

Розділ 5

Надпровідні обмежувачі струму короткого замикання

За останні роки науково-технічний прогрес у галузі електроенергетики характеризується постійним зростанням генерації електроенергії, що є причиною появи надвисоких класів напруг, освоєння великих потужностей, створення енергетичних комплексів великої потужності. У свою чергу, необхідність підвищення якості електроенергії вимагає застосування електроапаратури керування і захисту відповідного рівня в мережах електропередачі. Як наслідок, ці фактори загострюють актуальну проблему захисту ліній електропередачі і споживачів електроенергії від струмів короткого замикання, які є одними із визначальних параметрів при виборі устаткування підстанцій і ліній електропередачі.

Для цього досить ефективно використовується ряд існуючих електричних апаратів і методів керування струмами короткого замикання, таких як вимикачі, плавкі запобіжники, реактори, що використовують високоімпедансні трансформатори. Але всі вони мають деякі недоліки: автоматичні вимикачі мають межу з обмеження струмів і досить велику інерційність спрацьовування; плавкі запобіжники хоча і є простими та недорогими, але енергосистема залишається непрацездатною 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.

Тому досконалого аналізу потребує проблема використання явища надпровідності в загальному процесі технічного переозброєння електроенергетики, у тому числі в галузі застосування надпровідності в електроапаратурі. Протягом останніх десятиліть ведеться інтенсивна робота з розроблення і впровадження в електричні мережі промислового прототипу швидкодіючого надпровідного обмежувача струму (НПОС) короткого замикання (КЗ), що відкриває нові можливості з їх захисту.

Надпровідні обмежувачі аварійних струмів можуть використовуватися замість масляних вимикачів, силових плавких вставок, піротехнічних захисних пристроїв, перевершуючи останні з таких технічних параметрів, як швидкість спрацьовування в діапазоні мілісекунд та витрати енергоспоживання. Окрім цього, допускається також плавне дистанційне регулювання напруги, яке спри-

яє збільшенню пропускної здатності електромереж, збільшенню числа споживачів енергосистеми без вмикання додаткових комутуючих пристроїв та трансформаторів, і забезпечує певні функціональні переваги. Повні втрати у струмообмежувачі повинні бути менше втрат у трансформаторі. В надпровідному струмообмежувачі повні втрати складаються з втрат на змінному струмі в НП елементах, втрат у нормально провідних елементах конструкції і споживаної енергії на охолодження.

Перевага застосування НП струмообмежувачів полягає у зменшенні ваги, розмірі і вартості електроенергетичного устаткування, можливості використання автоматичних вимикачів з більш низькими характеристиками переривання струму і застосуванні більш ефективних схем роботи електромережі [208].

5.1. Конструкція та принцип дії надпровідного обмежувача струму короткого замикання

Основна вимога до струмообмежувача полягає в тому, щоб ударне і установлене значення струму КЗ в електричній мережі, у якій він установлений, не перевищувало припустимої величини. Крім того, струмообмежувач не повинен негативно впливати на параметри електроенергетичної системи при нормальному режимі роботи.

Упровадження НПОС є одним з перспективних способів використання явища надпровідності для ефективного обмеження струмів КЗ. Принцип дії швидкодіючих НПОС базується на нелінійності вольт-амперної характеристики надпровідника, опір якого змінюється залежно від величини струму.

НПОС вмикається у частину мережі, яка передбачає захист від аварійних режимів. Його перевага полягає в надмірно низькому опорі у порівнянні із традиційними струмообмежувальними реакторами в нормальному режимі. Крім того, є можливість практично безінерційно збільшувати його опір до необхідної величини при короткому замиканні. Це дозволяє використовувати НПОС у мережах з напругою до 500 кВ для координації струмів КЗ з відмикаючою здатністю комутаційної апаратури. Унікальні властивості надпровідних матеріалів дозволяють створювати струмообмежувачі, що не мають аналогів серед традиційних електротехнічних пристроїв. Умикання струмообмежувачів у певні вузли енергосистеми дозволить продовжити строк роботи комутаційної апаратури і створить умови для її поступової заміни сучасним устаткуванням.

Роботи із упровадження різних типів НПОС у дослідно-промислову експлуатацію активно проводяться у промислово розвинених країнах Європи, США та Японії.

За конструктивними особливостями можна виділити та розглянути дві

основні схеми НПОС: резистивну (рис. 5.1 *а, б*) і індуктивну (рис. 5.2, 5.3). Вони є базовими, на них ґрунтується більшість інших пропонованих конструкцій, які повинні задовольняти тим же вимогам. При використанні мостових діодних схем з розташуванням в мосту резистивного або індуктивного ВТНП елемента можна виділити випрямний тип ОСКЗ.

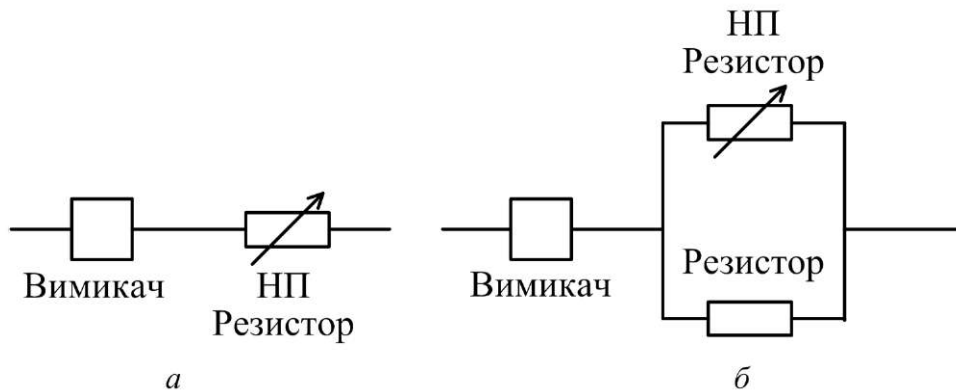


Рисунок 5.1 – Резистивний НПОС послідовного (*а*) та шунтованого (*б*) типів

Резистивне виконання, у свою чергу, підрозділяється на два види: послідовне (рис. 5.1, *а*) і шунтоване (рис. 5.1, *б*). 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.

У нормальному режимі функціонування захищеного кола амплітуда номінального струму нижче, ніж критичний струм НП елемента, і цей елемент знаходиться в надпровідному стані із нульовим опором. В аварійному режимі струм КЗ у колі зростає і викликає перехід НП елемента в резистивний стан, збільшується активний опір НП елемента, таким чином, результуючий опір обмежує струм КЗ. Струмообмежувач має повністю здійснювати перехід у резистивний стан за час, менший 5–10 мс, і витримувати сильне тепловиділення (для досягнення прийняттого часу відновлення надпровідного стану). Застосування послідовного резистивного струмообмежувача можливо в тих випадках, коли достатньо декількох хвилин відновлення після спрацьовування.

Принцип струмообмежувача шунтованого типу виконання аналогічний послідовному, але при цьому паралельно надпровіднику підключається резистор або котушка. В номінальному режимі роботи струм тече крізь НП елемент, тому що елемент знаходиться в надпровідному стані. При аварійному режимі

КЗ опір надпровідника зростає до якогось значення, при якому струм переключується на паралельно з'єднаний резистор.

Таке виконання дозволяє струмообмежувачу зберігати достатню швидкість при декількох КЗ підряд, тому що надпровідник не нагрівається так сильно, як при послідовному з'єднанні. Але виготовлення шунтованого струмообмежувача потребує дещо більшу кількість ВТНП проводу [208].

Індуктивна конструкція НП струмообмежувача також використовує нелінійність вольт-амперної характеристики надпровідника. Цей тип конструкції можна уявити у вигляді трансформатора з НП нелінійним резистором в якості навантаження вторинної обмотки (рис. 5.2).

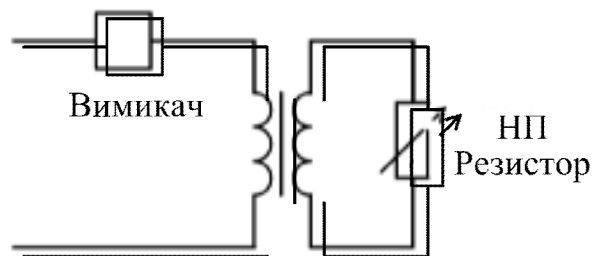


Рисунок 5.2 – Індуктивний НП струмообмежувач

Принцип дії індуктивного обмежувача полягає у магнітному зв'язку між надпровідним елементом і захищеним колом. 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 надпровідній котушці. Повний опір пристрою визначається тільки потоком розсіювання в повітряному зазорі між первинною і вторинною котушками. За умов короткого замикання вторинна котушка або її частина переходить у резистивний стан внаслідок зростання струму вище критичного значення. Активний опір вторинної котушки стає значно більше, ніж індуктивний, таким чином, наведений струм у вторинній котушці різко зменшується і магнітний потік первинної котушки більше не компенсується.

Крім цього, магнітний потік у разі концентричного розташування елементів конструкції (рис. 5.3) проникає в осердя магнітопроводу, що значно збільшує індуктивність. Зміна індуктивності призводить до великого зростання або індуктив-

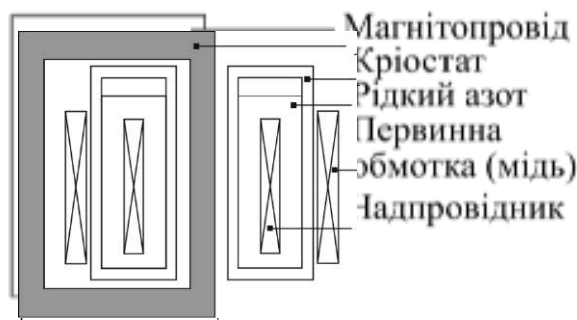


Рисунок 5.3 – Схематична конструкція індуктивного струмообмежувача

ного опору (при змінному струмі), або сталої часу (при постійному струмі), що дозволяє суттєво обмежити як струм КЗ, так і негативні наслідки, пов'язані з ним [209, 210]. Таким чином, повний опір струмообмежувача багаторазово збільшується і обмежує струм КЗ.

Найчастіше вторинні НП котушки виготовляються у вигляді набору кілець або циліндрів, що пов'язано з технологічними труднощами виготовлення багатовиткових НП обмоток, перемикаючих елементів і з'єднання цих елементів з малим перехідним опором. Відрізняються конструкції індуктивних струмообмежувачів або розташуванням надпровідних кілець, або конфігурацією магнітного осердя. Положення кілець відносно первинної котушки (усередині або зовні) не має принципового значення. Основні складності при створенні надпровідного струмообмежувача з НП екраном полягають у створенні екранів великих діаметрів.

Обмеження струму короткого замикання в НПОС індуктивного типу досягається за рахунок різкого зростання його опору, що можна здійснити різними методами: екрануванням осердя з електротехнічної сталі НП екраном, зміною ступеня насичення магнітопроводу НПОС, використанням гібридної схеми, коли обмотка, що екранує, замкнена на надпровідний елемент і т.д.

Надпровідний елемент індуктивного обмежувача струму, тобто вторинна обмотка, виготовляється з високотемпературних надпровідників. НПОС індуктивного типу були реалізовані у вигляді макетних зразків відразу після розробки технології виготовлення масивних елементів із плавленої високотемпературної кераміки (наприкінці 80-х – початку 90-х років).

Кожна з двох базових конструкцій струмообмежувача має свої позитивні якості і недоліки. Основними перевагами резистивних струмообмежувачів є відсутність котушок і магнітного осердя, отже, зменшені розміри, вага і вартість цих пристроїв. Перевагами індуктивної конструкції у порівнянні з резистивною є:

- 1) відсутність електричних з'єднань між надпровідними елементами і колом, яке захищається;
- 2) фізичний поділ криогенних і нормально провідних елементів пристрою;
- 3) більш низьке падіння напруги на активному надпровідному елементі за умов КЗ;
- 4) можливість виготовлення вторинної ВТНП котушки простим способом.

Одним з основних недоліків індуктивного струмообмежувача є те, що ра-

діуси 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 надпровідних перемикаючих елементів.

Загальною проблемою ВТНП струмообмежувачів є забезпечення швидкого і однорідного переходу перемикаючих елементів у нормальний стан, тому що при неоднорідному переході виникає тепловий домен, який може призвести до руйнування надпровідника. Ця проблема може бути вирішена за допомогою модульної концепції обмежувача струму, яка базується на паралельно-послідовному включенні великої кількості тонких плівок. Недоліками цієї конструкції є велика кількість контактів та неодноточасний перехід модулів [208].

Для практичної реалізації схеми, взятої за основу, необхідно вирішити низку технічних задач:

- ▼ оптимізувати геометричні параметри пристрою;
- ▼ знайти протидію можливому руйнуванню надпровідних елементів при великих густинах струму;
- ▼ розробити способи ефективного відведення тепла від надпровідника, що виділяється, в режимі короткого замикання;
- ▼ відпрацювати великоструміві контакти між стрижнем надпровідника і струмопідводящими лініями;
- ▼ досягти швидкого і однорідного переходу в надпровідний стан;
- ▼ забезпечити швидке відновлення після обмеження струмів КЗ.

Активне розроблення НПОС на основі ВТНП матеріалів почалося практично одночасно з появою самих ВТНП матеріалів, що пов'язано з їх покращеними властивостями, зокрема температурою охолодження до надпровідного стану. За останні роки було розроблено і запропоновано різні схеми НПОС на основі ВТНП провідників, деякі з них були реалізовані у вигляді досить потужних демонстраційних зразків.

У табл. 5.1 наведені реалізовані НПОС як на основі ВТНП, так і деякі на низькотемпературних надпровідниках, адже вони послужили прототипами для подальших розроблень з ВТНП. Наведені також параметри НПОС, розроблення яких тривають [208, 211, 212].

Деякі конструкції НПОС різних видів та їх модифікації будуть розглянуті далі більш детально. Прототипи цих НПОС було реалізовано у дослідно-промислових макетах у рамках науково-дослідних проектів та програм з розроблення надпровідного обладнання у різних країнах.

Таблиця 5.1 – Проекти надпровідних струмообмежувачів

Компанія	Країна	Рік	Тип	Напруга, кВ	Струм, кА	Потужність, МВА	Кількість фаз	ВТНП
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>GEC</i>	Франція	1995	Резистивний	36	0,21			Nb-Ti тонка плівка
<i>ABB</i>	Швейцарія	1999	Індуктивний	8,3	0,2	1,6	1	BSCCO 2212 масив
<i>ABB</i>	Швейцарія	2001	Резистивний	8	0,8	6,4	1	BSCCO 2212 масив
<i>Toshiba/TEPCO</i>	Японія	1998	Резистивний	6,6	2		1	Nb-Ti масив
<i>Mitsubishi</i>	Японія	2004	Резистивний	0,2	1	0,2	1	YBCO тонка плівка
<i>CRIFPI</i>	Японія	2004	Резистивний	1	0,04	0,04	1	YBCO тонка плівка
<i>EA Technology</i>	Велико-британія	1999	Резистивно-індуктивний	11	0,4	7,5	1	BSCCO 2212 масив
<i>Rolls Royce*</i>	Велико-британія	2007	Резистивний	6,6	0,4		1	MgB ₂ провід
<i>Siemens/Hydro-Quebec</i>	Німеччина/ Канада	1999	Резистивний	0,77	0,135	0,1	1	YBCO тонка плівка
<i>Alcatel</i>	Франція	2001	Резистивний	0,1	1,4		1	YBCO тонка плівка
<i>General Atomics</i>	США	2002	Випрямний	12,5	1,2	9	3	BSCCO 2223 стрічка
<i>ACCEL/Nexans (CURL-10)</i>	Німеччина	2004	Резистивний	10	0,6	10	3	BSCCO 2212 масив
<i>Nexans (CULT 110)</i>	Німеччина	2008	Резистивний	63,5	1,8		1	BSCCO 2212 масив
<i>Siemens</i>	Німеччина	2000	Резистивний	4,2	0,1		3	YBCO тонка плівка
<i>Siemens/AMSC</i>	Німеччина/ США	2007	Резистивний	13	0,3	2,3	1	YBCO тонка плівка 344S
<i>Hyundai/AMSC</i>	Корея	2006	Резистивний	13,2	0,63	8	1	YBCO тонка плівка 344S
CAS (Chinese Academy of Sciences)*	Китай	2005	Випрямний	10	1,5	90	3	BSCCO 2223 стрічка
<i>Innower</i>	Китай	2007	Насичений магнітопровід	10	1,5	27	3	BSCCO 2223 стрічка
РНЦ "Курчатовський інститут"	Росія	2004	Насичений магнітопровід	10	0,12	1	3	BSCCO 2223 стрічка
<i>Ricor</i>	Ізраїль	2007	Насичений магнітопровід	0,4	0,3	0,12	1	BSCCO 2223 провід
<i>Zenergy power</i>	США, Австралія, Німеччина	2007	Насичений магнітопровід	138			3	BSCCO 2223 провід
<i>KEPRI</i>	Корея	2004	Резистивний	3,8	0,2		3	YBCO тонка плівка
<i>KEPRI</i>	Корея	2007	Резистивний	13,2	0,63	25	3	BSCCO 2212 масив
<i>Yonsei University</i>	Корея	2004	Випрямний	3,8	0,2		3	BSCCO 2223 стрічка
<i>Nexans, RWE (INES 110)</i>	Німеччина	2010	Резистивний	110	1,8	343	3	BSCCO 2212, масив

Продовження табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Siemens/AMSC</i>	США	2011	Резистивний	115		>200	3	YBCO тонка плівка 344S
<i>Super Power/SEI</i>	США	2011	Резистивний	138		>240	3	YBCO тонка плівка

5.2. Індуктивний надпровідний обмежувач струму

5.2.1. Надпровідний обмежувач струму з екранованим осердям

Як вже йшлося вище, принцип дії індуктивних НПОС базується на зміні індуктивного опору приладу, що, зокрема, може відбуватися за рахунок переходу надпровідника у нормальний стан (рис. 5.3). Така схема індуктивного НПОС є прикладом струмообмежувача трансформаторного типу, як його і називають у деяких роботах [213–215]. Первинна обмотка такого приладу вмикається в електромережу, а вторинна – короткозамкнена. Концепція такого НПОС може бути реалізована з обома обмотками, виготовленими з металевого проводу, але вторинна – замикається на НП елемент [213, 216]. Перевагою такого підходу можна вважати те, що необхідна кількість надпровідника для перемикаючого елемента менша ніж для екрана, крім цього, кріостат можна розмістити зовні магнітної системи. Але при цьому збільшуються теплові втрати та з'являється необхідність в контактних з'єднаннях НП елемента з обмоткою. Індуктивний струмообмежувач з вторинною НП котушкою, короткозамкненою тонкоплівковим НП елементом, є прикладом комбінації переваг резистивної і індуктивної конструкцій. Основна схема індуктивного струмообмежувача, що розробляється, використовує повністю НП котушку, виготовлену у формі циліндра або кілець [217], яка екранує феромагнітне осердя.

У роботі корейських вчених з *Yonsei Univ.* досліджені струмообмежувальні властивості індуктивного ВТНП реактора, який містить допоміжну (додаткову) обмотку. ВТНП реактор складається з первинної мідної обмотки, вторинної ВТНП обмотки у вигляді кільця і допоміжних ВТНП обмоток (також кілець), магнітний зв'язок між якими здійснюється через тристрижневий магнітопровід. ВТНП реактор послідовно включається в енергетичну систему з метою обмеження аварійного струму. Пристрій швидко змінює повний опір при КЗ. Для певних діапазонів величини магнітного потоку та тривалості імпульсу струму амплітуда аварійного струму може стати надто великою через насичення магнітопроводу. А допоміжна обмотка здатна збільшити імпеданс пристрою на 31,3 %, запобігаючи насиченню магнітопроводу. Основні ВТНП елементи пристрою, який складається на 30 % з $Y_2BaCu_5O_5$ і на 70 % з $YBa_2Cu_3O_7$, – кільця із зовнішнім діаметром 64 мм, внутрішнім 51 мм, і висотою 5 мм. Критичний струм 530 А, робоча напруга в досліджуваному ланцюзі – 50 В, а струм у мідній

обмотці при КЗ порядку 10 А (причому без ВТНП елемента він міг би скласти кілька сотень амперів) [218].

