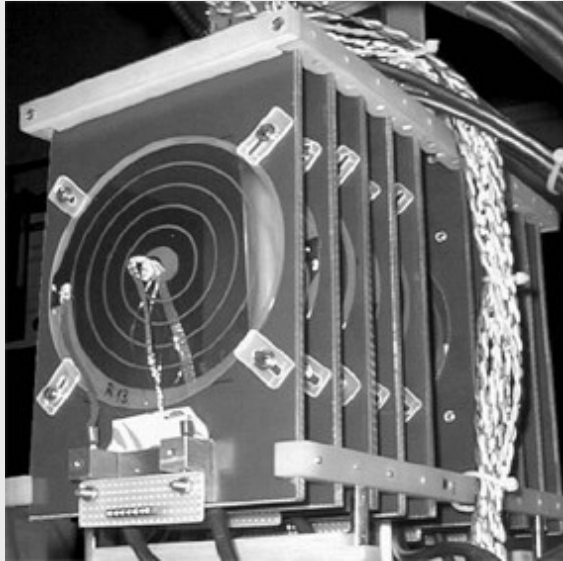
Струмообмежувальний модуль містить 100 ВТНП елементів, має достатньо компактну конструкцію – об'єм пристрою з кріостатом не перевищує 1 м³.

Було проведено 20 тестів ВТНПОС в лабораторії *ABB* (у м. Baden, Швейцарія) при напрузі 2,5...8 кВ з тривалістю КЗ 100 мс.

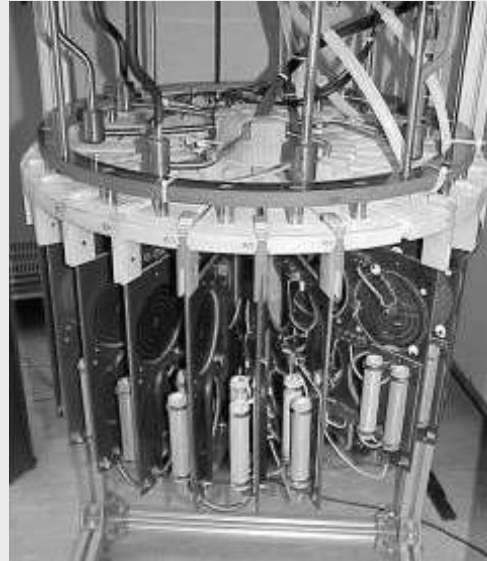
Руйнування ВТНП матеріалу при повторних випробуваннях при напрузі 8 кВ виявлено не було, пристрій виявив ефективно обмеження струму як при симетричних, так і несиметричних КЗ.

При напрузі 8 кВ очікуваний струм 20 кА був обмежений до 10,6 кА на першому піці, після 20 мс – до 3,2 кА та наприкінці після 100 мс – до 2,7 кА

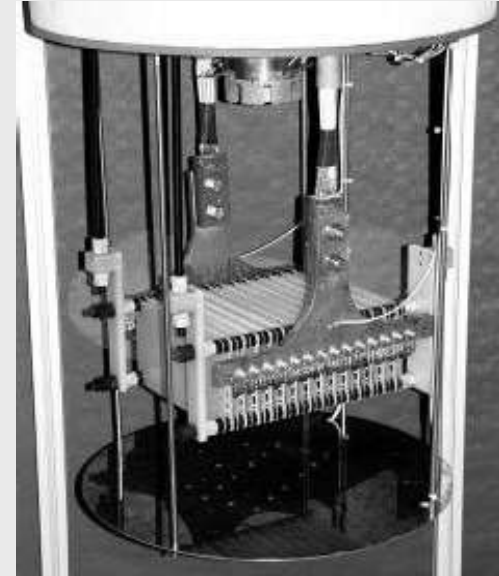
Розробки тонкоплівкової концепції обмежувача струму компанії *Siemens*



а)



б)



в)

а) однофазна модель потужністю 100 кВА (135 А / 765 В), 10 елементів, 1997 р.;