Велика кількість наукових досліджень, пов'язаних з розробленням індуктивного НПОС, що базується на різних схемах, проводиться у Японії.

Центральний Науково-дослідний інститут Електроенергетики *CRIEPI* розробив індуктивний обмежувач, конструктивна схема якого подана на рис. 5.4. Він подібний до конструкцій, запропонованих фірмами *ABB* (Швейцарія) і *Hydro Quebec* (Канада), які базуються на використанні циліндра, виготовленого з Ві-2212 або Ві-2223, для екранування залізного осердя від магнітного потоку, що утворюється мідною котушкою. У нормальному режимі роботи магнітне поле мідної котушки екранується надпровідним 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 надпровідних 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 екрана після аварійного режиму [3].

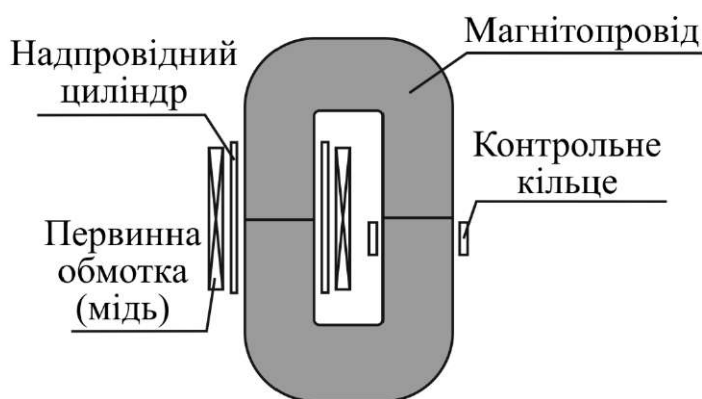


Рисунок 5.4 – Схематичне зображення НПОС (*CRIEPI*, 1995 р.)

У 1996 р. компанія *ABB* (Швейцарія) розробила „екрановану феромагнітну” концепцію обмежувача струму, подібну до описаної вище в рамках програми *CRIEPI*. Конструкція виготовленого демонстраційного НПОС складалася з надпровідного циліндричного екрана з ВТНП Ві-2212, замкненого навколо залізного осердя, розташованого усередині текстолітового сосуда Дьюара. Первинна ж мідна котушка намотана зовні безпосередньо на дьюар. Усі ці деталі розташовуються концентрично, як це показано на рис. 5.5, а. 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* (Швейцарія) і експлуатувався протягом року (рис. 5.5, б) [3, 208, 219 – 221].

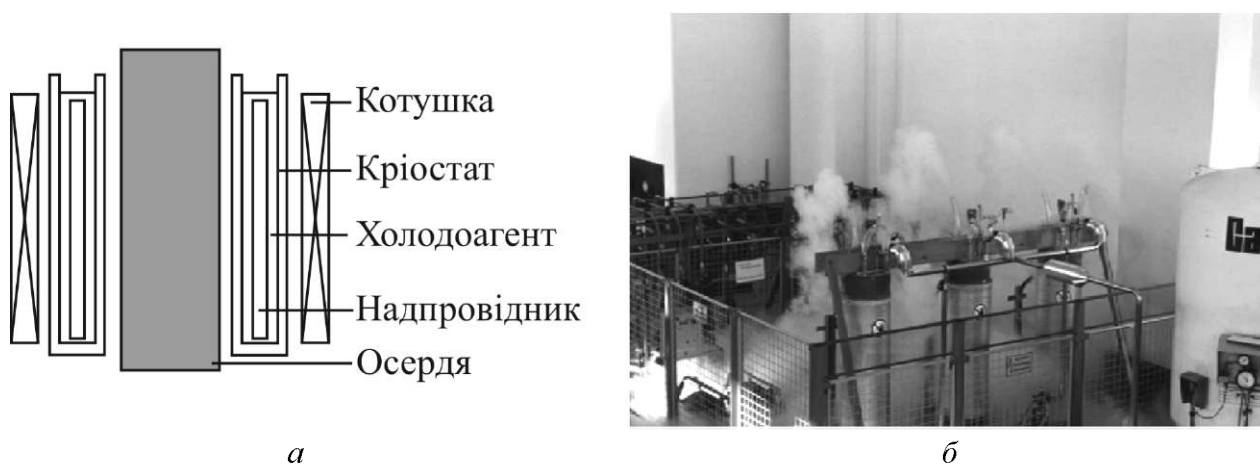


Рисунок 5.5 – Конструкція ВТНПОС (фірма *ABB*) з надпровідним екраном:
 а – схематичне зображення ВТНПОС;
 б – ВТНПОС на підстанції *Kraftwerk am Lontsch*, 1996 р.

Цей пристрій, власне кажучи, являє собою трансформатор з надпровідною вторинною обмоткою, а його первинна обмотка послідовно з'єднана із лінією, що захищається від КЗ. Під час нормальної роботи ВТНП елемент екранує залізне осердя від магнітного поля, що генерує зовнішня котушка, таким чином, забезпечується дуже низький опір для проходження струму навантаження. На рис. 5.6 подана струмообмежувальна характеристика цього ВТНПОС.

ВТНП екран виготовлений зі стопки кілець *Vi-2212* кераміки (рис. 5.7).

Діаметр кільця – 38 см, висота – 8 см, товщина стінки кільця – 1,8 см, у стопці по 16 кілець. У момент, коли відбувається коротке замикання, перевищується критичний струм у ВТНП елементі, зникає ефект екранування і раптово з'являється набагато більший повний опір контуру, внаслідок цього зменшується струм короткого замикання. Збільшення нагрівання ВТНП елемента при нормальному опорі призводить до зменшення струму короткого замикання [208, 221].

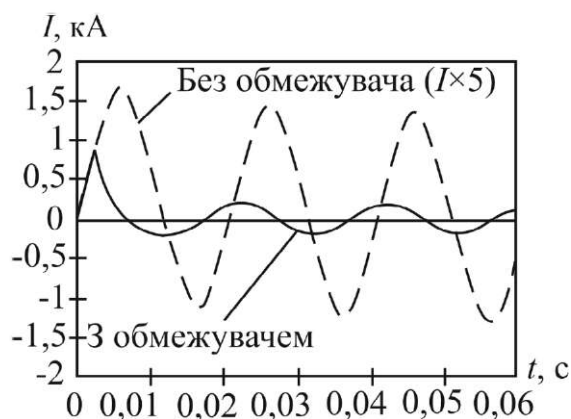


Рисунок 5.6 – Струмообмежувальна характеристика ВТНП обмежувача струму *ABB*

Пізніше була розроблена і досліджена більш компактна версія дослідного зразка потужністю 1,6 МВА. Це однофазний пристрій із номінальною силою струму 200 А, який тестувався при діючій напрузі 8,3 кВ. Реактор обмежував потенційний струм короткого замикання з діючим значенням від 13,2 до 4,3 кА на першому піку і 1,4 кА після 20 мс. Було проведено більше 20 тестів для перевірки здатності такого реактора обмежувати як симетричні, так і несиметричні струми короткого замикання. Не було зафіксовано ніякого погіршення в роботі ВТНП елементів, а об'єм пристрою вдалося зменшити з 2,0 до 0,5 м³.

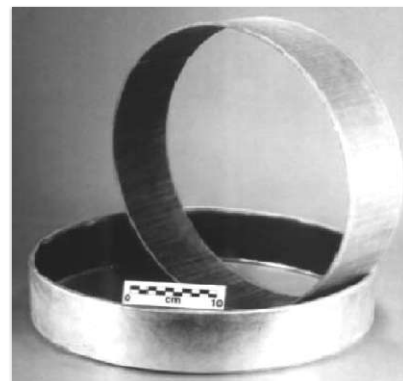


Рисунок 5.7 – ВТНП кільця Vi-2212, фірма ABB

Найбільша всебічно охоплююча програма щодо ВТНП обмежувачів струму в Європі проводилася у співробітництві між компаніями *Electricite de France*, *GEC Alsthom*, *Alcatel Alsthom*. Головна мета програми полягала в забезпеченні такими обмежувачами струму мереж електропередачі Франції напругою 225 кВ. Дослідницька група вибрала резистивну концепцію обмежувача струму. Проведені випробування продемонстрували ефективну роботу апарата при діючому значенні напруги мережі 40 кВ [3].

НПОС у вигляді надпровідного трансформатора послідовного включення експериментально і теоретично досліджений у Об'єднаному інституті високих температур Російської академії наук. Крізь мідну первинну обмотку трансформатора протікає струм, що обмежується, а вторинна обмотка короткозамкнена і складається із ВТНП кілець (YBaCuO). У номінальному режимі роботи імпеданс НПОС є імпедансом короткозамкненого трансформатора і має невелике значення (лінійні ВАХ на рис. 5.8). При виникненні аварійного режиму струм у первинній обмотці зростає, що викликає зростання струму у вторинній обмотці, і відбувається перехід ВТНП кілець у нормальний стан. При цьому імпеданс НПОС приймає значення імпедансу трансформатора в режимі холостого ходу, за рахунок чого й відбувається обмеження струму короткого замикання у захищеному колі (нижні ВАХ на рис. 5.8).

На рис. 5.8 показаний також вплив кількості ВТНП кілець на вольтамперну характеристику НПОС. Можна побачити, що зміна імпедансу НПОС, що має одне ВТНП кільце, приблизно втричі менша порівняно з НПОС, що має два ВТНП кільця.

Необхідно додати, що розміри ВТНП кілець підібрані так, що кількість надпровідного матеріалу в обох випадках однакова [222].

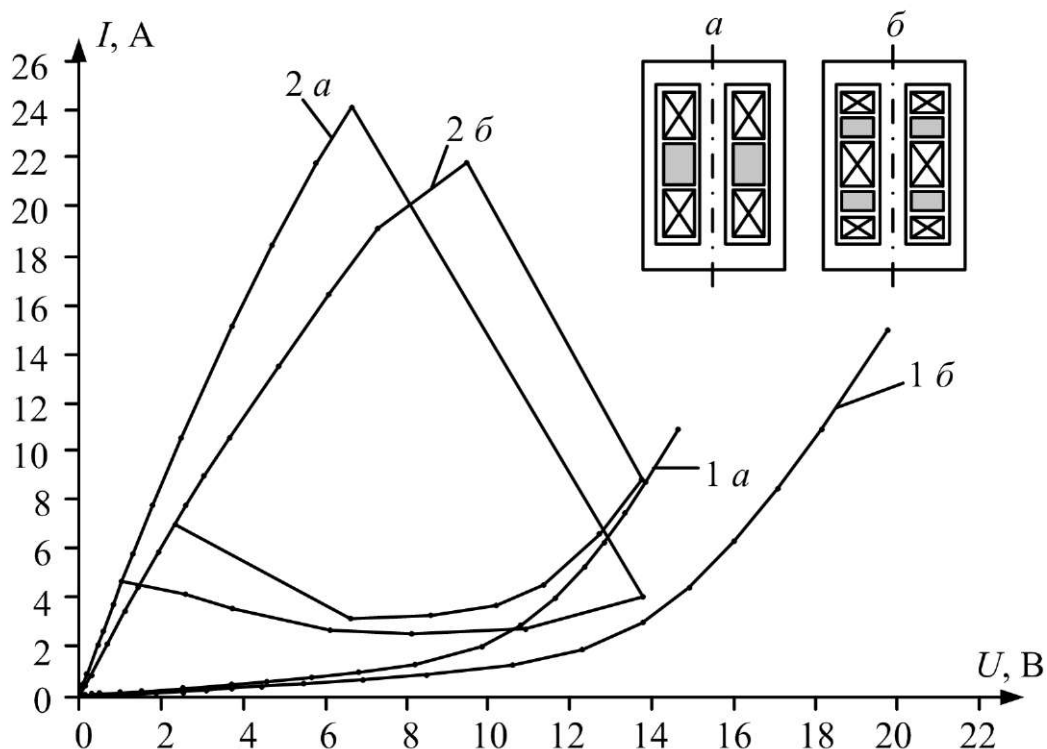


Рисунок 5.8 – Вольт-амперна характеристика НПОС при різному числі надпровідних кілець: обмотка – кільце – обмотка (одна група) (а); обмотка – кільце – обмотка, обмотка – кільце – обмотка (дві групи) (б)

У Японії також був розроблений струмообмежувальний пристрій, що використовує конструкцію трансформатора (див. рис. 4.8). Його випробування пройшли в 2006 р. в університеті м. Нагая [200, 201].

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

5.2.2. Електромагнітний надпровідний обмежувач струму

У США у 1986 р. компанією *Westinghouse Electric* та Головним Центром Досліджень і Розвитку з метою розроблення та виробництва потужного електроустаткування та силової електроніки з використанням надпровідності була заснована фірма *Power Superconductor Applications* (Пітсбург, США). Маючи угоду з Лос-Аламоською національною лабораторією на сумісне розроблення тонкоплівкового надпровідного проводу (YBCO) для обмежувача струму змінного струму на 15–38 кВ, *Power Superconductor Applications* випустила цілу серію таких струмообмежувальних реакторів з ВТНП обмотками (патенти США [223, 224]).

Ці НПОС успішно випробувані в діючих енергосистемах і одержали назву „*Cryo-Pinch*” (рис. 5.9). Їх можна віднести до індуктивного типу тому, що обмеження струму КЗ здійснюється за рахунок зміни індуктивного опору. При цьому треба відзначити, що це відбувається не за рахунок втрати надпровід-

ності відповідними елементами, як у трансформаторному або „екрановано феромагнітному” типі, а в результаті зміни геометрії магнітопроводу, що розглядається нижче.

НПОС „*Cryo-Pinch*” розраховані на роботу при частоті 60 Гц, а їхні різні модифікації випускаються на напруги від 480 В до 38 кВ, на номінальні струми від 200 до 1200 А і аварійні струми від 5 до 42 кА (табл. 5.2, 5.3) [225].

НПОС „*Cryo-Pinch*” являють собою індуктивні елементи, включені в енергетичну систему, причому індуктивність може регулюватися протягом певного заданого часу, наприклад, чверті періоду коливань струму в мережі. Для різних енергетичних систем *Power Superconductor Applications* пропонує реактори з різною початковою індуктивністю від 10 до 50 мГн. Вони дозволяють здійснювати дистанційне управління енергетичною системою для обмеження аварійних струмів. Програмований час реакції на аварійні зміни в електромережі становить близько 4 мс (рис. 5.10). Ці ж НПОС можуть бути використані і в суднових енергетичних системах.



Рисунок 5.9 – ВТНПОС „*Cryo-Pinch*” (4160 В), виготовлений за патентом США 5642249

Таблиця 5.2 – Основні характеристики реакторів „*Cryo-Pinch*”

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

Оцінки показують, що такі НПОС у значній мірі усувають необхідність мати в енергетичних системах різні електромагнітні пристрої для розриву електричного кола (наприклад, масляні вимикачі на великі струми), а також цілком здатні замінити струмообмежувальні реактори традиційного виконання і, крім того, дозволяють відмовитися від використання елементів, що руйнуються при протіканні крізь них аварійного струму (силові плавкі вставки, піротехнічні за-

хисні пристрої). Вони дозволяють здійснювати дистанційне керування енергетичною системою для обмеження аварійних струмів.

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики надпровідного струмообмежувального реактора „Cryo-Pinch”, модель IX-4

Параметр	Значення
Робоча напруга, В	480, 3 фази
Частота, Гц	60
Номінальна потужність навантаження, МВА	4,2
Аварійний струм, А	5000
Межі зміни індуктивності, мГн	Від 100 до 6,0
Джоулів інтеграл $I^2 T$, $A^2 \cdot s$	2075000
Час спрацьовування, мс	4,2
Кожух апарата	Герметичний, екранований
Ізоляція, кВ	50, клас Н,
Зовнішній діаметр / довжина, дюйми (мм)	25 (635) / 42 (1067)
Маса обмотки, кг	93
Тип надпровідника	BSCCO-2223
Робоча температура, К	20
Магнітне поле в отворі обмотки, Т	1,5
Зовнішнє поле на відстані 1 м від апарата, мТ	5
Повний час відновлення, мс	10
Виготовлювач компресора	<i>Cryomech Inc</i>
Тип рефрижератора	Двокаскадний, Гіффорда–Макмагона
Маса, кг	168
Холодильна потужність, Вт	15 (при 20К)
Споживана потужність, кВт	5 (60 Гц)
Повна маса системи з рефрижератором, кг	227

При використанні реакторів „Cryo-Pinch” замість масляного вимикача підстанції на струм 63 кА можна використати апарат на 42 кА, а замість переривника на 2500 МВА – включити послідовно з реактором апарат тільки на 1000 МВА. Крім того, застосування реакторів „Cryo-Pinch” дозволить збільшити кількість нових споживачів енергосистеми без включення додаткових комутуючих пристроїв і трансформаторів.

Кріогенне забезпечення реакторів „Cryo-Pinch” здійснюється двокаскадними рефрижераторами Гіффорда–Макмагона, які підтримують температуру ВТНП обмотки у кріостаті на рівні 20 К.

На рис. 5.11 показаний радіально-поздовжній переріз обмежувача струму короткого замикання. Його конструкція містить чотири магнітопроводи П-подібного типу 1, 2, 3, 4, які утворюють протилежні пари (1, 2 і 3, 4). Між ними на осі 13 розташований ротор у формі диска 12. Пари магнітопроводів 1, 2

і 3, 4 розташовані по обидва боки осі обертання ротора. Кожний магнітопровід складається з двох стрижнів, на які намотані мережні нормально-провідні обмотки 5, 6, і ярма з надпровідною котушкою підмагнічування 7–10.

Первинні обмотки 5, 6 підключаються по шині змінного струму в електричну мережу, де очікується КЗ. Обмотки можуть з'єднуватися як послідовно, так і паралельно, залежно від бажаної величини індуктивності у нормальному режимі та електромагнітної сили при КЗ.

Ротор 12 виготовляється з електропровідного матеріалу, наприклад, з міді чи алюмінію і має феромагнітні вставки 11, що дозволяє змінювати реактивний опір мережних котушок. Ротор установлюється на валу, який передає обертаючий момент опорній перекладині чи торсіонній пружині, які, у свою чергу, обмежують його рух до 360° або до кратної кількості обертів.

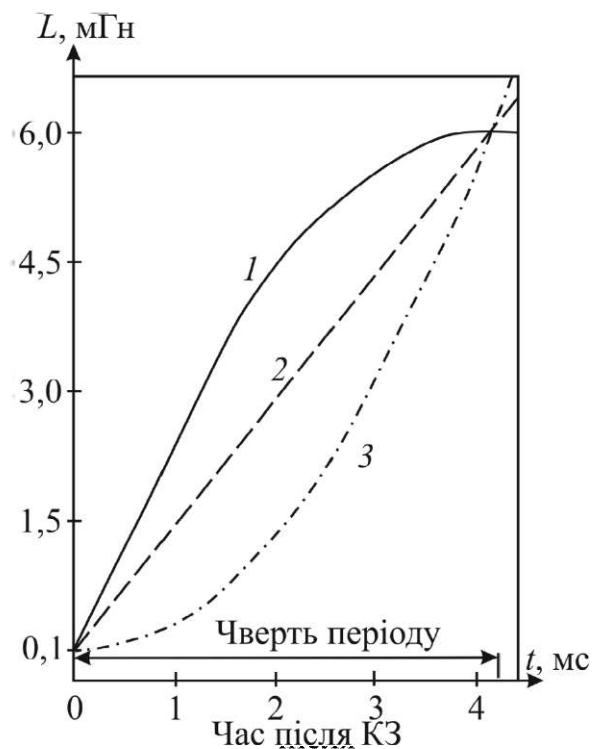


Рисунок 5.10 – Зміна індуктивності НПОС після виникнення КЗ:

- 1 – кvasисинусоїдна;
- 2 – лінійна;
- 3 – кvasіекспонентна

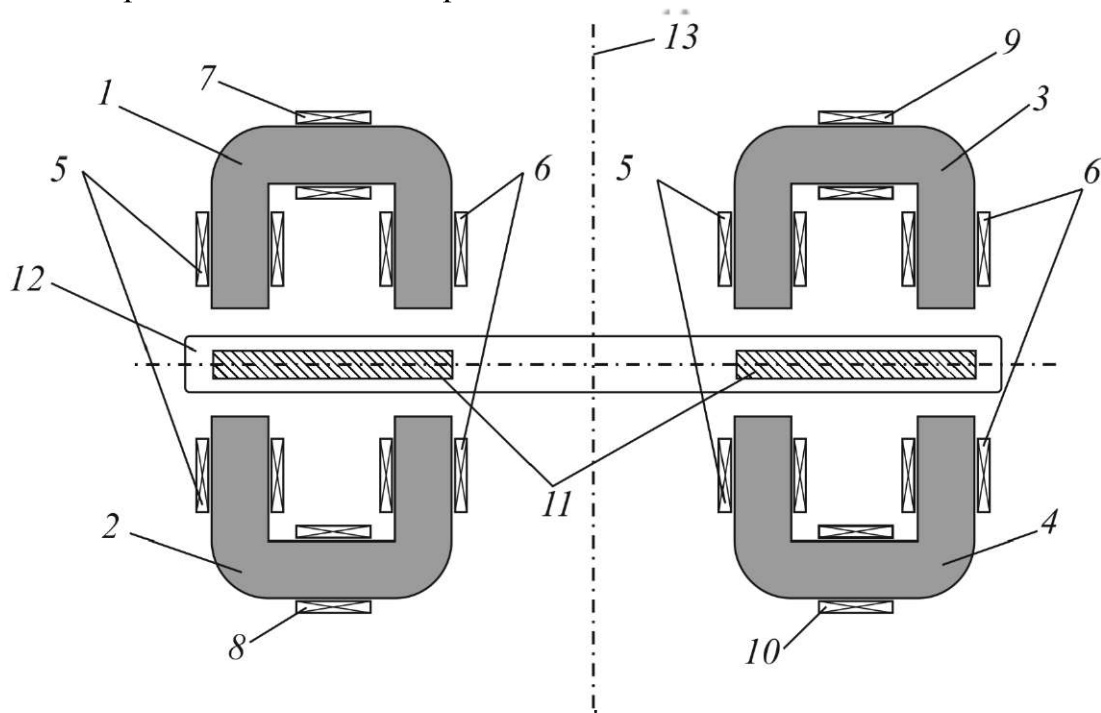


Рисунок 5.11 – Схематичне зображення перерізу конструкції ВТНП обмежувача струму за патентом США 5642249 [223]

Магніторушійна сила від надпровідних котушок підмагнічування компенсується магніторушійною силою від мережних котушок на відповідному осерді, тому обертова сила на роторі відсутня, що відповідає нормальному режиму роботи електричної мережі.

При протіканні струму КЗ у мережних котушках 5, 6 їх магніторушійна сила перевищує магніторушійну силу надпровідних котушок підмагнічування і ротор-диск унаслідок спеціальної конструкції та результуючої дії електродинамічних сил зміщується. При здійсненні руху ротор займає таке положення, що феромагнітні вставки заповнюють зазор між стрижнями відповідних магнітопроводів і на порядок збільшують індуктивність котушок 5, 6, увімкнених у електромережу, завдяки чому відбувається обмеження струму КЗ.

Треба зауважити, що ротор-диск здійснює обертальний рух тільки в одному напрямку незалежно від фази змінного струму. Крім цього, прилад має спеціальний фіксуючий механізм для утримання диска у положенні, яке забезпечує максимальний магнітний опір (мінімальний індуктивний) до утворення КЗ.

Даний пристрій забезпечує швидку послідовну зміну індуктивного опору через переміщення ротора-диска у таке положення, коли зникає ділянка з високим магнітним опором і магнітопроводи замикаються [223].

5.2.3. НПОС з насиченим магнітопроводом

Типова конструктивна схема ВТНПОС з насиченим магнітопроводом показана на рис. 5.12, як в однофазному, так і у трифазному виконанні. Розглянемо його принцип дії на прикладі однофазного обмежувача струму (рис. 5.13, а). Він складається з двох магнітопроводів з розміщеними на них мідними котушками традиційного виконання, що вмикаються в електричну мережу змінного струму, який треба обмежити під час КЗ. Обидва 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 по черзі виходять з насиченого стану кожного півперіоду, що призводить до зростання індуктивного опору і обмеження струму протягом цілого періоду. Обмеження струму не супроводжується переходом з надпровідного стану в нормальний, тому НП котушка залишається надпровідною у всіх режимах роботи.

Очевидними перевагами струмообмежувачів з насиченим магнітопроводом є такі: можливість реалізації пристрою на основі ВТНП проводів 1-го покоління у срібній матриці, відсутність ВТНП елементів у високовольтній час-

тині, відсутність з'єднань із ВТНП елементами і простота конструкції. Слід зазначити також, що для трифазного струмообмежувача досить усього однієї загальної для усіх фаз ВТНП котушки (рис. 5.12, б).

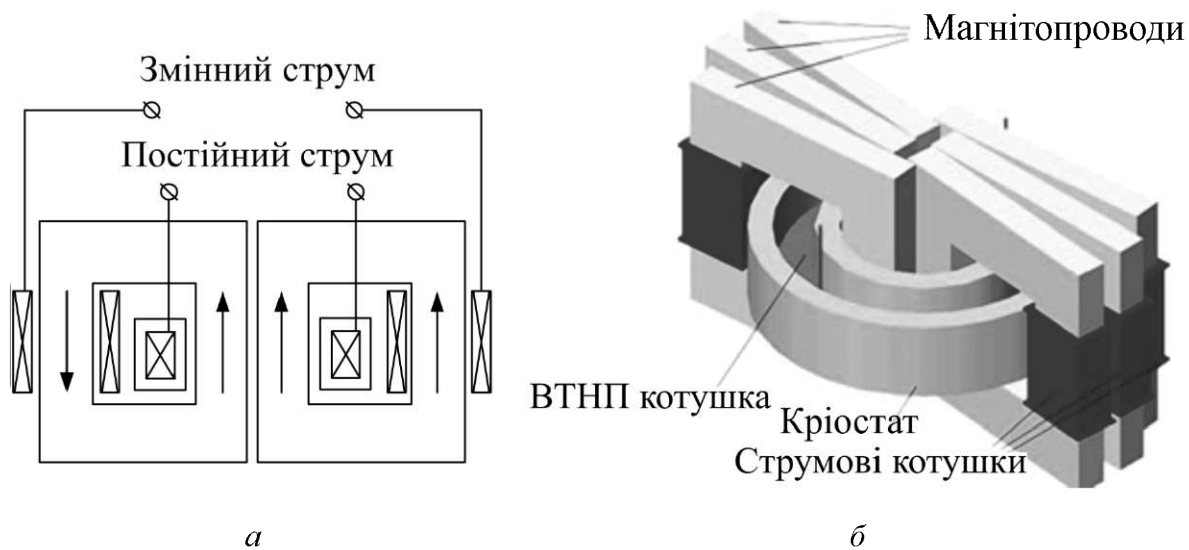


Рисунок 5.12 – Схема струмообмежувача з насиченим магнітопроводом:
а – однофазний обмежувач; *б* – трифазний обмежувач

Конструкція з насиченим осердям забезпечує наступні необхідні вимоги до обмежувачів струму КЗ:

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

Але, незважаючи на ці переваги, НПОС із насиченим осердям не досяг промислового рівня. Головні причини цього полягають у надмірних габаритах і вазі пристрою, впливу потокозчеплення між мережними котушками і надпровідними котушками підмагнічування постійного струму.

З розвитком ВТНП плівок та покращенням їх характеристик інтерес до НПОС із насиченим осердям знову зріс. Були розроблені невеликі моделі однофазного і трифазного НПОС короткого замикання, які використовували по одному магнітопроводу для кожного півперіоду фази. В моделі трифазного НПОС використовувалася одна НП котушка підмагнічування, яка охоплювала 6 магнітопроводів: по двох для кожної фази. Знову виникла проблема високої змінної напруги на котушці підмагнічування, тому що в якості джерела електроживлення для котушки підмагнічування використовували батареї.

Розробленням і дослідженням надпровідного обмежувача струму з насиченим магнітопроводом займаються *University of Wollongong* (Австралія), *Bar-Ilan University* (Ізраїль) та РНЦ „Курчатовський інститут” (Росія). Розробленнями в цій галузі зайнялися також такі компанії, як *SC Power Systems, Inc* (США, Сан Матео, Каліфорнія) і *InnoST* (Китай). *SC Power* успішно протестував прототип струмообмежувача з насиченим магнітопроводом на напругу 15 кВ і займається розробленням наступного апарата для мереж 138 кВ.

За спільної роботи співробітників *Univ. Wollongong* і компанії *Australian Superconductors* (Австралія) побудований і випробуваний ВТНП струмообмежувальний реактор потужністю 1 МВА із магнітопроводом, що насичується, та з обмотками підмагнічування постійного струму, виготовленими із ВТНП провідника на основі Bi-2223/Ag . Цей пристрій реагує як на позитивну, так і на негативну напівхвилю струму КЗ, має практично миттєву реакцію на КЗ і короткий час відновлення. Він здатний витримувати тривалий аварійний струм 1200 А і знижувати амплітуду струму КЗ у перехідному режимі з 2200 до 100 А. При випробуваннях робота пристрою не супроводжувалася появою скільки-небудь значних складових гармонік, і 99,96 % усього спектра потужності припадало на основну гармоніку. Індуктивність пристрою в нормальному режимі роботи, тобто, під час відсутності КЗ, була менше 0,01 мГн, робочий струм в обмотках – 40 А. ВТНП обмотки не зв’язані електрично із колом, що захищається, тому їхній перехід у нормальний стан виключається. Система працює при температурі рідкого азоту [226].

У Росії роботи над струмообмежувачем з насиченим магнітопроводом велися з 1997 по 2004 рр. у РНЦ „Курчатовський інститут”. Був виготовлений і випробуваний ряд невеликих макетних зразків (рис. 5.13), окремі схемні рішення були захищені патентами [227, 228]. Методика розрахунку параметрів струмообмежувачів з насиченим магнітопроводом була детально розроблена в Московському Енергетичному Інституті і Всесоюзному науково-дослідному інституті електроенергетики.

Основна перевага цієї конструкції полягає в тому, що обмотка завжди залишається надпровідною, що дає високу швидкодію і готовність до наступного миттєвого спрацьовування. Недоліком струмообмежувача, розробленого у „Курчатовському інституті”, є великі габарити.

Експериментальний макет трифазного НПОС з насиченим магнітопроводом (див. рис. 5.13, б) складається з шістьох магнітопроводів з закріпленими на них мережними котушками, ВТНП котушки підмагнічування і азотного резервуара. Магнітопроводи макета НПОС розміщені зіркоподібно. Мережні котуш-

ки складаються із двох секцій по 55 витків у кожній, які можна комутувати як послідовно, так і паралельно. Котушка підмагнічування розміщується в кільцевому азотному кріостаті, що охоплює всі магнітопроводи, вона складається із чотирьох секцій по 250 витків у кожній. Для виготовлення ВТНП котушки використано Ві-2223 провідник у срібній матриці виробництва ВНДІМ ім. акад. А.А. Бочвара. Всі секції котушки з'єднані послідовно, від центральних секцій зроблені відводи, що дозволяє включати не всю ВТНП котушку, а тільки її частину. Для того щоб розмістити всі виводи кінців ВТНП котушки, на її зовнішній поверхні застосовувалася технологія галетно-шарового намотування. Внутрішній і зовнішній діаметри ВТНП котушки становлять 220 і 280 мм, а висота 100 мм. Струм теплової рівноваги ВТНП котушки дорівнює 11 А.

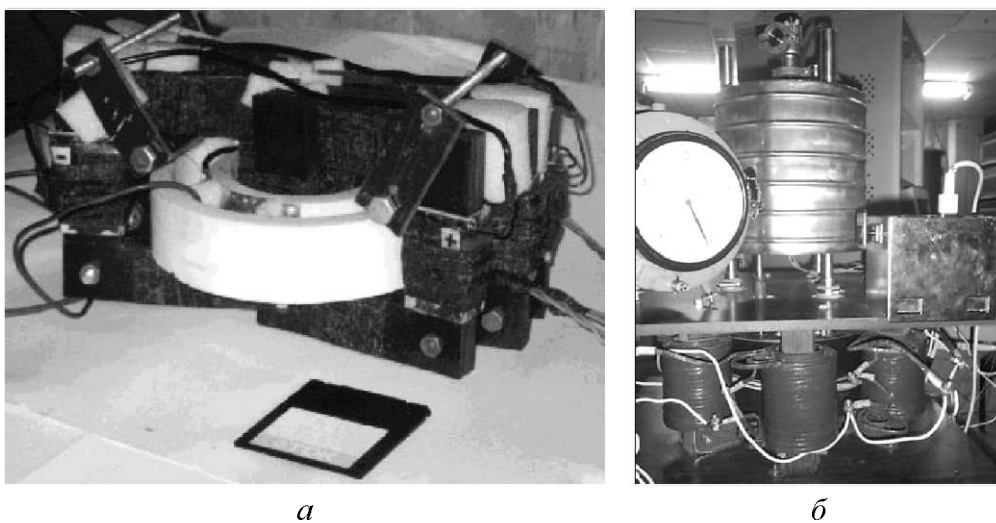


Рисунок 5.13 – Обмежувач струму з насиченим магнітопроводом, розроблений Курчатівським інститутом:
а – дослідна модель струмообмежувача; *б* – макет ВТНПОС

У макеті НПОС застосовано нержавіючий кріостат для ВТНП котушки підмагнічування, що істотно спрощує і здешевлює конструкцію НПОС у порівнянні, наприклад, з НПОС, який використовує діелектричний кріостат. Однак, металевий кріостат є короткозамкненим витком, отже, у ньому можуть наводитися струми. Але теоретично-експериментальний аналіз виявив, що струми у кріостаті наводяться тільки під час КЗ, їхній вплив на роботу НПОС і розігрівання кріостата незначні [229].

Резервуар для зберігання рідкого азоту розміщений над кільцевим кріостатом і з'єднується з ним через три горловини. Кріостат котушки підмагнічування діелектрично ізолюваний від магнітопроводів та інших деталей конструкції НПОС.

Дослідний макетний зразок НПОС відзначався стабільністю роботи ВТНП котушки, але разом з цим мав невисоку швидкодію та рівень обмеження

струму менший за передбачуваний. Ці недоліки вимагали відпрацювання геометрії магнітної системи та електромагнітного зв'язку мережних котушок з котушкою підмагнічування. Тому макет НПОС був дороблений – була введена компенсація магнітного потоку обмотки підмагнічування.

Після КЗ опір НПОС відразу збільшується у 1,5 рази з подальшим збільшенням у 6 разів. Повний опір фази НПОС у сталому режимі роботи зростає у 12–14 разів у порівнянні із номінальним режимом.

Головною перевагою даної схеми є те, що вона працює повністю автоматично і не має потреби ні в якому зовнішньому керуванні.

Після проведення аналізу ефективності використання НПОС у мережах напругою 6–10 кВ, технічних вимог до нього і результатів випробувань макета НПОС було розроблено дослідно-промисловий зразок НПОС на потужність 1 МВА, один з варіантів його конструкції зображений на рис. 5.13, а.

У табл. 5.4 наведені деякі параметри дослідно-промислової моделі струмообмежувача, що відповідають розробленим технічним вимогам до нього.

Таблиця 5.4 – Параметри НПОС на потужність 1 МВА

Параметр	Значення
Робоча напруга, кВ	10
Номінальний струм, А	120
Струм реагування, А	240
Струм КЗ (усталене значення), А	600
Амплітудне значення струму електродинамічної стійкості, А	2500
Час існування КЗ, с	2
Повний опір НПОС у номінальному режимі роботи, Ом	0,7
Час відновлення реактивного опору після відключення КЗ, с	не більше 0,1
Інтеграл Джоуля, кА ² ·с	1,0

Конструкція дослідно-промислового зразка НПОС аналогічна описаному вище макетному зразку. Дослідно-промисловий зразок НПОС складається із трьох основних вузлів: шести магнітопроводів із закріпленими на них мережними обмотками, кріостата із ВТНП котушкою підмагнічування і системи криогенного забезпечення.

Котушка підмагнічування розміщується в кільцевому азотному кріостаті, що охоплює всі шість магнітопроводів. З метою захисту від перенапруг, які можуть виникнути при несправності джерела струму підмагнічування, ВТНП котушка підмагнічування замкнена на розрядні резистори, які розміщені у кріостаті поруч із котушками.

Магнітопроводи разом із встановленими на них обмотками розміщені на спільній рамі, що дозволяє легко здійснювати транспортування і установлення

дослідного зразка НПОС на місці експлуатації. Кріостат із ВТНП котушкою підмагнічування ізольований відносно рами, магнітопроводів та інших деталей конструкції НПОС. На рамі також розміщені клемні колодки мережних обмоток НПОС. Мережні обмотки виконані у вигляді двох секцій, охоплюючих обидва стрижні магнітопроводів, що дозволяє знизити їхню власну індуктивність і сприяє більш рівномірному намагнічуванню магнітопроводів.

Резервуар для зберігання рідкого азоту може бути розміщений як на рамі НПОС, так і у будь-якому іншому місці, зручному для встановлення (за умови знаходження резервуара з рідким азотом вище кріостата котушки підмагнічування). Кріостат котушки підмагнічування з'єднується з азотним резервуаром гнучким кріогенним трубопроводом, що служить для подачі рідкого азоту у кріостат котушки підмагнічування.

До складу „Курчатовського” НПОС входять також джерело живлення котушки підмагнічування, набір діагностичних датчиків для вимірювання рівня рідкого азоту, контролю вакууму у кріостаті і азотному резервуарі, контролю стану ВТНП котушки підмагнічування [229, 230].

Якщо всебічно аналізувати струмообмежувачі з насиченим магнітопроводом, можна виявити деякі загальні недоліки цієї концепції. Струмообмежувачі з насиченим магнітопроводом надзвичайно масивні – маса такого пристрою у 1,5–2 рази перевищує масу трансформатора аналогічної потужності і класу напруги. Крім того, ВТНП котушка є еквівалентом замкненого витка у трансформаторі і під час короткого замикання в ній наводяться додаткові струми, через що ударний струм обмежується слабо. Щоб досягти достатнього обмеження ударного струму, стала часу кола підмагнічування повинна становити 5 мс або менше, що накладає обмеження на максимальну індуктивність ВТНП котушки підмагнічування і міцність її електричної ізоляції. Струмообмежувач із насиченим магнітопроводом – це нелінійний пристрій, який може погіршити якість напруги в мережі навіть у номінальному режимі роботи.

Струмообмежувачі *SC Power*, *InnoST* і РНЦ „Курчатовський інститут” виконані за однією і тією ж схемою (рис. 5.14), і описані вище недоліки є у кожному з цих пристроїв [231].

Компанія *SC Power*, яка є відділенням промислової групи *Zenergy Power*, провідного фахівця з виготовлення, розроблення та промислового застосування ВТНП матеріалів, у 2007 р. за підтримки Міністерства енергетики США розпочала розроблення НПОС з насиченим магнітопроводом (рис. 5.15). Наукова робота містить проектування, проведення експериментальних досліджень і встановлення НПОС у Каліфорнійській енергомережі.