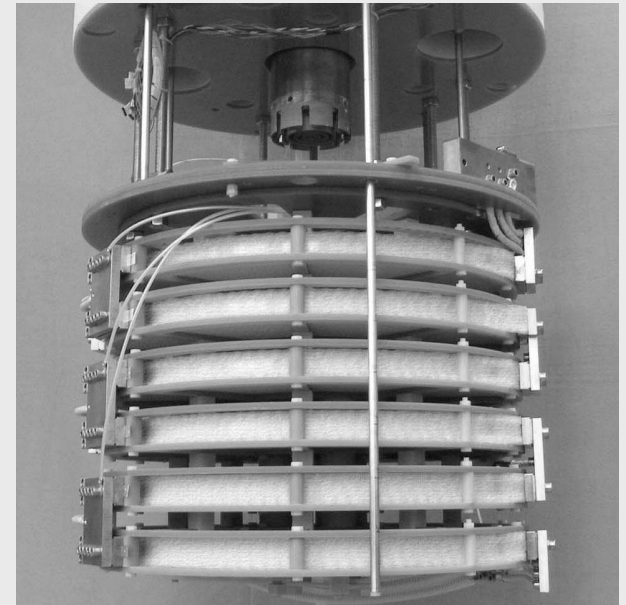
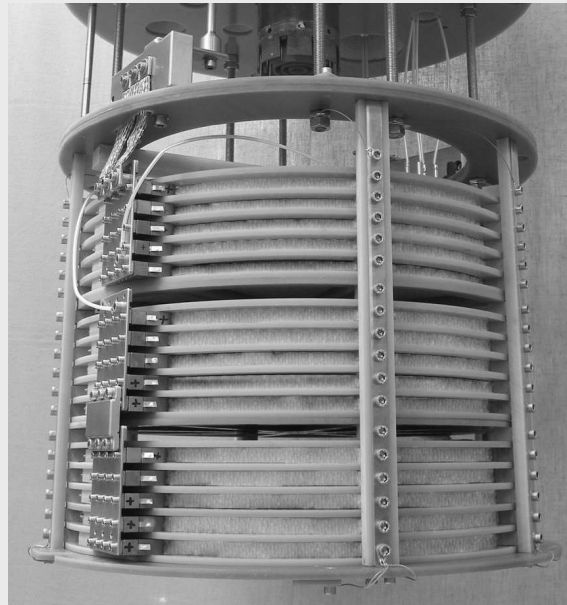
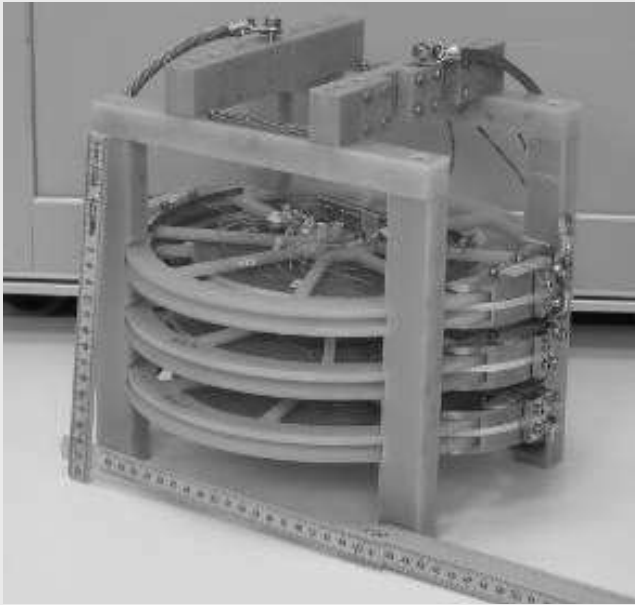
б) трифазна модель потужністю 1,2 МВА (100 А / 7,2 кВ), 63 елемента, 2001 р.;

в) однофазна модель постійного струму потужністю 900 кВА (1 кА / 900 В), 14 елементів, 2003 р.

Для забезпечення ефекту одночасного переходу від надпровідного до нормального стану шунтувальний шар золота товщиною 100 нм розміщався поверх шару YBCO. Кожний елемент виконаний у вигляді спіралі довжиною 80 см і шириною 7 мм. Для реактору на 100 кВ потрібно 10 таких елементів, з'єднаних послідовно. На рис. а зображений струмообмежувальний модуль зібраний з таких елементів YBCO/Au на Al₂O₃ дисках.

Потім модулі з'єднуються зі струмовводом і вставляються в кріостат, наповнений рідким азотом. Зниження струму короткого замикання з 666 А до 108 А було досягнуто на дослідному зразку, що працював під напругою 750 В із номінальним значенням струму 135 А

Компанія *Siemens* створила і випробувала модель трифазного ВТНПОС потужністю 1 МВА, 10 кВ на основі ітрієвих ВТНП плівок (YBCO)

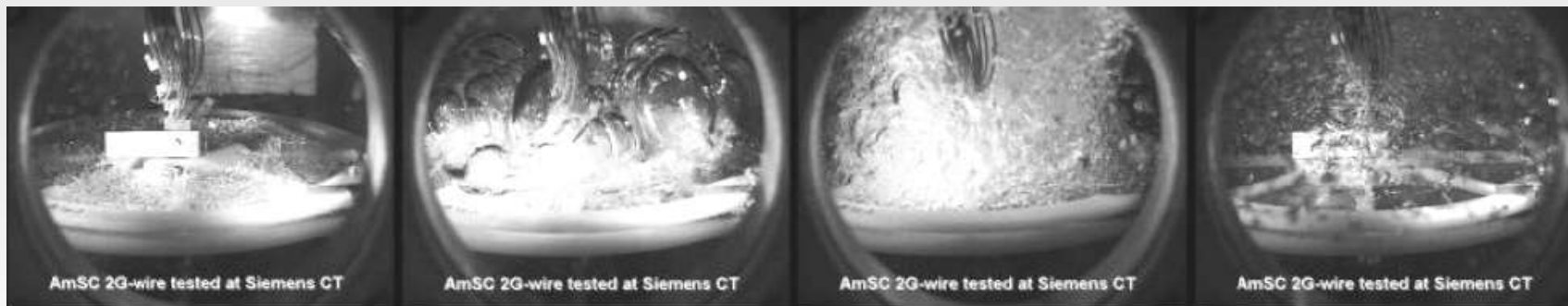


- а) модель потужністю 120 кВА (50 А / 2,4 кВ), 3 котушки, 2006 р.;
- б) модель потужністю 2,2 МВА (300 А / 7,2 кВ), 15 котушок, 2007 р.;
- в) модель потужністю 3,5 кВА (425 А / 8,4 кВ), 6 елементів, 2008 р.