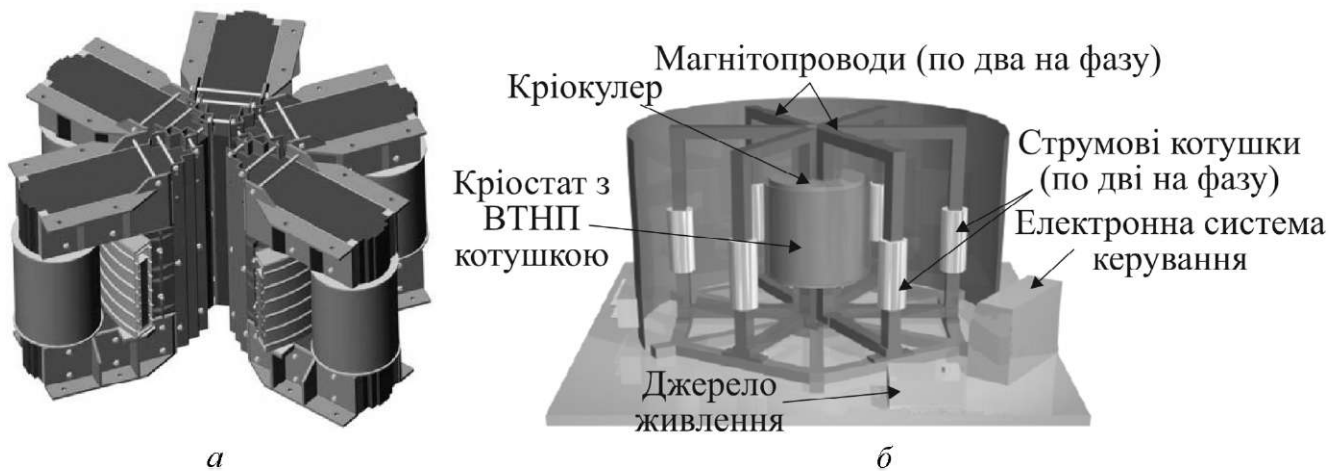


Рисунок 5.14 – Вид тріфазного обмежувача струму із насиченим магнітопроводом:
 а – струмообмежувач „Курчатівського інституту”;
 б – ВТНПОС SC Power (12 кВ; 1,2 кА)

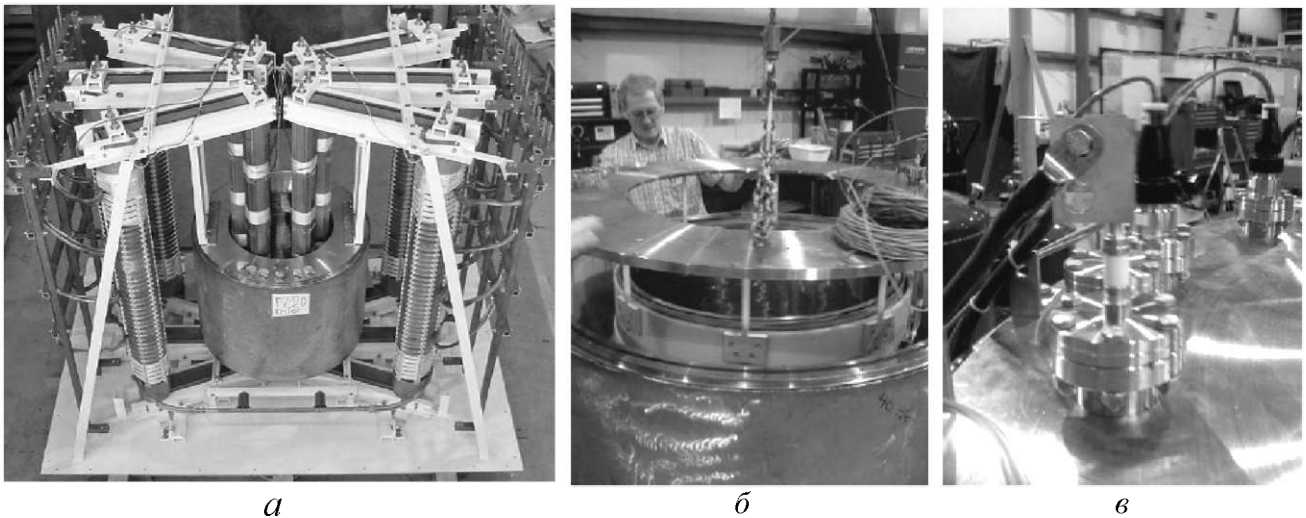


Рисунок 5.15 – Прототип НПОС виробництва SC Power (13 кВ / 10 кА):
 а – зовнішній вигляд; б – кріостат з ВТНП котушкою; в – установлені кріокулери

У проекті також брали участь Лос-Аламоська національна Лабораторія, *Delta Star inc.*, *Southern California Edison (SCE)* та *Consolidated Edison Company of New York, inc. (Con Edison)*. Параметри ВТНП котушки підмагнічування постійного струму наведені у табл. 5.5.

Продовження проекту передбачає розроблення НПОС для встановлення у високовольтні лінії електропередачі класу напруги 138 кВ.

Вагомих результатів з розроблення концепції з насиченим магнітопроводом досягли у Китаї. Компанія *InnoST* розпочала у 2002 р. розроблення ВТНП обмежувача струму з підмагнічуванням. У 2004–2005 рр. були виготовлені експериментальні макети. А вже у 2006-2007 роках був виготовлений напівпромисловий прототип тріфазного обмежувача струму потужністю 90 МВА (рис. 5.16, а), параметри якого наведені в табл. 5.6 [232, 233].

Таблиця 5.5 – Параметри і характеристики ВТНП котушки *SC Power*

Параметр	Значення
Охолодження	Три кріокулери (<i>AL330 GM Cryomech</i>)
Максимальна температура, К	40
Стала температура, К	20
ВТНП	1-го покоління (плівка <i>BSSCO</i>)
Кількість витків ВТНП котушки	1600
Номінальний струм ВТНП котушки, А	200
Критичний струм ВТНП котушки (при 30/35 К), А	330 / 260
Сталі втрати ВТНП котушки (при постійному струмі $I_c = 200$ А, $T < 25$ К), Вт	21



а



б

Рисунок 5.16 – Трифазний ВТНПОС з насиченим магнітопроводом *Innpower* (а) і ВТНП котушка обмежувача струму (б)

Таблиця 5.6 – Параметри ВТНПОС виробництва *Innpower*

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	35
Номінальний 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

Конструкція, аналогічна вже розглянутим, має шість магнітопроводів, розмішених під кутом 60° один до одного, і спільну ВТНП котушку підмагнічування (рис. 5.16, б), параметри якої наведені в табл. 5.7. Магнітопроводи з'єднуються всередині концентричної конструкції в один стрижень, що зменшує габарити, а також необхідний діаметр ВТНП котушки підмагнічування. Крім цього, магнітний потік,

створений мережними котушками трьох фаз змінного струму у центральному стрижні, буде близьким до нуля, що зменшує індуктивність котушки підмагнічування.

Таблиця 5.7 – Параметри і характеристики ВТНП котушки підмагнічування виробництва *Innower*

Параметр	Значення
Номинальний струм ВТНП котушки, А	300
Довжина проводу, км	17,6
Діаметр котушки внутрішній / зовнішній, мм	1280 / 1340
Висота котушки, мм	880
Кількість витків	470
Опір котушки (при 77 К), мОм	1,71
Опір котушки (при 300 К), Ом	8,018

Запропонована *Bar-Ilan University* і компанією *Ricor* (Ізраїль) схема струмообмежувача з насиченим магнітопроводом відмінна від описаної вище. Струмообмежувач *Ricor* складається з одного магнітопроводу, що охоплює кільцевий кріостат із ВТНП котушкою підмагнічування, виконаної з BSCCO плівок виробництва *AMSC* (рис. 5.17). Намотування котушок виконане за спеціальною технологією, запатентованою *RICOR*. 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* буде більш ніж удвічі меншою порівняно з масою струмообмежувачів *SC Power* і *InnoST* (Китай) тієї ж потужності, однак, при цьому витрата ВТНП матеріалів також збільшиться в декілька разів.

Для підтвердження нової концепції НПОС був розроблений і виготовлений невеликий прототип потужністю 4,2 кВА (400 В, 10,5 А) (рис. 5.18, а). У цій моделі застосували леговану сталь Н105 з високою індукцією насичення (~ 2 Тл) і високою магнітною проникністю. Для проведення лабораторних досліджень не-

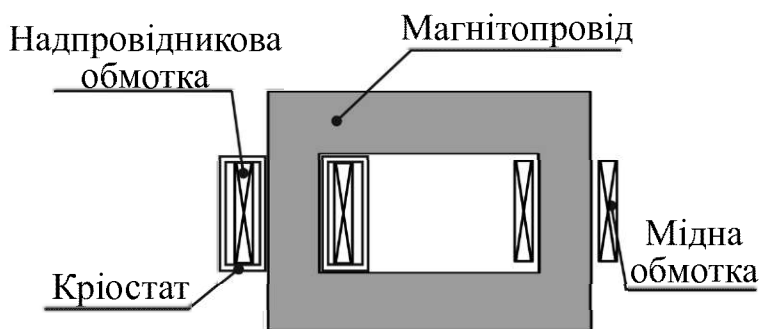


Рисунок 5.17 – Схема НПОС з насиченим магнітопроводом виробництва *Ricor*

обов'язковим було використання надпровідних котушок, тому були використані мідні котушки (270 витків) постійного струму для підмагнічування і котушка змінного струму, що вмикалась у електромережу. Для обох котушок використовувались мідні проводи з перерізом $4 \times 1 \text{ мм}^2$ для короточасних експериментів з постійним струмом до 60 А. П-подібний магнітопровід був виготовлений з легованої сталі марки Н105 з перерізом $40 \times 40 \text{ мм}^2$.

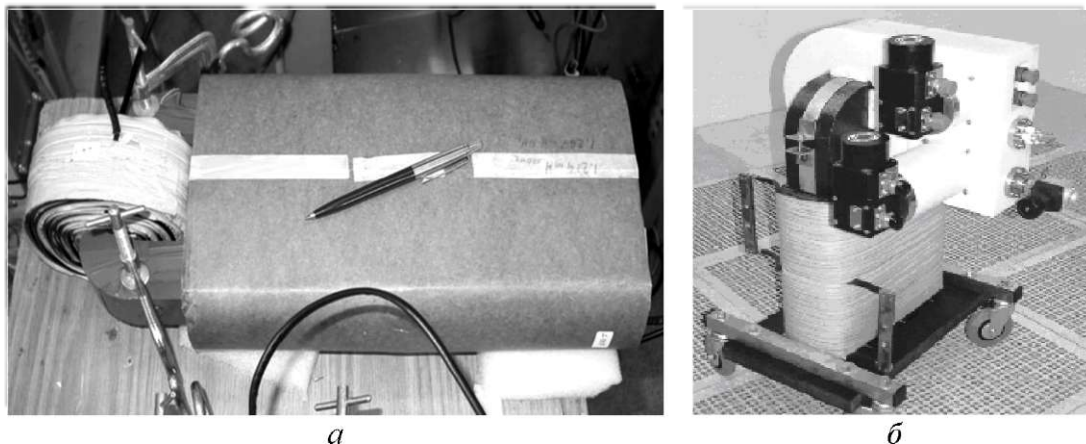


Рисунок 5.18 – НПОС виробництва *Ricor*:
 а – потужністю 4,2 кВА (котушка підмагнічування зліва);
 б – потужністю 120 кВА

Після апробації малого макета НПОС компанія *Ricor* виготовила та успішно випробувала макетний зразок струмообмежувача (рис. 5.18, б) потужністю 120 кВА (400 В, 300 А) з малими втратами – до 0,4 % у номінальному режимі. Апарат спроектований на забезпечення обмеження ударного струму 1–8 кА, з коефіцієнтом 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 %.

Принципова схема НПОС потужністю 120 кВА така ж, як і у моделі потужністю 4,2 кВА. Магнітопровід є такої ж конфігурації і виконаний з такого ж матеріалу, але з перерізом $120 \times 120 \text{ мм}$. 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 $5 \times 25 \text{ мм}^2$ 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 виробництва *AMSC*, з мінімальним критичним струмом 115 А [234]. Габарити приладу склали $70 \times 70 \times 130 \text{ см}$ включно з крио-системою, а вага – 250 кг.

Система охолодження *Ricor* включає два криогенних компресори потужністю 3 кВт, які керують двома криоголовками 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.

5.3. Резистивний надпровідний обмежувач струму

5.3.1. Надпровідний обмежувач струму резисторного типу

Створення ВТНПОС резисторного типу пов'язане з рішенням цілої низки інженерних і технологічних завдань: необхідно досягти синхронного переходу надпровідних елементів ВТНПОС у нормальний стан за час, менший 5 мс і рівномірного нагрівання надпровідного елемента, а 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. На сьогоднішній день способи розв'язання вказаних вище проблем знаходяться на такому рівні, що можлива не тільки демонстрація дослідних зразків, а і 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 розроблення обмежувача на напругу 500 кВ із номінальним струмом 8 кА.

Як показано на рис. 5.19, *а*, НПОС складається з чотирьох надпровідних котушок (діаметром 420 мм і довжиною 640 мм) на кожен фазу, включених послідовно-паралельно так, щоб повна індуктивність була мінімальною.

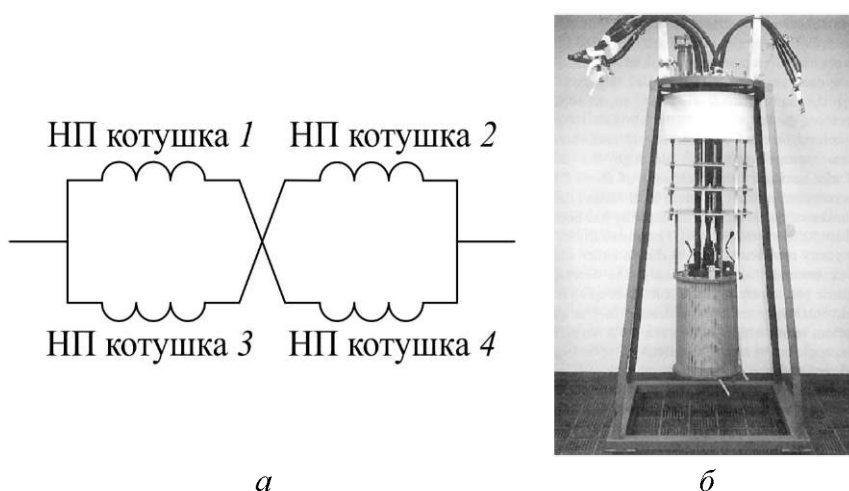


Рисунок 5.19 – Конфігурація котушок НПОС розробки *TEPCO/Toshiba* (*а*) та зовнішній вигляд НПОС *Toshiba* (6,6 кВ, 2 кА) (*б*)

Початкові розроблення були зосереджені на проміжній моделі на 6,6 кВ, у якій використовувались низькотемпературні надпровідні матеріали. На рис. 5.19, б подана модель НПОС, у якій використовуються спеціальні Nb-Ti елементи з низькими втратами на змінному струмі. Потім у конструкцію прототипу були впроваджені високотемпературні надпровідні струмовводи, що забезпечило зменшення рівня навантаження системи охолодження.

Рефрижераторами Гіффорда–Макмагона підтримувалась температура 4 К. Теплові втрати були зменшені з 13,8 до 3,4 Вт, що наблизило їх до прийнятного рівня.

Проведені в мережі випробування довели успішну працездатність апарата і обмеження очікуваного струму короткого замикання з 25,8 до 4 кА (рис. 5.20).

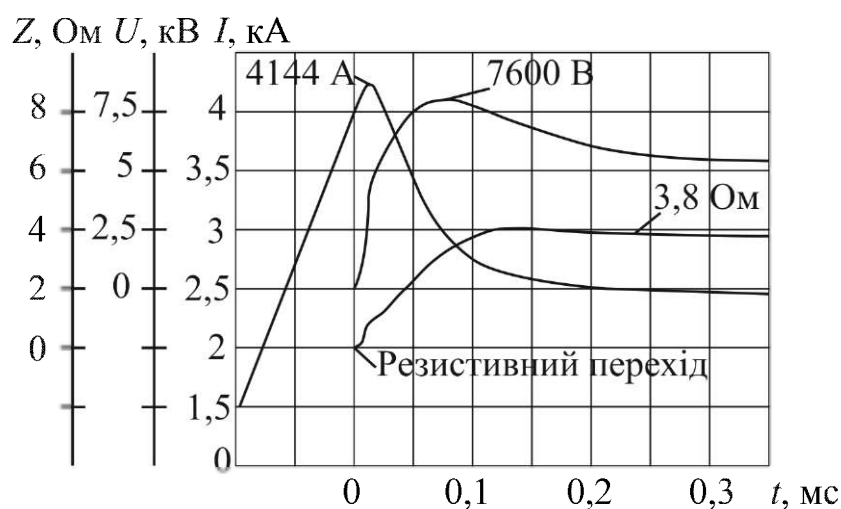


Рисунок 5.20 – Струмообмежувальні характеристики НПОС (Toshiba)

Розвиток японського прототипу обмежувача струму (TEPCO/Toshiba) полягає в розробленні трифазної моделі, з випробуваннями в реальних умовах. Для того щоб виключити гелій із системи охолодження, а також для відповідності вимогам робочого діапазону напруг у мережі необхідне застосування ВТНП котушок замість НТНП [3].

Удосконалення такого прототипу резисторного типу обмежувача струму було здійснено. У 2008 р. Toshiba і Fujikura у співробітництві з Міжнародним центром надпровідних технологій (ISTEC) і університетом Йокогами розробили і випробували трифазний струмообмежувач резисторного типу, який використовує ВТНП котушки (рис. 5.21). Роботи проводилися за підтримки Міністерства зовнішньої торгівлі та промисловості МПТ Японії [235].

Для створення струмообмежувача були використані ВТНП провідники 2-го покоління виробництва Fujikura. Як захисне покриття до ВТНП провідників була припаяна стрічка з нікелевого сплаву. Ширина ВТНП провідника становив-

ла 5 мм, критичний струм при температурі 70 К досягав 189 А. Провідник без ушкоджень витримував короточасне (протягом 3 мс) протікання струму удвічі більшого за критичний.

Трифазний ВТНП струмообмежувач складається із трьох циліндричних безіндуктивних котушок, розміщених у кріостаті, захопленому до 70 К рідким азотом. Номінальний струм ВТНП струмообмежувача склав 72 А. Для підтримання у кріостаті робочої температури використовувався кріокулер.

Для кожної з ВТНП котушок вимірювались критичні величини, як на змінному, так і на постійному струмі. Високовольтні випробування підтвердили, що система задовольняє вимозі з діелектричної міцності ізоляції у 22 кВ (1 хв.), як між котушками і землею, так і між окремими котушками.

Після складання ВТНП елементів струмообмежувача були проведені стендові випробування, протягом яких здійснювали 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 до 840 А (обмеження 44 %) і дозволяє зробити відключення короткого замикання за 22 мс. Результати експериментальних даних були близькими до математичної моделі. Після стендових випробувань були проведені експлуатаційні випробування ВТНП струмообмежувача, у ході яких він захищав газотурбінний генератор (*Tokyo Gas Co., Ltd*). Експлуатаційні випробування довели придатність струмообмежувача до роботи в мережі [236]. Компанія *Toshiba* продовжує розроблення резисторного НПОС і струмообмежувальних елементів зі струмом до 5 кА.

Одним з найбільш успішно реалізованих проектів ВТНПОС на напругу 10 кВ є трифазний напівпромисловий ВТНПОС *CULR-10* потужністю 10 МВА, створений у Німеччині. ВТНПОС складається з 90 струмообмежувальних елементів на основі ВТНП кераміки *Vi-2212*. ВТНП елементи виконані у вигляді біфілярних котушок, які з'єднані послідовно, по 30 ВТНП елементів для кожної фази. Надпровідна біфілярна обмотка є основною частиною струмообмежувача резисторного типу [237]. Виготовлення керамічних *Vi-2212* елементів для біфілярних котушок здійснюється плавильним методом – *Melt Cast Processed*

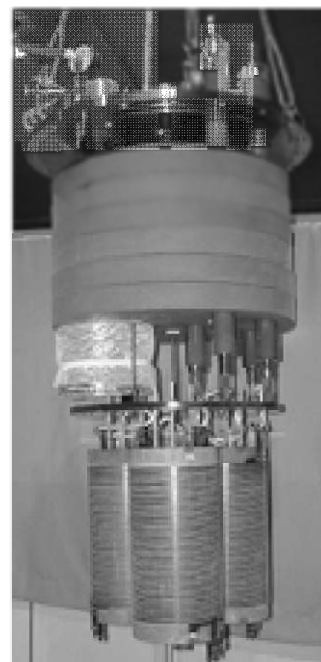


Рисунок 5.21 – ВТНП котушки струмообмежувача *Toshiba-Fujikura*

(MCP), який включає наступні операції: плавка, відцентрове лиття, термічна обробка, насичення киснем [238]. Ці обмотки захищені шунтом і високовольтною ізоляцією (рис. 5.22). Виготовленням ВТНП біфілярних котушок займалася фірма *Nexans*, параметри котушки подані в табл. 5.8 [239].