Модель потужністю 2,2 МВА (300 А / 7,2 кВ), 15 котушок, 2007 р.

В 2007 р. однофазний струмообмежувач на номінальну потужність 2,2 МВА резистивного типу успішно пройшов тестування. Струмообмежувальний модуль складається з 15 плоских безіндуктивних котушок, намотаних з ВТНП провідника типу 344S шириною 4 мм довжиною 50 м, з'єднаних паралельно і послідовно (рис. б).

Випробування струмообмежувального модуля проводилося з робочим струмом 300 А при напрузі в 7,5 кВ, що відповідає звичайному для розподільних мереж США класу напруг 13 кВ. Сталий струм короткого замикання був обмежений в 25 разів. Час повернення до надпровідного стану складав близько 2 с, що близько до часу автоматичного повторного вмикання.



K3

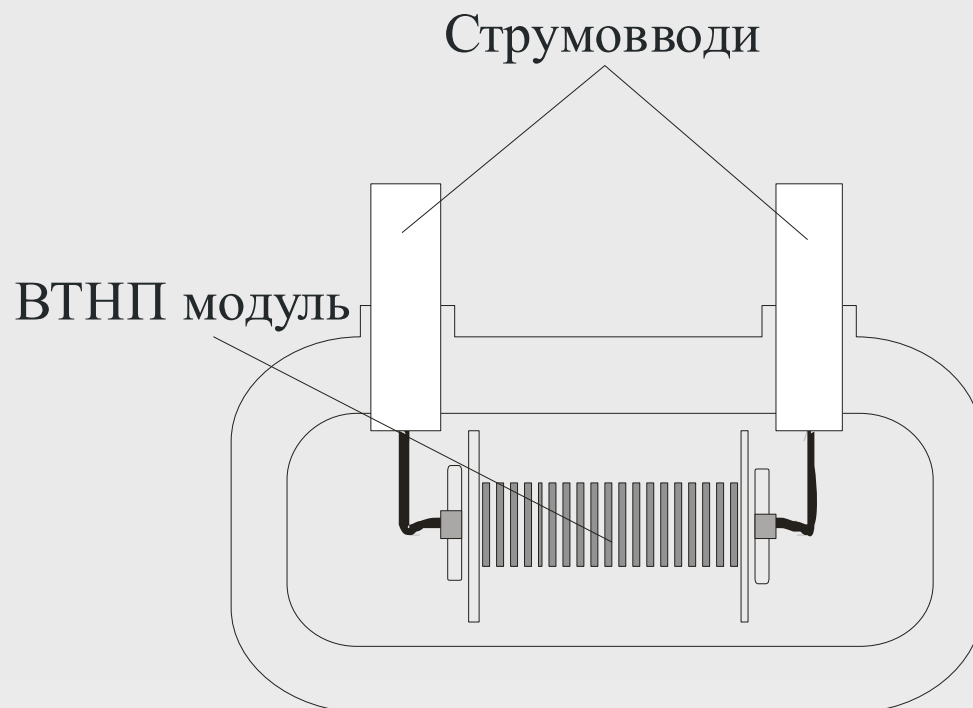
160 мс

560 мс

2 с

Остигання струмообмежувального елемента після спрацьовування (*Siemens*)

Схема кріостату високовольного ВТНПОС (*Siemens*)



Однією з основних проблем при розробці високовольних струмообмежувачів є забезпечення необхідної діелектричної міцності ізоляції. Відповідно до технічних вимог, ВТНП струмообмежувач повинен витримувати випробування напругою в 275 кВ і грозовий імпульс в 650 кВ, що вимагає особливої конструкції кріостату у формі горизонтально розташованого циліндра, на кінцях якого розташовані струмовводи

Однофазний струмообмежувач резистивного типу потужністю 8,3 МВА (13 кВ, 630 А) (*Hyundai*)



Струмообмежувач розрахований на потужність 8,3 МВА (номінальна напруга 13,2 кВ, струм 630 А).