Таблиця 5.8 – Параметри біфілярної ВТНП котушки виробництва *Nexans*

Параметр	Значення
Діаметр котушки, мм	58
Висота котушки, мм	300
Довжина надпровідного 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

Трифазний ВТНП струмообмежувач *CULR-10* (рис. 5.23) пропускної потужності 10 МВА (10 кВ, 600 А) був установлений у березні 2004 р. в енергосистему *RWE Energy*. Він є найпотужнішим ВТНП струмообмежувачем, що працює в сучасній енергосистемі.

Сам трифазний струмообмежувач (*CURL-10*) має такі складові:

- кріостат з рідким азотом;
- 90 біфілярних котушок *Bi-2212*;
- шість струмовводів (2 на кожну фазу);
- прилади контролю і безпеки (клапан тиску, датчики тиску, датчик рівня азоту);
- два кріокулери;
- система подачі азоту;
- електропостачання і електронний контроль кріокулерів;
- охолоджувач рідини (чіллер) для тепловідводу.



Рисунок 5.22 – Біфілярна ВТНП котушка виробництва *Nexans*



Рисунок 5.23 – ВТНПОС *CURL-10*:

а – ВТНП обмежувач без кріостата;

б – *CURL-10* складений (випробування у 2004 р.)

Лабораторні випробування проводилися для кожної фази окремо і трифазного включення обмежувача (при температурі 66 К, тиску 206 мбар), для КЗ тривалістю 60 мс. ВТНПОС надійно обмежував струм короткого замикання з 18 до 7,2 кА на першому піку. Таким чином, випробування *CURL-10* у реальних умовах довели його високу надійність, глибоке обмеження струмів короткого замикання і необхідну швидкодію у 3–5 мс. *CURL-10* став одним з першим ВТНПОС, який можна вважати реальним прототипом майбутніх комерційних пристроїв. Однак, слід зазначити високу вартість цього ВТНПОС, зв'язану з ціною кожного з 90 ВТНП елементів.

Споживана потужність обмежувача, встановленого в діючу енергосистему, складала 1450 Вт, з яких 1100 Вт складають втрати на змінному струмі у ВТНП елементах, 350 Вт – теплоприпливи у кріостат і омичні втрати на мідних з'єднаннях [240].

Успішні експлуатаційні випробування *CURL-10* у 2004–2006 рр. показали працездатність ВТНП струмообмежувачів резисторного типу на базі масивних елементів з Ві-2212 кераміки, після чого компанія *Nexans* розпочала розроблення відразу двох високовольтних ВТНП струмообмежувачів: матричного НПОС (разом з компанією *SuperPower*, США) і *CULT-110* (Німеччина).

5.3.2. Резистивний тонкоплівковий обмежувач струму

Застосування резистивної тонкоплівкової концепції є привабливим завдяки простоті конструкторського рішення і швидкості реагування пристрою. У

порівнянні з ВТНП котушками такий струмообмежувач не потребує великої довжини НП проводу, при цьому припускає високу густину струму у плівкових елементах у надпровідному стані.

Фірма *ABB*, маючи досить вагомі результати у розробленні індуктивної схеми ВТНПОС, наведеної вище, проводить також розроблення ВТНПОС резистивного типу. Остання розробка – це прототип однофазного ВТНПОС потужністю 6,4 МВА (8 кВ, 0,8 кА) (рис. 5.24). Конструкція цього апарата відрізняється від попередніх розробок, які базуються на відомому послідовно-резистивному принципі, тим, що використовує новий тип конструкції ВТНП проводу та інноваційну технологію виготовлення Ві-2212 кераміки. Новітні підходи у виготовленні ВТНП елементів дозволили значно підвищити потужність ВТНПОС.

Ураховуючи неоднорідність ВТНП матеріалу, фірма *ABB* звернула увагу на схильність до виникнення теплових доменів у ВТНП елементах. Відповідно, для забезпечення мінімізації можливої руйнівної дії теплових доменів, у структурі ВТНП елементів передбачається наявність металевого шунтуючого шару.

Такий шар дозволяє здійснити термічну стабілізацію провідника, як завдяки відведенню тепла, так і обмеженню надмірного струму. Характеристики матеріалу для такого шунта повинні бути відповідними, щоб задовольняти вимогам роботи ВТНПОС. Аналіз показав, що найбільше для цього підходить нержавіюча сталь ($\rho = 40 \text{ мк}\cdot\text{Ом}/\text{см}$ при 100 К). Металеві пластинки електрично та механічно з'єднуються з ВТНП керамікою. Структура ВТНП елементів складається з таких компонентів: шар Ві-2212 кераміки, металевий шунтуючий шар та зміцнювальний шар пластикового волокніту, армованого скловолокном (рис. 5.25) [241].

Застосування жорсткого шунта сприяє однорідності нормально-надпровідного переходу у ВТНП елементах при КЗ. Залежно від очікуваного рівня струму КЗ обмеження здійснюється до 10-кратного номінальному

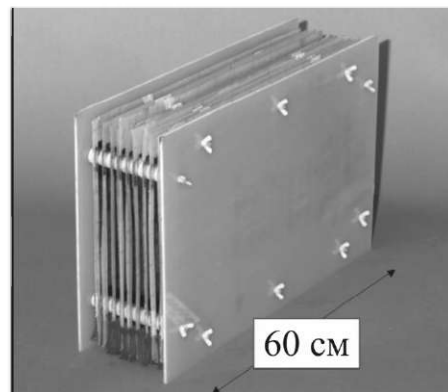


Рисунок 5.24 – ВТНП елементи (Ві-2212) зібрані у модуль, (фірми *ABB*)

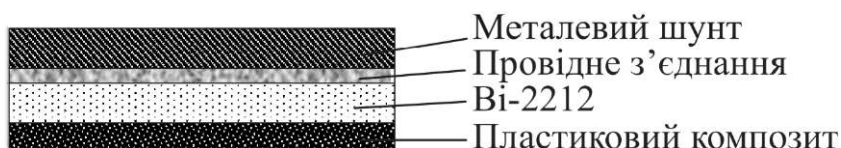


Рисунок 5.25 – Структура ВТНП елемента

струму на першому пікові та до 2–5 кратного номінальному – після 50 мс.

Струмообмежувальний модуль містить 100 ВТНП елементів, має достатньо компактну конструкцію – об’єм пристрою з криостатом не перевищує 1 м³. Було проведено 20 тестів ВТНПОС у лабораторії *ABB* (у м. Баден, Швейцарія) при напрузі 2,5–8 кВ з тривалістю КЗ 100 мс. Руйнування ВТНП матеріалу у повторних випробуваннях при напрузі 8 кВ виявлено не було, пристрій продемонстрував ефективне 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 (рис. 5.26) [242].

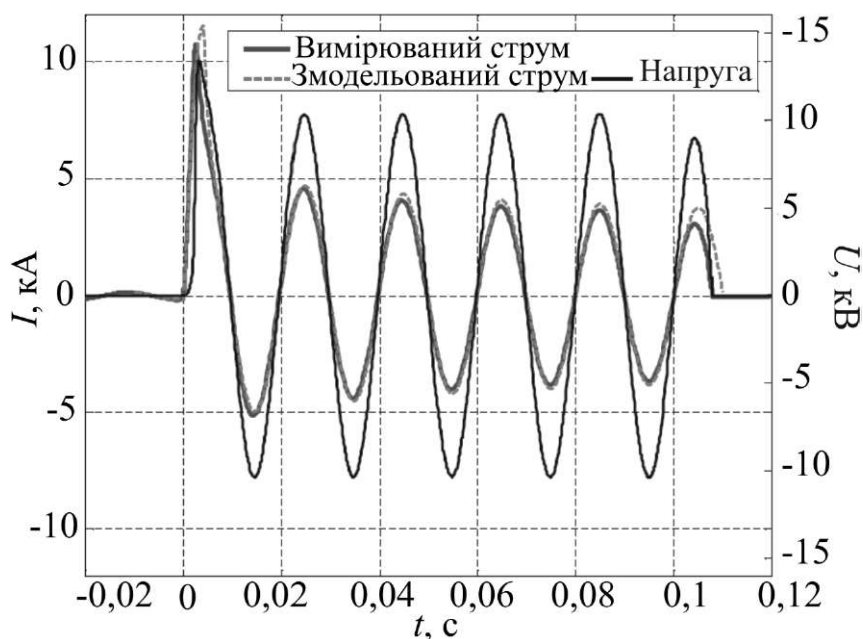


Рисунок 5.26 – Струмообмежувальна характеристика ВТНПОС потужністю 6,4 МВА

Для охолодження ВТНПОС до робочої температури (66 – 77 К) звичайно використовуються мікрорефрижератори (кріокулери) виробництва *Stirling Cryogenics*, *Cryo-Mech*, *SHI Cryogenics (Sumitomo)*. Протягом найближчих років прогнозують значне зниження цін на мікрорефрижератори з одночасним поліпшенням їхніх технічних характеристик, що обумовлюється розвитком цільових національних програм у США і Німеччині, а також появою на ринку нових великих виробників (*Siemens*). Цикл Гіффорда–Макмагона, який є класичним для кріокулерів, поступово витісняється більш економічним циклом Стерлінга, а використання пульсаційних труб (*Q-drive*) у холодних головках дозволить істотно підвищити їхню надійність за рахунок відмови від рухомих частин.

Японська електроенергетична компанія *Mitsubishi Electric Corporation (MELCO)*, яка з 1990 р. бере участь у програмі Міністерства зовнішньої торгівлі та промисловості і Організації розвитку нових промислових технологій та джерел енергії *NEDO* з розробки струмообмежувача, виготовила резистивний тон-

коплівковий обмежувач на основі ВТНП плівки, осадженої на стронцій-титановій підложці. Випробування показали можливість обмеження струму короткого замикання з 400 до 11,3 А [3].

Компанія *Siemens* досить довго займається розробками, спрямованими на застосування надпровідності в енергетиці, і є однією з лідируючих компаній як у Європі, так і серед учасників міжнародних проектів. Компанія *Siemens* проводила роботи в області застосування низькотемпературної надпровідності, але розвиток вони отримали тільки з появою високотемпературних надпровідників. Однією з таких розробок є концепція резистивного надпровідного обмежувача струму, що використовує ВТНП плівкові елементи з YBCO кераміки. Дана розробка була частиною спільного проекту *Siemens* з *Hydro-Quebec* (Канада), яка свого часу займалася розробленням індуктивної конструкції, аналогічної концепції фірми *ABB*.

З 1992 р. програма *Siemens* була спрямована на розроблення і дослідження технологій з отримання тонких плівок осадженням та лазерною абляцією стосовно до YBCO кераміки. Далі *Siemens* тестувало плівки, отримані методами розпилення магнетроном і випарювання на сапфіровій підложці (рис. 5.27) [3].

У ВТНПОС компанії *Siemens* резистивно-тонкоплівкового типу використовується спеціально виготовлена YBCO плівка товщиною 250 нм на сапфіровій основі, що має критичну густину струму 2×10^6 А/см² при температурі 77 К у власному магнітному полі.

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 реактора на 100 кВ потрібно 10 таких елементів, з'єднаних послідовно. На рис. 5.28, а зображений струмообмежувальний модуль, зібраний з таких елементів YBCO/Au на Al₂O₃ дисках.

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

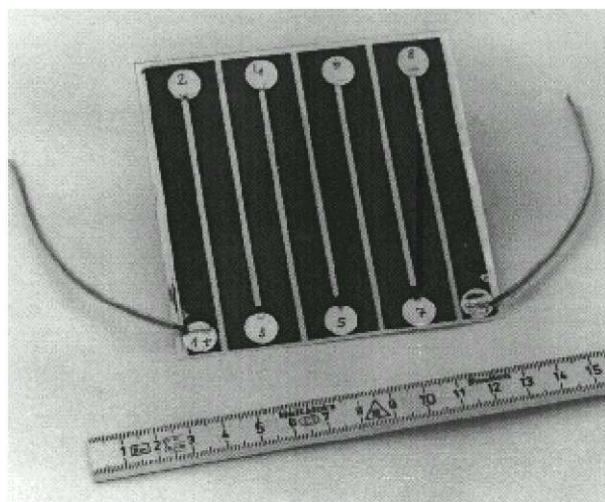
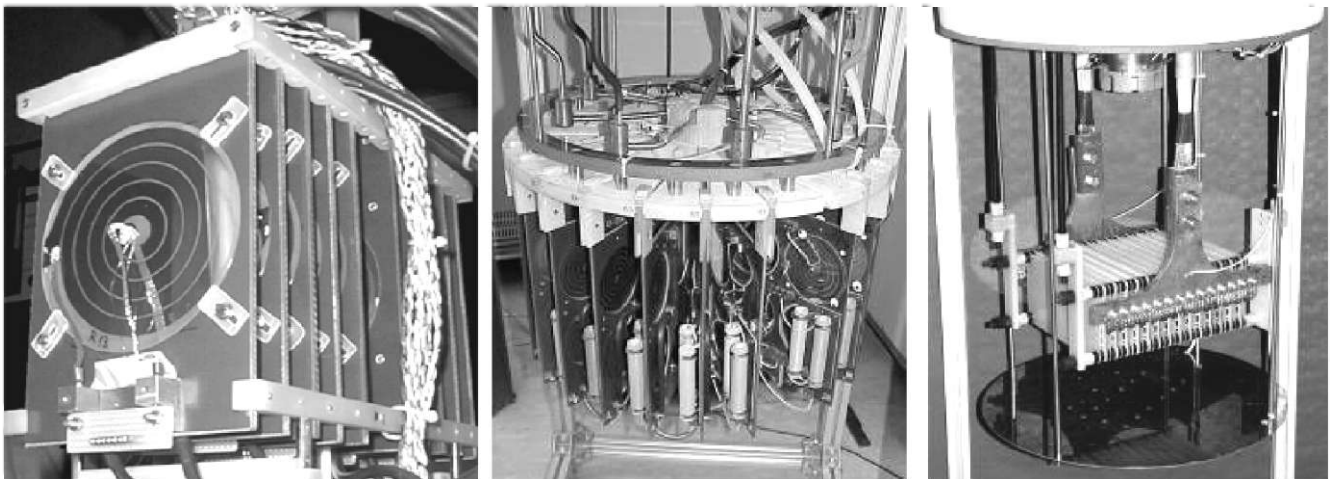


Рисунок 5.27 – Тонка плівка НПОС YBaCuO на полікристалічному двоокисі цирконію, осаджена тепловим випарюванням (*Siemens*)

нальним значенням струму 135 А [242]. На рис. 5.28, б, в показані наступні модельні розробки тонкоплівкової концепції обмежувача струму компанії *Siemens*.



а

б

в

Рисунок 5.28 – Струмообмежувальний модуль ВТНПОС *Siemens*:

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.

Ця концепція струмообмежувального реактора використовує ефект миттєвого збільшення опору в надпровідному елементі при втраті його надпровідності. Однак, це досить дорогий підхід, тому що виробництво тонких плівок YBCO із золотими шунтувальними покриттями витратне. З іншого боку, перевагою цієї технології є компактність пристрою.

Подальша робота *Siemens* над проектом тонкоплівкового надпровідного обмежувача струму резистивного типу (рис. 5.29) проводилася разом з компанією *American Superconductor*. Використовувався провід виробництва *AMSC* типу 344S (стрічка 2-го покоління армована нержавіючою сталлю), на нього припадає більше 50 % від річного виробництва ВТНП 2-го покоління компанії *AMSC*.

Компанія *Siemens* у 2005 р. створила і успішно випробувала модель трифазного ВТНПОС потужністю 1 МВА, 10 кВ на основі ітрієвих ВТНП плівок (YBCO). Швидкодія цього ВТНПОС склала менш 2 мс, що дозволило майже повністю обмежити ударний струм. Аналогічний проект був реалізований у

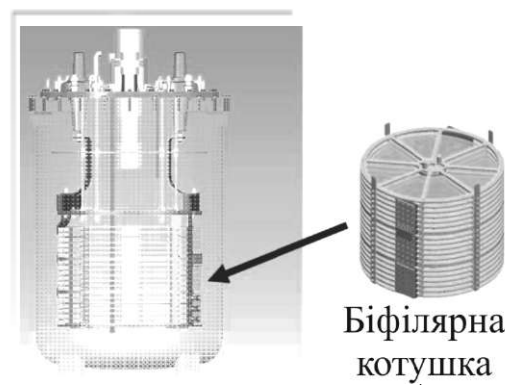


Рисунок 5.29 – Струмообмежувач компанії *Siemens* з проводу 344S виробництва *AMSC*

П. Корей. В 2006 р. компанією *Siemens* сумісно з *AMSC* було створено експериментальний досліджуваний макет потужністю 120 кВА (рис. 5.30, *а*).

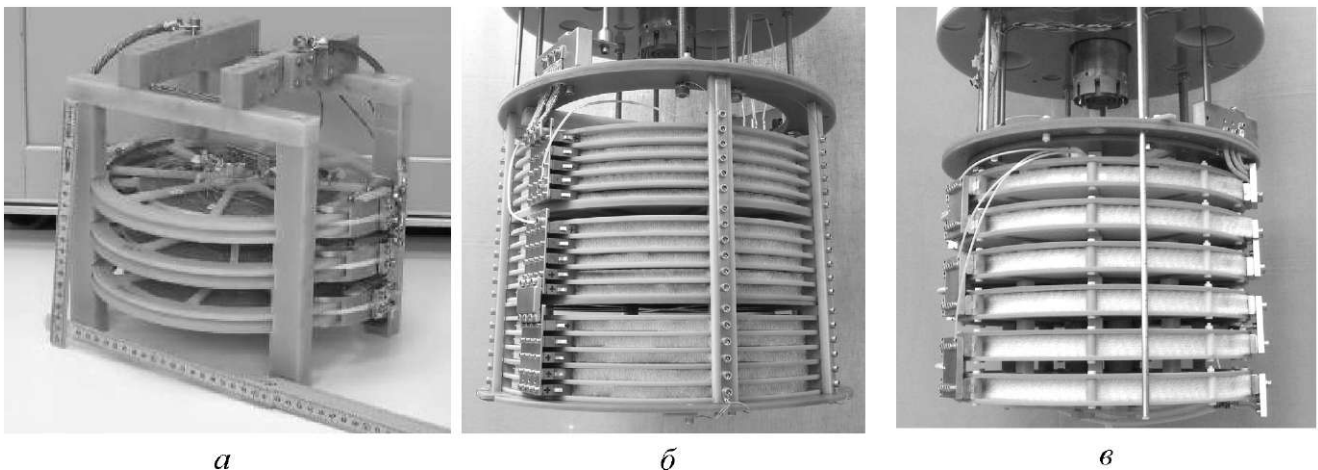


Рисунок 5.30 – Струмообмежувальний модуль однофазного ВТНПОС *Siemens*:
а – модель потужністю 120 кВА (50 А / 2,4 кВ), 3 котушки, 2006 р.;
б – модель потужністю 2,2 МВА (300 А / 7,2 кВ), 15 котушок, 2007 р.;
в – модель потужністю 3,5 МВА (425 А / 8,4 кВ), 6 елементів, 2008 р.

У 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. 5.30, *б*).

Випробування струмообмежувального модуля проводилося з робочим струмом 300 А при напрузі 7,5 кВ, що відповідає звичайному для розподільних мереж США класу напруг 13 кВ. Сталий струм короткого замикання був обмежений у 25 разів. Час повернення до надпровідного стану складав близько 2 с (рис. 5.31), що наближується до часу автоматичного повторного вмикання.

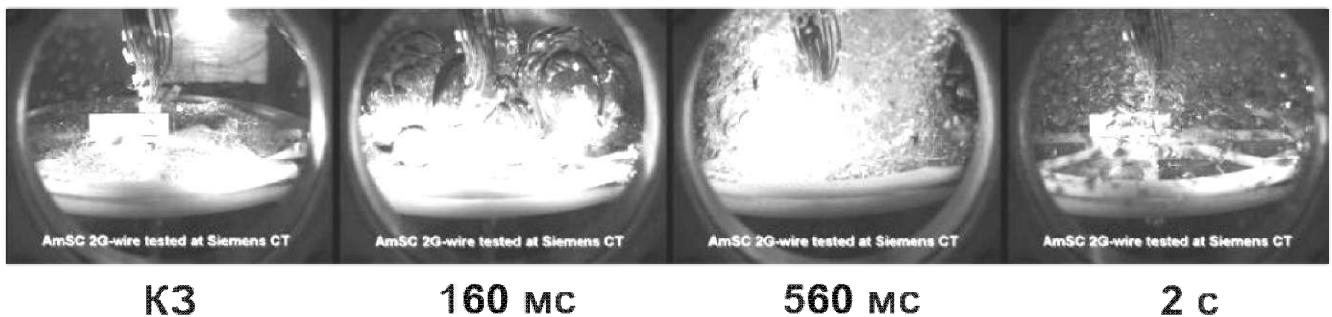


Рисунок 5.31 – Остигання струмообмежувального елемента після спрацьовування (*Siemens*)

Цей струмообмежувач може бути прототипом для пристроїв великої потужності. За оцінкою компанії *Siemens*, зробленої на основі аналізу існуючих проектів ВТНПОС, а також прогнозу цін на криогенне устаткування і ВТНП матеріали, вартість ВТНПОС у випадку їхнього масового виробництва складе 5000 дол., розраховуючи на 1 МВА прохідної потужності.

У 2008 р. з ВТНП 2-го покоління стрічки типу 344S шириною 12 мм виробництва *AMSC* був виготовлений прототип модуля високовольтного струмообмежувача з номінальним струмом 425 А і напругою 8,4 кВ (див. рис. 5.30, в). Струмообмежувальний модуль складається з шести біфілярних галетних котушок, з'єднаних послідовно, з тefлоновою ізоляцією між витків. На кожну із ВТНП котушок було витрачено 52 м надпровідника, загальні витрати надпровідника складають 312 м. Високе значення номінального струму пов'язане із зниженням робочої температури до 73,5 К; при роботі в рідкому азоті і при атмосферному тиску номінальний струм падає до 300 А. Відновлення надпровідних властивостей ВТНП елемента відбувалося за 16 с після обмеження струму короткого замикання.

Однією з основних проблем при розробленні високовольтних струмообмежувачів є забезпечення необхідної діелектричної міцності ізоляції. Відповідно до технічних вимог ВТНП струмообмежувач повинен витримувати випробування напругою в 275 кВ і грозовий імпульс у 650 кВ, що вимагає особливої конструкції кріостата у формі горизонтально розміщеного циліндра (рис. 5.32), на кінцях якого розташовані струмовводи [243, 244].

Також були розпочаті спеціальні заходи щодо оптимізації електричних полів усередині кріостата. Необхідної діелектричної міцності ізоляції вдалося досягти за рахунок роботи в переохолодженому до 72–74 К рідкому азоті при підвищеному до 5 атм тиску. Для високовольтного струмообмежувача передбачається використати струмовводи, розроблені раніше компанією *Nexans* для ВТНП кабелю *LIPA* [243].

У роботі [245] співробітниками ряду дослідних лабораторій у Греноблі (Франція) висвітлено можливість використання в мережах постійного струму подвійних шарів $YBa_2Cu_3O_7-Au$. Принцип дії обмежувачів струму КЗ на основі таких елементів полягає в переході в нормальний стан надпровідних плівок $YBa_2Cu_3O_7$, коли струм перевищує критичне значення. Вивчення переходів під впливом імпульсів струму показує, що викликаний нагріванням перехід у нормальний стан може відбуватися з характерним часом затримки. Тривалість цієї затримки визначається амплітудою імпульсу струму. Ця затримка становить менше 10 мкс, коли струм близький до трикратного критичного значення. Настільки швидкий перехід у нормальний стан дає можливість здійснити ефек-

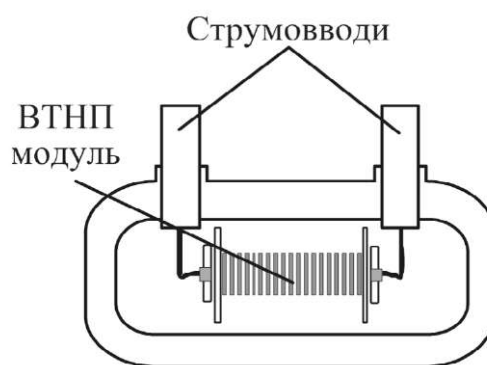


Рисунок 5.32 – Схема кріостата високовольтного ВТНПОС (*Siemens*)

тивне обмеження струму. Відновлення надпровідного стану може відбуватися при протіканні струму. Ця властивість має надзвичайний інтерес для випадку автономної роботи струмообмежувального реактора в мережі, коли виникають великі перехідні струми, обумовлені підключенням потужних споживачів електроенергії.

Композитні двошарові ВТНП елементи YBCO-Au діаметром 51 мм були отримані осадженням на сапфірові підложки товщиною 0,5 мм. Товщина шарів YBCO і Au складала, відповідно, 300 і 150 нм. Контакти посилені пресованою фольгою з індію. Критична густина струму надпровідника складала $3,3 \times 10^6$ А/см². Дослідження переходів ВТНП елементів у нормальний стан проводилися в різних умовах охолодження – у рідкому азоті і у вакуумі, при струмах 20–40 А. Результати роботи довели перспективність таких елементів для використання з метою обмеження струмів КЗ у мережах постійного струму. Планується проведення подальших експериментів із пристроями на середню потужність близько 100 кВА.

Значного прогресу в галузі конструювання НПОС на основі високотемпературних надпровідників досягла компанія *Hyundai Heavy Industries* (Південна Корея), яка успішно провела випробування дослідних зразків. Корпорація *AMSC* поставила у Південну Корею 2,6 км ВТНП стрічки 2-го покоління типу 344S з покриттям з нержавіючої сталі. На основі цього провідника *Hyundai Heavy Industries* у співробітництві з *Yonsei University* виготовила зразок однофазного струмообмежувача резистивного типу і провела його дослідження (рис. 5.33).

Роботи над цим проектом проводяться в рамках програми *DAPAS* [246], що була прийнята в 2004 р. і фінансується Міністерством з науки і технологій.

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 у 3 рази вище, ніж звичайні вимоги до пристроїв даного класу напруг. Удалося звести обмеження ударного струму короткого замикання з 30 до 3,6 кА. У ході попередніх експе-



Рисунок 5.33 – Прототип ВТНПОС потужністю 8,3 МВА (13 кВ, 630 А) на дослідному стенді (*Hyundai*)

риментів час повернення системи в надпровідний стан не вимірювався.

На думку фахівців *Hyundai*, ВТНП струмообмежувачі мають комерційні перспективи в мережах 30–60 кВ і 154 кВ уже в найближчому майбутньому. Подальші розроблення *Hyundai* будуть спрямовані на створення високовольтних струмообмежувачів. Для цього проекту вже розроблена криогенна система високого тиску (65 К при 3 бар), а також низка допоміжних високовольтних пристроїв [247].

Багато компаній, у тому числі і *AMSC*, продовжують займатися розробленням та випробуванням НП струмообмежувачів резистивного типу. Одним з цікавих рішень є пропозиція використовувати в якості ВТНП обмежувача струму кабель високої потужності. Обмеження струму може бути досягнуто в кабелі з ВТНП матеріалів 2-го покоління, безпосередньо, за рахунок відносно високого питомого опору вихідних надпровідних стрічок, що з'являється при перевантаженні струмом КЗ [248].

Після появи ВТНП проводів 2-го покоління і проводів на основі MgB_2 (дібориду магнію) розпочалися роботи з їх використання для виготовлення струмообмежувальних елементів ВТНПОС. Струмонесяча здатність проводів на основі MgB_2 вище, ніж у ВТНП матеріалів, а їх очікувана ціна нижча. Роботи зі створення резистивного струмообмежувача на основі MgB_2 (6,6 кВ, 400 А) ведуться в Великобританії компанією *Rolls Royce*.

Італійський дослідницький центр *CESI Ricerca (CR)* у 2006 р. створив і успішно випробував кілька дослідних зразків надпровідних струмообмежувачів резистивного типу як на основі $Bi-2223$ провідників у срібній матриці, а також на основі MgB_2 провідників. Усі роботи з даного проекту здійснюються при підтримці Міністерства економічного розвитку Італії, тривалість проекту становить 3 роки.

ВТНП провідники на основі $Bi-2223$ у срібній матриці доступні і мають відносно низьку ціну, але через їх низький питомий опір необхідна кількість для створення ВТНПОС буде в кілька разів вищою, ніж у випадку використання дорожчих ВТНП провідників 2-го покоління.

Провідники на основі MgB_2 вважаються прийнятним матеріалом для майбутніх НПОС резистивного типу, тому що їх очікувана вартість буде нижчою,



Рисунок 5.34– Три-фазний ВТНПОС потужністю 1 МВА виробництва CR

при високих критичних характеристиках. У дослідному центрі *CR* вважають використання у струмообмежувачах резистивного типу надпровідників на основі MgB_2 у сполученні з системою криогенного забезпечення на рідкому неоні більш вигідним, ніж використання дорогих ВТНП провідників 2-го покоління, охолоджуваних рідким азотом.

Для оцінювання технічних характеристик і можливостей надпровідних струмообмежувачів резистивного типу були розроблені і випробувані кілька дослідних зразків: трифазний ВТНП струмообмежувач на основі $Bi-2223$ провідників у срібній матриці з номінальною потужністю в 1 МВА і номінальною напругою 2,2 кВ (рис. 5.34), два макета трифазних ВТНП струмообмежувачів на 200 кВА і 400 В (також з $Bi-2223$ провідника) і однофазний надпровідний струмообмежувач на основі MgB_2 стрічкових провідників [249].

Протягом випробувань ВТНП струмообмежувача з номінальною потужністю в 1 МВА імітувалося коротке замикання фази на землю, а також міжфазне коротке замикання, як для заземленої, так і для ізольованої нейтралі. Ударний струм без ВТНП струмообмежувача досягав 15,44 кА, використання струмообмежувача дозволило знизити ударний струм до 2–3,1 кА (рис. 5.35).

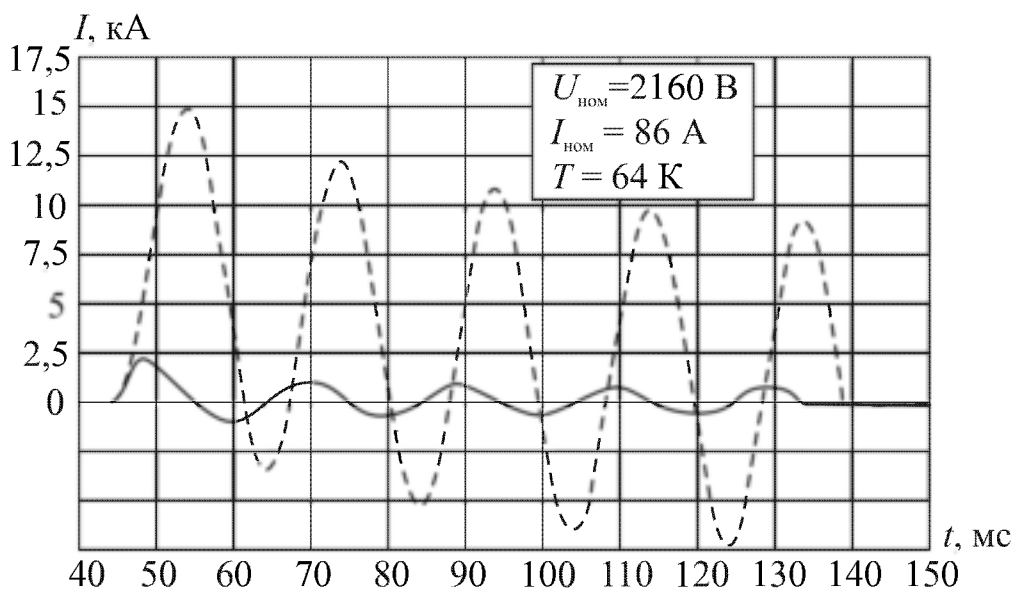


Рисунок 5.35 – КЗ у колі з ВТНПОС (безперервна лінія) і без нього (пунктирна лінія)

Фази ВТНП струмообмежувача були виготовлені з різних ВТНП провідників, тому глибина обмеження струму короткого замикання у різних фазах відрізнялася. Тривалість короткого замикання становила від 30 до 100 мс. Номінальна температура ВТНП струмообмежувача 65 К підтримувалася за допомогою криокулера виробництва *Stirling Cryogenics* з холодопродуктивністю 750 Вт, що дозволило проводити тривалі випробування без додавання рідкого азоту. Надлишковий тиск у криостаті ВТНП струмообмежувача міг досягти

3 бар, однак у ході випробувань у кріостаті підтримувався тиск не вище, ніж 1 бар.

Трифазні ВТНП струмообмежувачі на 200 кВА і 400 В призначалися для відпрацювання технічних рішень, які були згодом використані у струмообмежувачі на основі MgB_2 , на них також досліджувався вплив нагрівання ВТНП провідника на процес обмеження струму короткого замикання. Конструктивно ВТНП струмообмежувачі являли собою безіндуктивні котушки із шаровим намотуванням у два або в чотири шари, намотані на склотекстолітових каркасах. Шари ВТНП секцій струмообмежувача з'єднувались між собою таким чином, щоб сумарна індуктивність була мінімальною. При монтажі у кріостаті окремі фази ВТНП струмообмежувача розміщалися коаксіально. У якості ВТНП провідника використовувалися Ві-2223 стрічки у срібній матриці виробництва *AMSC*, критичний струм яких у власному полі склав 145 А при температурі 77 К і 245 А при 65 К. Перед виготовленням ВТНП струмообмежувачів було проведено детальне математичне моделювання перехідних процесів у них під час короткого замикання.

Модель однофазного надпровідного струмообмежувача була виготовлена із багатожильного стрічкового провідника на основі MgB_2 виробництва *Columbus Superconductors*, з якого був створений струмообмежувальний елемент у вигляді безіндуктивної котушки із шаровою намоткою. До робочої температури в 27 К струмообмежувач заохолоджувався за допомогою двоступінчастого кріокулера виробництва *Stirling Cryogenics*, у якості холодоагенту використовувався рідкий неон. Критичний струм коротких зразків надпровідних стрічок на основі MgB_2 склав близько 225 А, вимірювання проводилися у власному полі надпровідника при температурі 30 К. Переріз надпровідних стрічок складав 0,35–3,8 мм². Для теплової стабілізації в конструкцію стрічкового провідника була введена мідна серцевина, оточена волокнами з MgB_2 . Наявність мідного стабілізатора гарантує, що тепло, яке виділяється при локальному розігріванні, буде ефективно відводитись у холодоагент, що запобігає утворенню гарячих точок і згорянню стрічки. Для зниження втрат на змінному струмі поперечний опір стрічкового надпровідника було збільшено шляхом укладання мідного стабілізатора в нікелеву оболонку. Щоб запобігти взаємній дифузії міді та нікелю, волокна з MgB_2 були покриті дифузійними бар'єрами із заліза [250].

Номінальна напруга струмообмежувача на основі MgB_2 складала 400 В при номінальному струмі близько 200 А. У ході випробувань струмообмежувача були отримані залежності між тривалістю процесу короткого замикання, значенням перегрівання MgB_2 стрічки і ростом тиску усередині кріостата, ви-

кликаною випарюванням рідкого неону. Тривалість короткого замикання становила від 30 до 100 мс. Надпровідна стрічка на основі MgB_2 нагрівалася до температури 85 К при тривалості короткого замикання в 100 мс. Ударний струм без струмообмежувача становив 5 кА, струмообмежувач скоротив значення ударного струму до 1860 А, а сталий струм короткого замикання зменшився до 1064 А.

У проекті заплановано виготовити ВТНП струмообмежувач із номінальною напругою 10 кВ, потужністю 15 МВА і встановити на підстанції поблизу Мілана. ВТНП провідник для нього на основі $Bi-2223$ у срібній матриці поставить японська компанія *Sumitomo Electric Industries*. Струмообмежувачі великої потужності на основі MgB_2 зараз знаходяться у стадії розроблення.

5.3.3. Резистивний шунтованого типу матричний НПОС

США має значний досвід у розробленні надпровідного устаткування, у тому числі і НПОС. Крім розглянутої вище концепції реакторів „*Cryo-Pinch*”, США мають достатньо велику кількість спільних та оригінальних національних науково-дослідних програм щодо розроблення НПОС. Роботи у цьому напрямку здійснюються на державному рівні. Міністерство Енергетики США з 28 червня 2007 р. відкрило велику програму підтримки науково-дослідних проєктів, спрямовану на модернізацію енергосистем з використанням високотемпературних надпровідників. Виконання проєктів здійснюється під керівництвом Національної лабораторії енергетичних технологій (*National Energy Technology Laboratory*). Тематика проєктів включає поліпшення ефективності і надійності ВТНП кабелів, а також розроблення і створення ВТНП струмообмежувачів.

Компанія *AMSC* розробляє і підготовляє до випробувань в енергосистемі трифазний високовольтний струмообмежувач *SuperLimiter*TM (на 115 кВ, 1200 А) на основі ВТНП проводу 2-го покоління типу 344S власного виробництва. Струмообмежуючий елемент виконаний у вигляді безіндуктивної котушки, виготовленої за технологією *Siemens*, що робить струмообмежувач практично непомітним для електромережі в номінальному режимі роботи. Експлуатаційні випробування струмообмежувача передба-



Рисунок 5.36 – Однофазний попередній прототип *Matrix* у криостаті

чається провести в енергосистемі *Southern California Edison*.

Крім цього, у програму включений проект матричного струмообмежувача *Matrix*, створеного компаніями *SuperPower* (США) і *Nexans* (Німеччина) (рис. 5.36). Він призначений для роботи при 138 кВ і є розробкою компанії *SuperPower*, яка запропонувала концепцію його конструкторсько-технічного рішення (патент США 6664875 [251]).

Матричний надпровідний обмежувач струму (МНПОС) складається з великої кількості надпровідних ВТНП струмообмежувальних елементів 2-го покоління, шунтованих індуктивностями, які у складенні являють собою матричну структуру (рис. 5.37). Кількість рядків (n) визначається номінальним струмом мережі, а кількість стовпців (m) – необхідним опором для обмеження струму. Кінцевою метою проекту є створення ВТНПОС для електричної мережі 110–220 кВ.