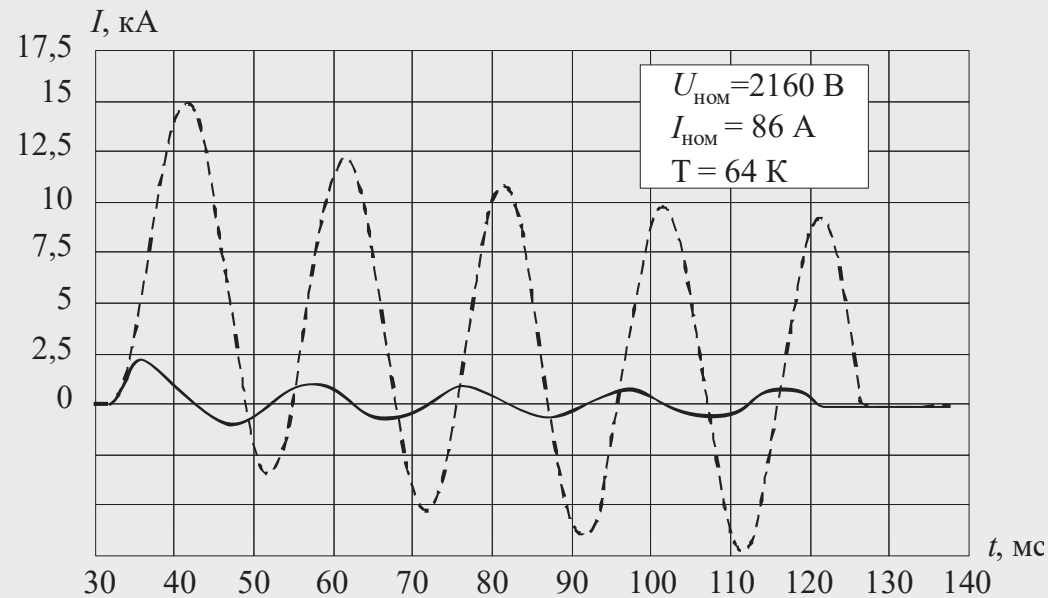
Ізоляція струмообмежувача успішно витримала високовольтні випробування при напрузі в 143 кВ, що в 3 рази вище, ніж звичайні вимоги до пристроїв даного класу напруг.

Вдалося звести обмеження ударного струму короткого замикання з 30 до 3,6 кА.

На думку фахівців *Hyundai*, ВТНП струмообмежувачі мають комерційні перспективи в мережах 30...60 кВ і 154 кВ вже в найближчому майбутньому. Подальші розробки *Hyundai* будуть спрямовані на створення високовольтних струмообмежувачів. Для цього проекту вже розроблена криогенна система високого тиску (65 К при 3 бар), а також ряд допоміжних високовольтних пристроїв

Італійський дослідницький центр *CESI Ricerca*

створив і успішно випробував кілька дослідних зразків надпровідних струмообмежувачів резистивного типу на основі Bi-2223 провідників у срібній матриці, і на основі MgB_2 провідників



КЗ в колі з ВТНПОС (безперервна лінія)
і без нього (пунктирна лінія)

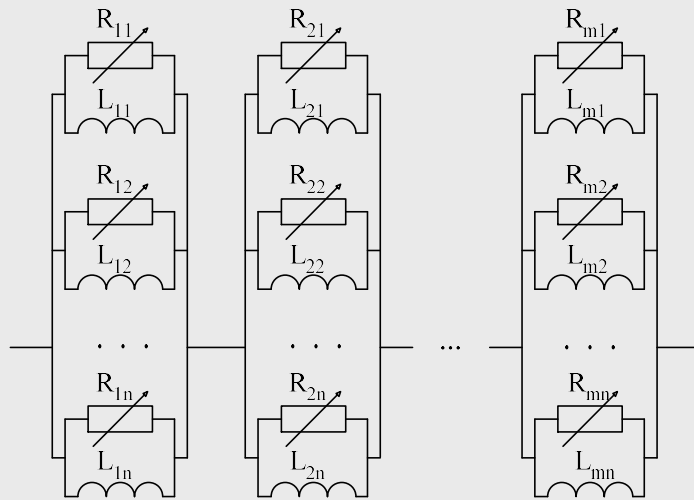
Ударний струм без ВТНП струмообмежувач а досягав 15,44 кА, використання струмообмежувач а дозволило знизити ударний струм до 2...3,1 кА.

Тривалість короткого замикання становила від 30 до 100 мс.

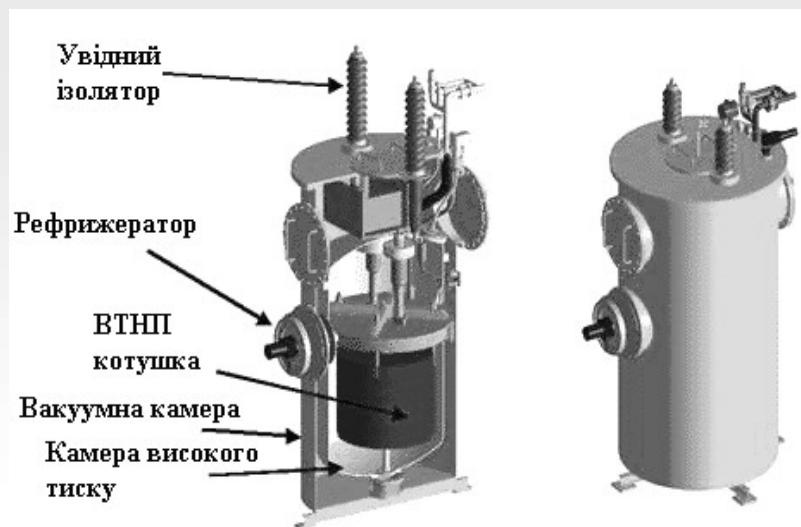
Трифазний ВТНПОС потужністю 1 МВА і номінальною напругою 2,2 кВ

заплановано виготовити ВТНП струмообмежувач із номінальною напругою 10 кВ, потужністю 15 МВА і встановити на підстанції поблизу Мілану.

Резистивний шунтованого типу матричний НПОС *Matrix* для енергосистеми *Southern California Edison* на 138 кВ, США



При перевищенні струмом критичного значення для надпровідника, він переходить у нормальний резистивний стан і вмикає котушку індуктивності в мережу, яка обмежує струм КЗ, у робочому режимі струм проходить по надпровіднику



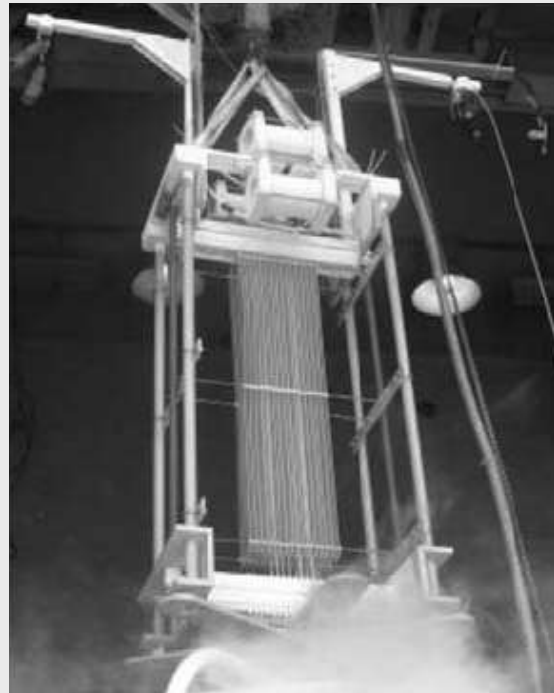
Матричний НП обмежувач струму складається з великої кількості надпровідних ВТНП струмообмежувальних елементів, шунтованих індуктивностями, які в зборці являють собою матричну структуру. Кількість рядків визначається номінальним струмом мережі, а кількість стовпців – необхідним опором для обмеження струму

Елементи для прототипу ВТНПОС *Matrix*



Котушка з нормально-провідного металу (міді) намотується безпосередньо на ВТНП елемент, який виготовлений з готовими мідними контактами, і шунтує його.

Утворюється одиничний струмообмежувальний елемент матриці, а їх об'єднання в паралель утворює модуль матриці.

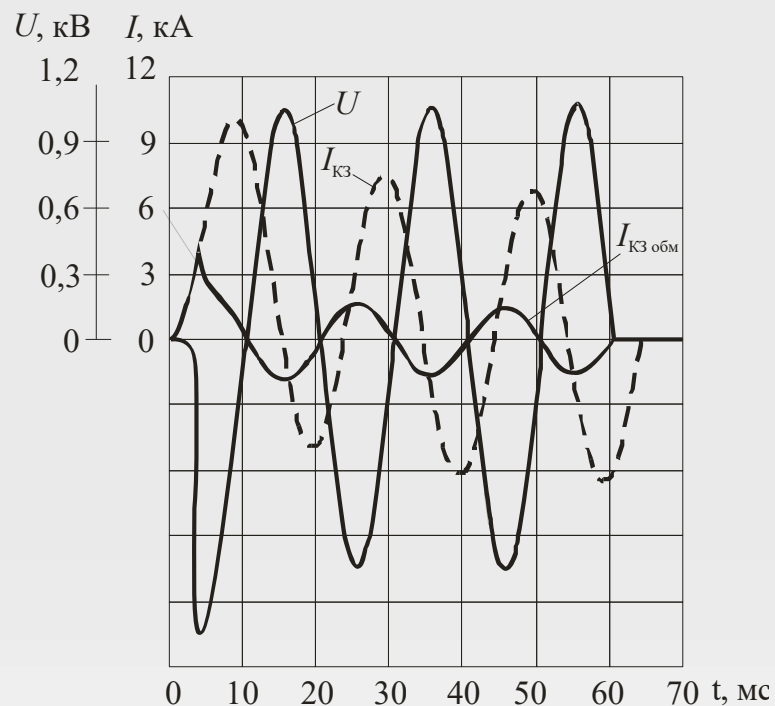


Струмообмежувальний модуль матричного ВТНПОС на номінальний струм в 1200 А

Спаї між ВТНП стрічками були розроблені таким чином, щоб виключити ризик виникнення „гарячих точок”. ВТНП модуль зашунтований мідною котушкою індуктивності, відношення реактивного опору якої до активного становить 30. Конструкція має велику охолоджувану поверхню, що дозволяє досягти відновлення ВТНП струмообмежувачем надпровідного стану за час менший автоматичного повторного вмикання (близько 0,3 с), а також забезпечує повернення ВТНП елемента в надпровідний стан у випадку протікання через нього струму навантаження