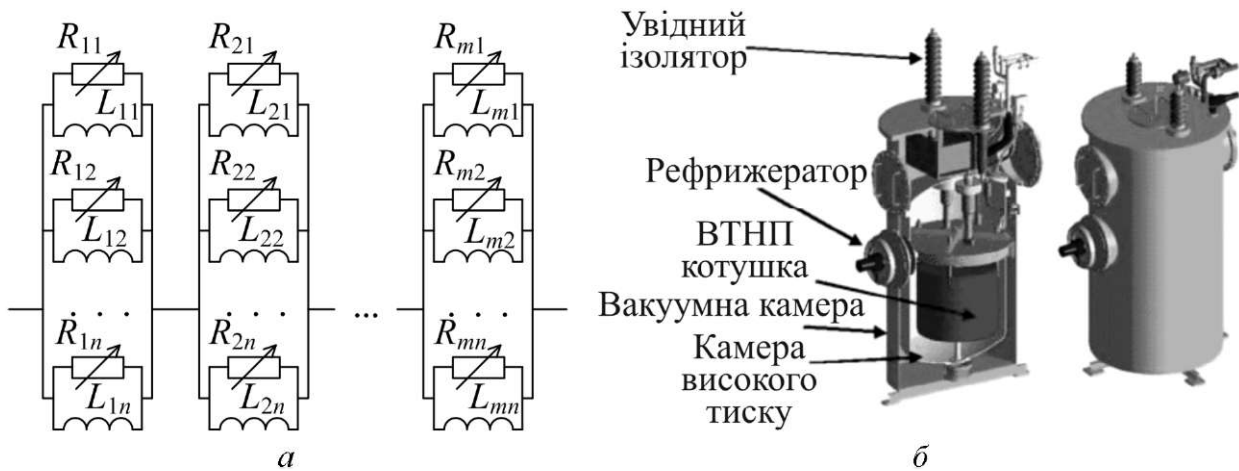


Рисунок 5.37 – Матричний обмежувач струму *Matrix*:
 a – схематичне зображення; b – низьковольтний прототип

Принцип роботи відповідає резистивному обмежувачу струму шунтованого типу, який розглянуто вище. 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 без втрат [252].

Сам проект розділений на три етапи, кожний з яких має завершитися створенням зразка – прототипу. Перша фаза проекту завершилася в липні 2004 р. виготовленням однофазного попереднього низьковольтного прототипу з номінальною напругою 8 кВ, номінальним струмом 800 А, з обмежуючою здатністю 25 кА. Другий етап проекту – створення однофазного „альфа” прототипу на 138 кВ. Третій завершальний етап – створення трифазного „бета” прототипу на 138 кВ, придатного для повноцінного застосування в діючій енергомережі.

Незважаючи на те, що *SuperPower* займається розробленням і виробниц-

твом надпровідників, розроблення і виготовлення ВТНП матеріалів і ВТНП елементів, відповідно, передано фірмі *Nexans*, що пов'язане з успішною реалізацією німецького проекту *CURL-10*, який був розглянутий вище. Для проекту *Matrix* фірма *Nexans* підготувала надпровідні елементи у вигляді надпровідних трубок, на відміну від уже відомих біфілярних ВТНП котушок, що застосовувалися у проекті *CURL-10*. Котушка з нормально-провідного металу



Рисунок 5.38 – Елементи для попереднього прототипу ВТНПОС *Matrix*

(міді) намотується безпосередньо на ВТНП елемент, виконаний з готовими мідними контактами, і шунтує його (рис. 5.38). У такий спосіб утворюється одиничний струмообмежувальний елемент матриці, а їх об'єднання в паралель утворює модуль матриці. Таким чином, нові елементи не потребують металевго шунта, а кількість необхідного ВТНП матеріалу зменшується у порівнянні з біфілярними котушками. Завдяки такій концепції зменшуються втрати і габарити елементів.

Фірма *Nexans* розробила технологію для виготовлення ВТНП елементів, застосувавши вже апробований метод *MCP* з наступною операцією оброблення поверхні, яка оптимізована для виробництва надпровідних трубок. Нова технологія дозволила поліпшити характеристики ВТНП елементів (табл. 5.9) у порівнянні з біфілярними котушками [253].

Під час виробничого процесу виготовлення НП елементів для обмежувача *Matrix* технологія була дороблена, у результаті чого однорідність фази на виготовлених зразках збільшилася при загальному збільшенні обсягу виробництва. Розв'язання такої технічної потреби необхідно, тому що прототип другого етапу є високовольтним і вимагає збільшення кількості елементів з меншими габаритними показниками і з декілька більшою густиною критичного струму. При цьому розбіжність характеристик усіх обмежуючих елементів має бути невеликою. Тому ВТНП елементи, розроблені для „альфа” прототипу, відрізняються від елементів, які виготовлялися для першого етапу (рис. 5.39). Розбіжність значень критичного струму, яка на першому етапі була в межах 10 %, для

другого етапу становить 3 %.

Таблиця 5.9 – Порівняльні характеристики ВТНП елементів Nexans

Характеристики	Біфілярні котушки	Трубки МНПОС
I , А (66 К)	600	2500
Час повторного охолодження, с	> 30	< 10
Втрати, %	100	< 10
Об'єм, см ³	1000	200
Пропускна потужність елемента, кВА	130	450

Розроблювачі відзначають наступні позитивні особливості матричного НПОС [254]:

- модульна конструкція, яка дозволяє переходити до більш високих напруг, і гнучко пристосовується до вимог конкретних споживачів;
- відсутність втрат і падіння напруги в ситуації безаварійної роботи;
- пасивне детектування і ввід струмообмежувального імпедансу без активного моніторингу або контролю (імпеданс уводиться тільки за умов аварійних ситуацій і струмів КЗ);
- підвищена надійність як наслідок матричної структури системи;
- відносно низька вартість при використанні ВТНП матеріалу BSCCO-2212;
- екологічність та надійність з точки зору вогнебезпеки.

Протягом робіт з матричним НПОС його конструкція перетерпіла зміни, компанія *SuperPower* відмовилася від використання масивних ВТНП елементів з Bi-2212 на користь ВТНП провідників 2-го покоління, у роботах з надпровідними елементами для матричного НПОС компанія *Nexans* вже участі не приймає, а займається самостійними розробками матричного струмообмежувача на основі масивних елементів з Bi-2212 у рамках проекту *CULT-110*.

Наприкінці 2008 р. компанія *SuperPower* виготовила і випробувала прототип ВТНП струмообмежуючого модуля матричного НПОС, розрахованого на номінальний струм в 1200 А. Його конструкція являє собою решітку, набрану з коротких відрізків ВТНП стрічок 2-го покоління власного виробництва шириною 12 мм, які спаяні одна з одною (рис. 5.40).



Рисунок 5.39 – ВТНП елементи:
a – першого етапу;
b – другого етапу

Спаї між ВТНП стрічками були розроблені таким чином, щоб виключити ризик виникнення „гарячих точок”. Положення ВТНП стрічок у решітці визначалося з урахуванням впливу їхніх магнітних полів одне на одне, за рахунок чого вдалося досягти рівномірного розподілу струму між усіма паралельно з'єднаними провідниками. ВТНП модуль зашунтований мідною котушкою індуктивності, відношення реактивного опору якої до активного становить 30.

Конструкція має велику поверхню, яка охолоджується, що дозволяє досягти відновлення ВТНП струмообмежувачем надпровідного стану протягом часу, меншого за автоматичне повторне вмикання (близько 0,3 с), а також забезпечує повернення ВТНП елемента в надпровідний стан у випадку протікання через нього струму навантаження. Дана вимога була закладена в технічне завдання, що багато в чому визначило конструкцію прототипу модуля МНПОС.

Для дослідження процесу відновлення під навантаженням було виготовлено і випробувано кілька малих макетних зразків. Значної уваги було приділено також питанню дослідження діелектричної міцності ізоляції. Було проведено спеціальне дослідження пробою в рідкому азоті при різній геометрії електродів, тиску азоту і наявності (або відсутності) пухирців [255].

Проект *CULT-110* здійснюється разом з університетом Лейбніця (Ганновер), компаніями *Nexans Deutschland Industries*, *Nexans SuperConductors*, науковим центром *Forschungszentrum Karlsruhe (ITP)* за підтримки німецького уряду. Це один з найбільших проектів з розроблення ВТНП струмообмежувача в Європі, який спрямовано на створення демонстраційного зразка однофазного високовольтного струмообмежувача на 110 кВ, 1850 А. Демонстраційний прототип здатний обмежувати ударний струм до 31,5 кА, а сталий струм короткого замикання – до 6 кА. Основні характеристики ВТНП струмообмежувача *CULT-110* у порівнянні з *CURL-10* наведені в табл. 5.10.

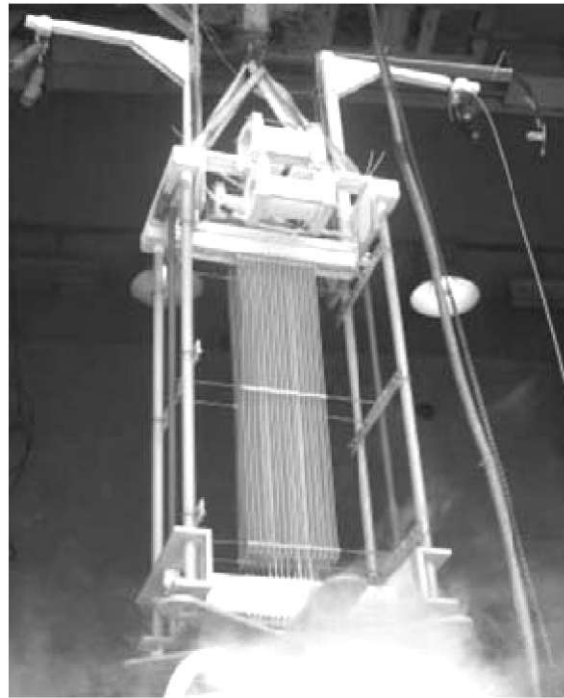


Рисунок 5.40 – Струмообмежувальний модуль матричного ВТНПОС

Таблиця 5.10 – Основні характеристики *CURL-10* і *CULT-110*

Параметр	Значення	
	<i>CURL-10</i>	<i>CULT-110</i>
Кількість фаз	3	1
Номинальна напруга, кВ	10	110
Номинальний струм, А	600	1850
Тривалість КЗ, мс	60	60
Загальна довжина надпровідника, м/фаза	150	234
Площина перерізу надпровідника, см ²	0,25	1,8

Роботи із проекту *CULT-110* було розподілено між німецькими організаціями в такий спосіб: розрахунки були виконані в університеті Лейбниця (Ганновер), *Nexans Deutschland Industries* розробляє криогенну частину проекту, *Nexans SuperConductors* виготовляє окремі компоненти й проводить фінальне складання пристрою, а науковий центр *Forschungszentrum Karlsruhe (ITP)* відповідає за високовольтні випробування.

У струмообмежувачах резистивного типу є небезпека появи теплових доменів, викликана неоднорідністю переходу надпровідника в нормальний стан. У проекті *CURL-10* у якості захисту застосовувався шунт із мідно-нікелевого сплаву, спаяний з надпровідником по всій довжині. Таке рішення неприйнятне для високовольтних пристроїв через надмірні витрати надпровідника. Припустима величина нагрівання шунта накладає обмеження з падіння напруги на надпровідному елементі в 80 В/м, чого недостатньо. Для струмообмежуючих елементів *CULT-110* було запропоновано нову схему шунтування, при якій поверх надпровідного елемента намотується мідна обмотка, з'єднана в паралель з ВТНП елементом (рис. 5.41).

Під час короткого замикання струм перетікає в шунтуючу котушку, що створює магнітне поле, яке забезпечує швидкий і однорідний перехід надпровідника в нормальний стан. Таке рішення дозволяє підняти максимально припустиме падіння напруги на ВТНП елементі з 80 до 320 В/м, у порівнянні з активним шунтуванням надпровідника по всій його довжині, а витрати надпровідника скорочуються у 4 рази.

Спочатку конструкція ВТНП елемента містила виплавлений надпровідний елемент з Ві-2212 кераміки у формі порожнього циліндра, поверх якого на-

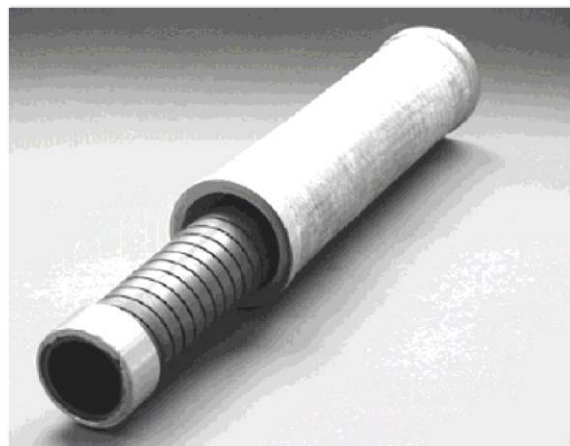


Рисунок 5.41 – ВТНП елемент для струмообмежувача *CULT-110*

мотувалася мідна котушка, з'єднана з ним послідовно. Однак для такої схеми рівень втрат на змінному струмі досить великий, близько 3 кВт для однієї фази струмообмежувача *CULT-110*. Тому шляхом фрезерування ВТНП елемента було змінено на форму спіралі.

Товщина ВТНП циліндра була обрана мінімально можливою – 2 мм (для зниження втрат на змінному струмі і збереження високої критичної густини струму), ширина витка складала 10,5 мм при діаметрі циліндра 50 мм.

Для досягнення робочої напруги в 110 кВ і струму в 1850 А використане послідовно-паралельне з'єднання великої кількості ВТНП елементів (рис. 5.42). По суті, ця конструкція містить у собі матричну структуру (ВТНПОС *Matrix* – сумісний проект *Nexans* із *SuperPower*) та забезпечення однорідності НП переходу завдяки магнітному полю шунтуючої котушки (ВТНПОС виробництва *EA Technology*).

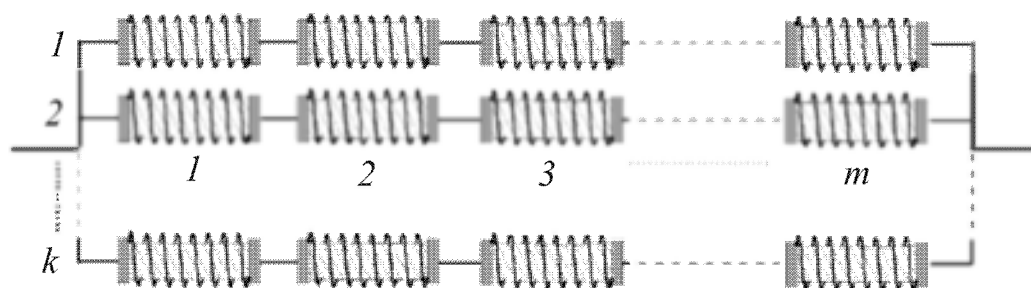


Рисунок 5.42 – Схема з'єднання ВТНП елементів *CULT-110*

Струм через окремий ВТНП елемент у k разів менше сумарного струму (де k – кількість паралельно з'єднаних ланцюжків, для *CULT-110* $k \sim 10$). Загальна довжина надпровідника, необхідного для виготовлення *CULT-110*, виходячи з умови максимально припустимої температури розігріву обмотки при короткому замиканні в 300 К, склала 231 м. При довжині надпровідника в одиничному ВТНП елементі в 260 мм для виготовлення струмообмежувача *CULT-110* потрібно 650 таких елементів.

ВТНП елементи пройшли детальні випробування. Осцилограми струму і напруги на ВТНП елементі під час короткого замикання подано на рис. 5.43.

Створення високовольтного ВТНП струмообмежувача великої потужності є складною інженерною задачею, існує низка питань, відповіді на які можна отримати тільки в ході повномасштабних експлуатаційних випробувань. Тому, перш ніж приступити до виготовлення струмообмежувача *CULT-110*, компанія *Nexans* розробила і виготовила ще один трифазний ВТНП струмообмежувач на 11 кВ (рис. 5.44), на якому буде проведена апробація конструктивних і технологічних рішень, розроблених для використання в *CULT-110*. На відміну від *CURL-10* у новому ВТНП струмообмежувачі використовуються ВТНП елемен-

ти, призначені для *CULT-110*, що дозволило в кілька разів скоротити витрату ВТНП матеріалів і рівень втрат на змінному струмі. Конструкція ВТНП струмообмежувача у цілому нагадує *CURL-10*. Скорочення кількості ВТНП елементів дозволило зробити пристрій більш компактним [256, 257].

У стендових випробуваннях ударний струм був обмежений з 10,2 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 Ланкаширі (Великобританія).

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

Схожа за матричною структурою схема НПОС досліджувалась у *Budapest University of Technology and Economics (Угорщина)*, але на базі реакторів трансформаторного типу, основними елементами яких були кільця з YBCO із внутрішнім діаметром 31 мм, установлені на магнітопроводі. Розроблена спеціальна конструкція струмообмежувального реактора, що відрізняється істотно зменшеним імпедансом у нормальному режимі роботи і можливістю його регулювання в режимі обмеження струму. Такий реактор може бути сконструйований із заздалегідь

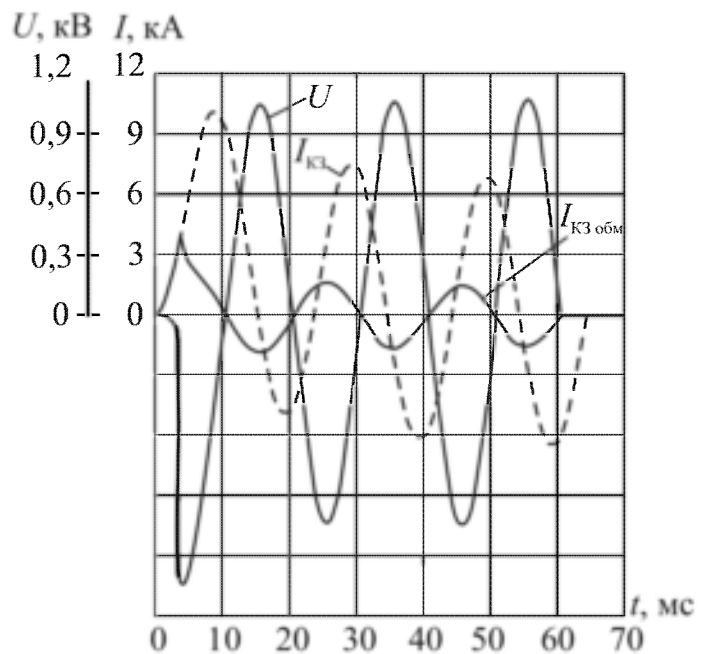


Рисунок 5.43 – Осцилограми струму і напруги на ВТНП елементі *CULT-110*



Рисунок 5.44 – Прототип ВТНПОС *CULT-110* (Nexans / ASL)

визначеними експлуатаційними параметрами і здатний витримати кілька тисяч робочих циклів (спрацювання при КЗ і повернення у вихідний стан у нормальному режимі роботи). Автори досліджували можливості підвищення номінальної потужності і надійності такого струмообмежувача. Для цього були розглянуті різні схеми з'єднання ВТНП елементів – послідовна, паралельна і матрична. А також проведені випробування послідовно і паралельно з'єднаних реакторів з метою дослідження процесів струмообмеження, що відбуваються як у кожному окремому апараті, так і у всій групі разом [258].

Струми при спрацюванні реакторів змінювалися приблизно від 4 до 0,8 А, тобто зменшувалися у п'ять разів. Характерний час спрацювання складав ~ 5 мс. Авторам розробки вдалося знайти такий спосіб з'єднання реакторів у схемі і так відрегулювати її, що розкид параметрів реакторів (тобто, характеристик ВТНП кілець) не робив скільки-небудь значного впливу на роботу всієї групи в цілому [259].

5.3.4. НПОС резистивно-індуктивного типу

Цікавий проект резистивного обмежувача струму, у якому величина критичного струму у ВТНП елементах змінюється за допомогою зовнішнього магнітного поля, був розроблений у Великобританії. У проекті, роботу над яким було розпочато в 1995 р., приймали участь компанії *EA Technology*, *VA TECH T&D*, *Merck*, *BOC Gases*, *Rolls-Royce* та Кембриджський університет. В останньому був розроблений так званий текстурований метод отримання керамічної сполуки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$. Цей метод використовує інертні волокна MgO для осадження кераміки з мікроструктурою високого класу, яка в кон'юнкції з оптимізованим рівнем легування киснем покращує властивості надпровідника. Надпровідні елементи мають форму стрижнів (рис. 5.45), кожен з яких являє собою твердий прут зі сполуки $\text{Bi}-2212$ із розмірами $0,25 \times 2,5 \times 25 \text{ см}^3$. Вони безіндуктивно розміщені усередині обмежувача струму і послідовно з'єднані з нормально провідною котушкою, намотаною з тонкоплівкової фольги. Вся система знаходиться в середині кріостата, наповненого рідким азотом (рис. 5.46).