Проект *CULT-110* однофазного високовольного струмообмежувача на 110 кВ, 1850 А (Германія)

Здатен обмежувати ударний струм до 31,5 кА, а сталий струм КЗ до 6 кА



Осцилограми струму і напруги на ВТНП елементі *CULT-110*

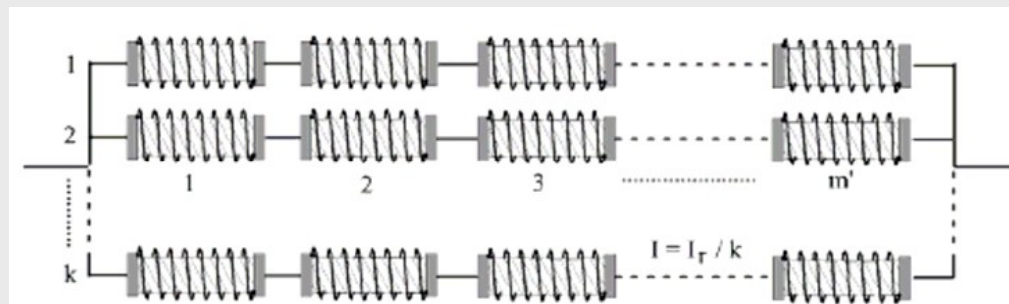
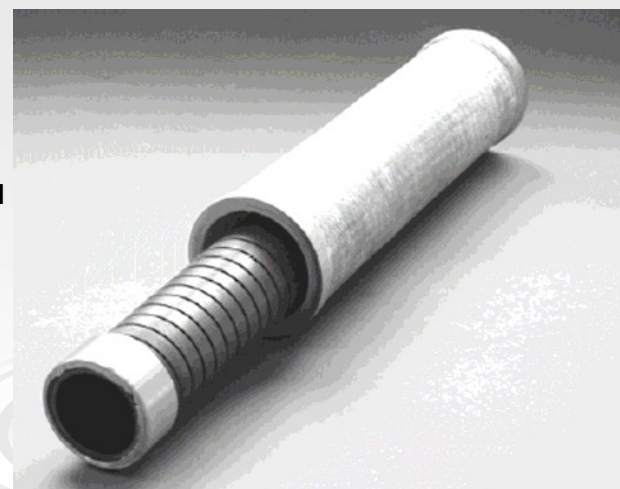


Схема з'єднання ВТНП елементів *CULT-110*
Для досягнення напруги в 110 кВ і струму в 1850 А використане послідовно-паралельне з'єднання великої кількості ВТНП елементів

ВТНП елемент для *CULT-110*. Поверх надпровідного елемента намотується мідна обмотка, з'єднана в паралель з ВТНП елементом



Трифазний ВТНП струмообмежувач на 11 кВ, компанія *Nexans*



У стендових випробуваннях ударний струм був обмежений з 10,2 кА до 3,7 кА, а сталий струм короткого замикання вдалося обмежити до 1,1 кА.

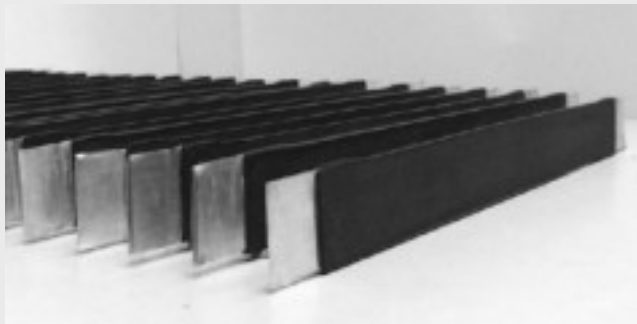
Під час випробувань ВТНП струмообмежувач піддавався багаторазовим КЗ, після 67 циклів коротких замикань тривалістю по 60 мс кожний, деградації критичних властивостей надпровідника виявлено не було.

Після закінчення стендових випробувань струмообмежувач був переданий компанії *ASL (Applied Superconductor Ltd, Великобританія)* для подальших експлуатаційних випробувань на розподільній підстанції на 11 кВ у Ланкашире, Великобританія.

Отже, матричний НПОС відмінний від НПОС резистивного типу збільшенням набору паралельно – послідовних ВТНП елементів, шунтованих котушками індуктивності.

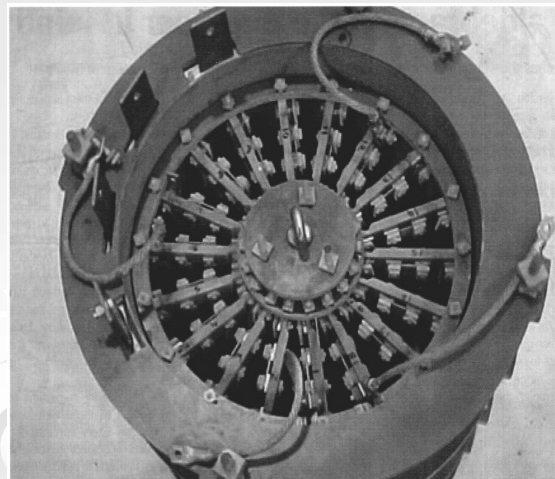
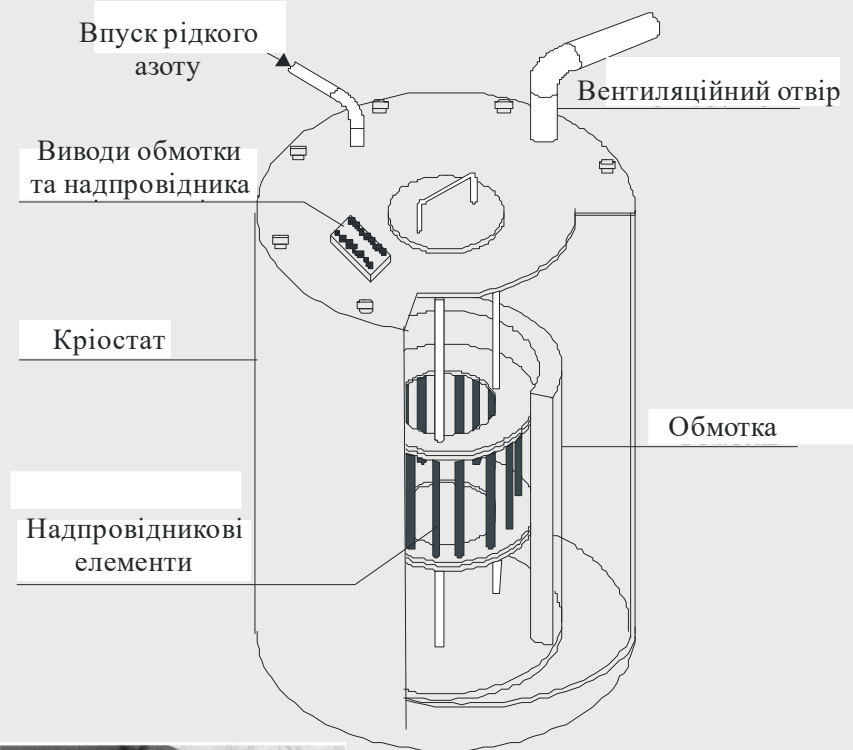
НПОС резистивно-індуктивного типу, Великобританія

Величина критичного струму у ВТНП елементах змінюється за допомогою зовнішнього магнітного поля



ВТНП елементи 800 А для ВТНПОС

Надпровідникові елементи мають форму стрижнів, кожен з яких являє собою твердий прут зі сполуки Ві-2212 із розмірами $0,25 \times 2,5 \times 25$ см. Вони безіндуктивно розміщені усередині обмежувача струму і послідовно з'єднані з нормальною провідною котушкою, намотаною з тонкоплівкової фольги. Вся система знаходиться в середині кріостату, наповненого рідким азотом



внутрішня частина з надпровідними елементами, розміщеними на ізолюючій основі, та котушкою

Струмообмежувальна характеристика ВТНПОС (EA Technology)

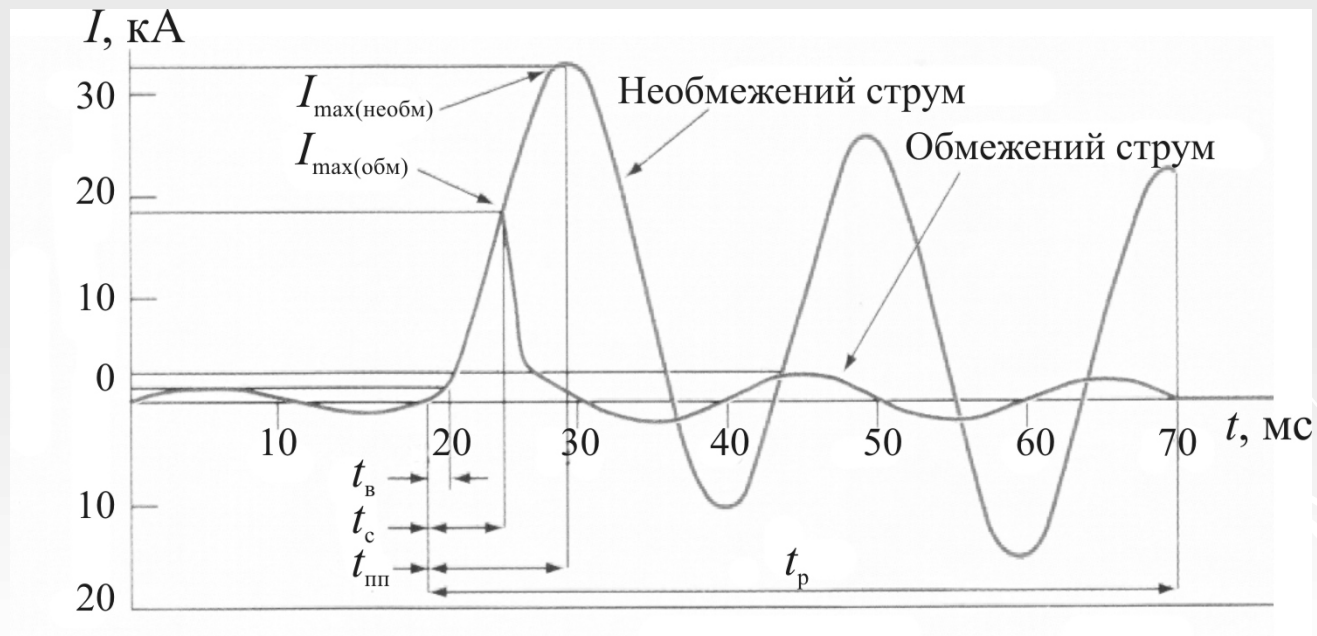
Обмотка котушки розроблена таким чином, щоб генерувати однорідне магнітне поле в зоні розміщення НП елементів.

Це зовнішнє поле використовується для досягнення однорідності і швидкого переходу НП матеріалу в нормальний стан, а також для запобігання передчасної деградації ВТНП матеріалу.

Так утворюється самозбудний механізм, настроювання якого визначається комбінацією фонового магнітного поля і критичного струму надпровідникового елемента.

За принципом дії така конструкція, безсумнівно, відноситься до резистивної схеми, але оригінальність ідеї полягає у додатковому використанні магнітного поля для забезпечення потрібного нормально–надпровідного переходу.

Випробування моделі здійснювалось під напругою 11 кВ і закінчилось у 1999 році. Дослідний зразок (з номінальним струмом 400 А) обмежував струм короткого замикання з 37 кА до 12 кА на першому пікові



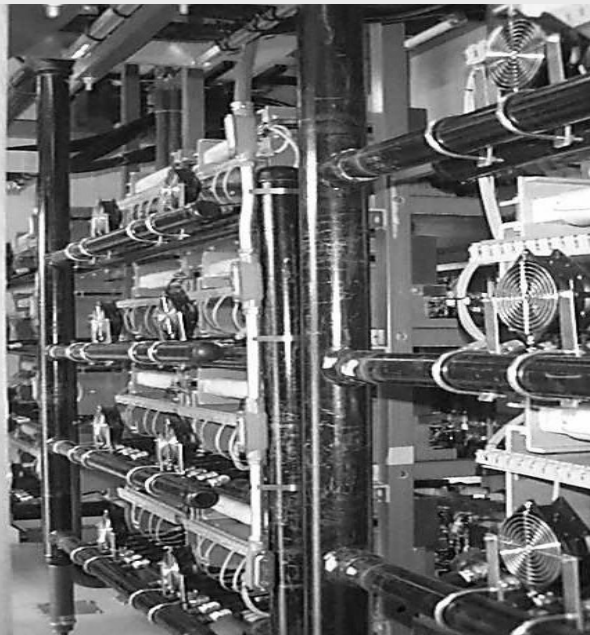
t_b – час визначення, t_c – час спрацювання, $t_{\text{пп}}$ – час до першого піку, t_p – час до розриву кола.

У США був розроблений та виготовлений зразок трифазного ВТНПОС потужністю 20 МВА

Струмообмежувач на напругу 15 кВ, розміщений на трейлері довжиною 12 м, встановлений в енергосистемі Південної Каліфорнії. Були проведені випробування апарата на напруги до 12,5 кВ. Кожна фаза ВТНПОС розміщалаь в окремому боксі на трейлері, включаючи також 200-кіловатний повітряно-масляний радіатор для охолодження електронної системи, власне заземлення та 9 компресорів для рефрижераторів, встановлених в передній і задній частині трейлеру



Зразок трифазного ВТНПОС потужністю 20 МВА



Кріостат з ВТНП котушкою

Електронна підсистема

Трифазний ВТНПОС складається з криомагнітної системи – із трьох надпровідних котушок (діаметром 1 м, довжиною 0,75 м і вагою 680 кг) та системи криоохолодження.

Кожна котушка виготовлена з Ві-2223 надпровідного проводу довжиною 15 км і охолоджується дев'ятьма криокулерами.

Параметри	Реактор
Робоча напруга, кВ	12...17
Робочий струм, А	1200
Максимальний виникаючий струм КЗ, кА	20
Обмежений струм КЗ, кА	4,0
Зниження струму, %	80
Здатність відновлення роботи реактора	Два КЗ (1 с) протягом 15 с
Електрична міцність ізоляції, кВ	110
Допустимий рівень зовнішньої температури, °С	-40/50