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

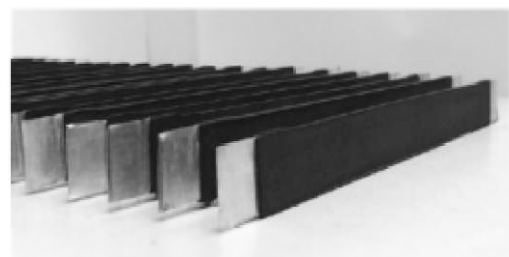


Рисунок 5.45 – ВТНП елементи 800 А для ВТНПОС, *EA Technology*

ВТНП матеріалу. Так утворюється самозбудний механізм, настроювання якого визначається комбінацією фонового магнітного поля і критичного струму надпровідного елемента. За принципом дії така конструкція, безсумнівно, належить 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 р. Дослідний зразок (з номінальним струмом 400 А) обмежував струм короткого замикання з 37 до 12 кА на першому пікові (рис. 5.47) [260].

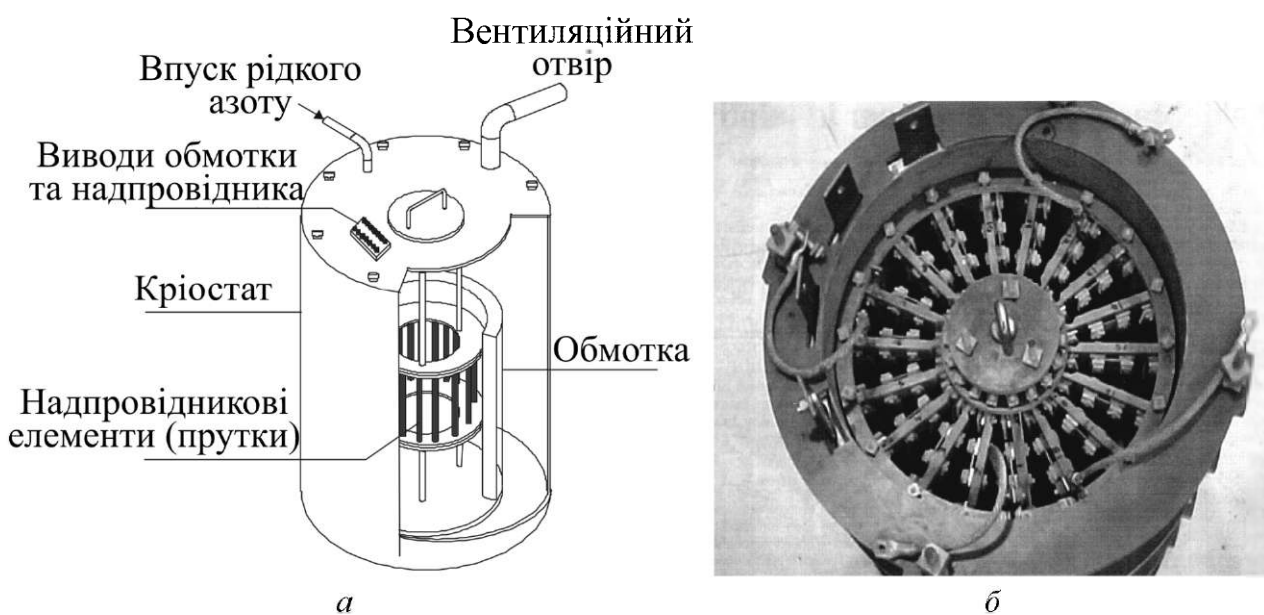


Рисунок 5.46 – Реактор резистивно-індуктивного типу виробництва *EA Technology*:
 а – конструктивна схема; б – внутрішня частина з надпровідними елементами, розміщеними на ізолюючій основі, та котушкою

Розвиток ВТНП технології, який обумовив до істотне поліпшення властивостей ВТНП кераміки Bi-2212 , і поява ВТНП проводів 2-го покоління, а також ВТНП плівок на основі ітрію (YBCO), спрощує реалізацію простої у схемному плані, але такої складної у плані ВТНП технології, резистивно-індуктивну схему ВТНПОС. Як вже відзначалося вище, обмеження струму КЗ відбувається за рахунок різкого зростання активного опору ВТНПОС. На відміну від інших схем ВТНПОС, резистивний ВТНПОС може працювати і в мережах постійного струму.

Аналогічна схема НПОС досліджувалась і японськими науковцями. Ця схема дозволяла регулювати кількість витків у котушці намагнічування, що надавало можливість змінювати рівень впливу магнітного поля на резистивний ВТНП елемент для здійснення його переходу у нормальний стан [261].

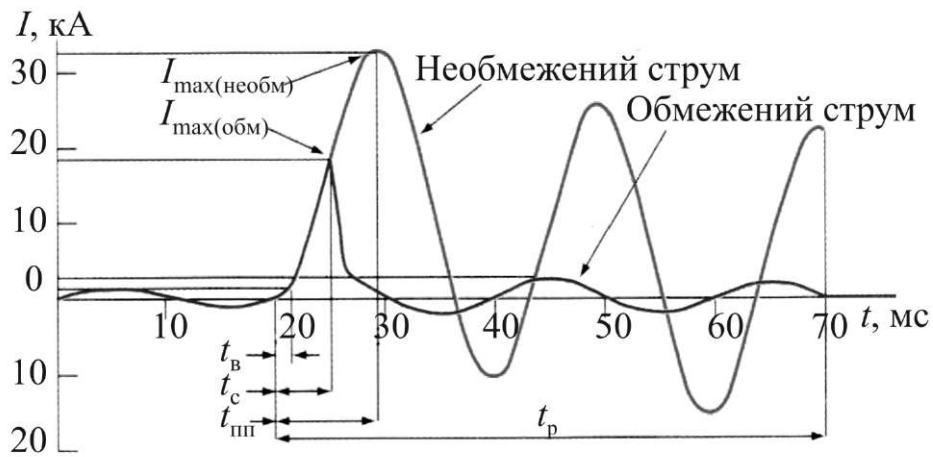


Рисунок 5.47 – Струмообмежувальна характеристика ВТНПОС (EA Technology):
 t_B – час визначення; t_C – час спрацювання; t_{III} – час до першого піку;
 t_p – час до розриву кола

5.4. Надпровідний обмежувач струму випрямного типу

З появою наприкінці 90-х років ВТНП проводів 1-го покоління стало можливим виготовлення ВТНП котушок індуктивності, і як наслідок – створення ВТНПОС випрямного типу. У цьому випадку ВТНПОС являє собою діодний міст, у діагональ якого включена надпровідна котушка індуктивності (рис. 5.48). Таким чином, швидкість зростання струму в контурі, що захищається, обмежена індуктивністю, за рахунок чого досягається певне обмеження ударного струму КЗ. Такий тип обмежувача більшою мірою не стільки обмежує струм, скільки сповільнює швидкість його зростання, що дозволяє полегшити наступне і обов'язкове спрацювання звичайних розмикачів. Слід зазначити, що перше згадування НПОС випрямного типу з'являється наприкінці 60-х років ХХ ст., однак через проблеми із криогенним забезпеченням на гелієвому рівні температур і надпровідниковою технологією дослідження тоді обмежилися лише малогабаритними лабораторними зразками [219].

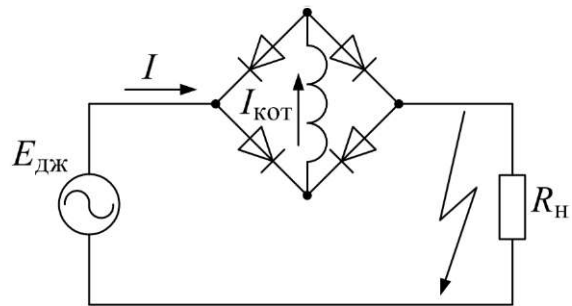


Рисунок 5.48 – Принципова схема ВТНПОС випрямного типу

У цей час роботи зі створення ВТНПОС випрямного або індуктивно-електронного типу активно проводяться у США і Японії.

Робота над довгостроковим проектом зі створення ВТНПОС випрямного типу почалася у США в 1993 р. під керівництвом компанії *General Atomics* разом з *Intermagnetics General Corporation (IGC)*, *SCE* та Лос-Аламоською Національною Лабораторією *LANL*. Підтримку у фінансуванні проекту крім Мініс-

терства Енергетики США надали також *California Energy Commission (CEC)* і *Electric Power Research Institute (EPRI)*.

Відповідно до першого етапу проекту в 1995 р. був виготовлений однофазний реактор з діючим значенням напруги 2,4 кВ; він був продемонстрований в *SCE* у м. Норфолк (Каліфорнія). При нормальній роботі змінний струм навантаження безперешкодно проходить крізь спеціально призначену мостову схему (рис. 5.49) [262].

Під час короткого замикання ВТНП котушка послідовно з'єднується з енергосистемою, що збільшує повний опір системи і обмежує, таким чином, струм короткого замикання до заданого значення. Якщо є необхідність, то контрольовані комп'ютером тиристори можуть дуже

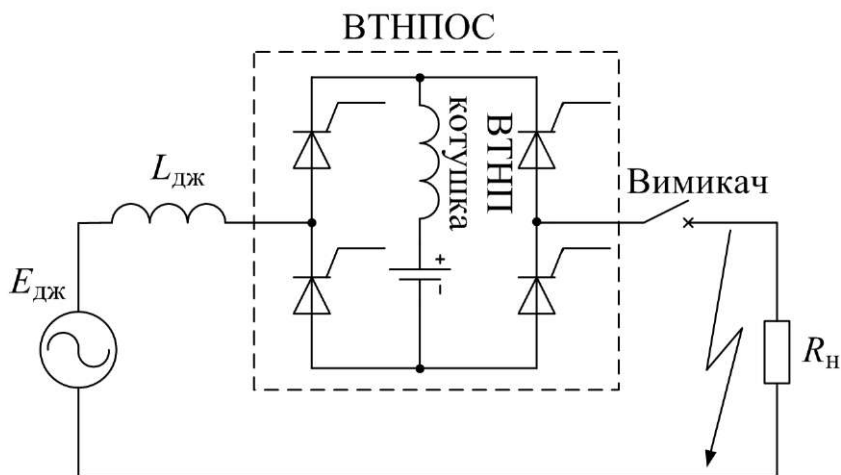


Рисунок 5.49 – Принципова схема ВТНПОС випрямного типу (*General Atomics*):

$E_{дж}$ – ЕРС джерела; $L_{дж}$ – індуктивність джерела

швидко повністю припинити проходження струму в колі. Тому пристрій служить також в якості швидкого переривника струму. Таким чином, це є індуктивно-електронний обмежувач струму короткого замикання з широкими можливостями використання.

Надалі було розпочато роботу над іншим етапом проекту, призначення якого – розроблення трифазного напівпромислового ВТНПОС короткого замикання випрямного типу на напругу 15 кВ. У 1999 р. у США співдружністю компаній *General Atomics* і *IGC* разом із *LANL* був розроблений та виготовлений демонстраційний зразок трифазного ВТНПОС потужністю 20 МВА. Струмообмежувач на напругу 15 кВ, розміщений на трейлері довжиною 12 м, був установлений в енергосистемі Південної Каліфорнії. Були проведені випробування апарата на напруги до 12,5 кВ. Кожна фаза ВТНПОС розміщувалась в окремому боксі трейлера, включаючи також 200-кіловатний повітряно-масляний радіатор для охолодження електронної системи, власне заземлення та 9 компресорів для рефрижераторів, установлених в передній і задній частинах трейлера (рис. 5.50, а) [263].



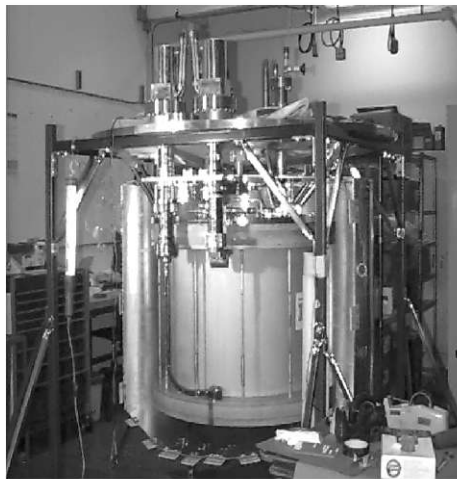
a



б

Рисунок 5.50 – ВТНПОС випрямного типу потужністю 20 МВА:
a – ВТНПОС, розміщений на трейлері (1999 р.);
б – ВТНПОС в енергосистемі Каліфорнії у м. Норфолк (2000 р.)

Трифазний ВТНПОС складається з криомагнітної системи – із трьох над-провідних котушок (діаметром 1 м, довжиною 0,75 м і вагою 680 кг) та системи криоохолодження (рис. 5.51, *б*). Кожна котушка виготовлена з Ві-2223 над-провідного проводу довжиною 15 км і охолоджується дев'ятьма криокулерами. Проектні та робочі параметри котушки для ВТНПОС наведені в табл. 5.11. ВТНП котушки були виготовлені корпорацією *IGC* [263] (рис. 5.51, *a*).



a



б

Рисунок 5.51 – Криостат з ВТНП котушкою (*a*); електронна підсистема (*б*)

Кожна ВТНП котушка охолоджується газом гелію за допомогою рефрижератора *Cryomech AL-125* з чотирма спеціально спроектованими радіаторами. Система охолодження котушки включає також два додаткових рефрижератори *Cryomech AL-200* для охолодження теплового екрана та струмоводів. Для мінімізації теплоприпливів у криостат використовуються ВТНП струмоводи, а задля зменшення вихрових струмів використовується теплий сегментований екран. Котушки не переходять у нормальний стан при короткому замиканні. Потужна електронна підсистема включає 96 тиристорів (рис. 5.51, *б*) і пов'язана з охолодженням і контролем. Цей реактор являє собою з'єднання останніх досягнень у ВТНП магнітах і електронних енергетичних технологіях. Він пройшов поперед-

не випробування в *SCE* у 1999 р. Надалі в *LANL* заплановане удосконалення НПОС і його безперервне тестування.

Таблиця 5.11 – Параметри ВТНП котушки (*General Atomics*)

Параметр	Значення
Постійний струм, А	2037
Змінний струм, кА	16 (120 Гц)
Імпульси змінного струму, кА	9 (протягом 15 мс); 4 (протягом 1 с)
Номінальна напруга, кВ	12,47
Номінальна температура, К	40
Індуктивність, мГн	4

Тривалість короткого замикання при використанні ВТНПОС випрямного типу суворо лімітована. У випадку відмови вимикача, що розташований після ВТНПОС, відбувається або перегорання ВТНП котушки, або руйнування перетворювального агрегату – що і відбулося в 2001 р. з описаним вище струмообмежувачем. У табл. 5.12 наведені параметри для реакторів на 2,4 кВ і для реактора на 15 кВ, які були виготовлені у 1999 р. [263].

Таблиця 5.12 – Порівняння реакторів компанії *General Atomics* першого і другого етапів (2,4–15 кВ)

Параметр	Реактор першого етапу (проеКТОВАНІ параметри)	Реактор першого етапу (отримані результати)	Реактор другого етапу
Робоча напруга, кВ	2,4	2,38	12...17
Робочий струм, А	80	100	1200
Максимальний виникаючий струм КЗ, кА	2,2	3,03	20
Обмежений струм КЗ, кА	1,1	1,79	4,0
Зниження струму, %	50	41	80
Здатність відновлення роботи реактора	Два КЗ (400 мс) протягом 15 с	Два КЗ (400 мс) протягом 0,8 с	Два КЗ (1 с) протягом 15 с
Електрична міцність ізоляції, кВ	30	30	110
Припустимий рівень зовнішньої температури, С	Не визначено	25/35	-40/50

У 2005 р. у Японії пройшли попередні випробування однофазного високовольтного (66 кВ) ВТНПОС потужністю 10 МВА. Випробування здійснювали при зниженій до 20 кВ напрузі. Було досягнуто прийнятне обмеження струму КЗ при повному заглишенні ударного струму, роботи над цим ВТНПОС тривають.

У Китаї із серпня 2005 р. випробовується на діючій підстанції ВТНПОС випрямного типу, який має пристрій на основі *IGBT* транзисторів. У момент ко-

роткого замикання він вмикає в електричне коло додатковий активний опір [219].

Варто звернути увагу на вкрай високу вартість ВТНПОС випрямного типу і специфічну сферу їхнього застосування в майбутньому. Наведені ВТНПОС не є самостійними пристроями, їх варто розглядати як складові вузли перетворювальних агрегатів для вставок постійного струму або ліній електропередачі *FACTS*, а надпровідні котушки в них є свого роду індуктивними накопичувачами енергії.

Керована система передачі змінного струму *FACTS* – це силова електронна система і супутнє устаткування, призначене для керування одним або декількома параметрами лінії електропередачі з метою збільшення її надійності і пропускної здатності. Устаткування *FACTS* може бути включене в мережу як послідовно, так і паралельно. При послідовному включенні технологія *FACTS*, як правило, звичайно використовується для компенсації індуктивного опору лінії електропередачі. Паралельне включення апаратури *FACTS* здатне поліпшити коефіцієнт потужності у випадку ємнісного навантаження і уникнути перенапруг для індуктивного навантаження.

Висока активність робот у США і Японії зі створення ВТНПОС цього типу пов'язана з національною специфікою енергосистем: у США для збільшення пропускної здатності ліній електропередачі активно впроваджується технологія *FACTS*, а енергосистема в Японії разупорядкована, тому, наприклад, мережі із частотою 50 Гц з'єднуються вставками постійного струму з мережами 60 Гц.

Таким чином можна зробити висновок, що основна перевага ВТНП струмообмежувача полягає в його можливості 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 у мережах високої напруги з метою координації струмів КЗ з вимикаючою здатністю комутаційної апаратури. Розглянуті приклади доводять, що струмообмежувач є багатофункціональним пристроєм. Використання ВТНП струмообмежувачів в електросистемі дозволить подовжити термін служби комутаційної апаратури і створить умови для її поступової заміни сучасним устаткуванням без перебудови. Але поряд з перевагами використання ВТНПОС постає низка технологічних та конструктивних питань, вирішення яких забезпечить промислове впровадження даного приладу. Тому є потреба проведення подальших теоретичних і експериментально-дослідних робіт для розроблення ВТНП струмообмежувача, прийняттого до виготовлення і використання в діючих мережах електропостачання.

Перелік умовних скорочень

Україномовні скорочення

БРН	блок розподілу навантажень
в.о.	відносні одпниці
ВАТ	Відкрите акціонерне товариство
ВАХ	вольт-амперна характеристика
ВМС	Військово-морські сили
ВНДІ	Всеросійський науково-дослідний інститут
ВНДІЕ	Всесоюзний науково-дослідний інститут електроенергетики
ВНДІКП	Всеросійський науково-дослідний інститут кабельної промисловості
ВНДІНМ	Всеросійський науково-дослідний інститут неорганічних матеріалів (ім. Академіка А. А. Бочвара)
ВТНП	високотемпературний надпровідник
ВТНПОС	високотемпературний надпровідний обмежувач струму
ДНЦ	Державний науковий центр
ДСК	динамічний синхронний компенсатор
ЕМ	електрична машина
ІЕЕ РАН	Інститут електрофізики і електроенергетики Російської академії наук
к.с.	кінська сила
КЗ	коротке замикання
ККД	коефіцієнт корисної дії
ЛЕП	лінія електропередач
МАІ	Московський авіаційний інститут (Росія)
МЕІ	Московський енергетичний інститут (Росія)
МНПОС	матричний надпровідний обмежувач струму
МРС	магніторушійна сила
НАН	Національна академія наук
НДІ	Науково-дослідний інститут
НП	надпровідний
НПДСК	надпровідний динамічний синхронний компенсатор
НПОС	надпровідний обмежувач струму
НТНП	низькотемпературний надпровідник
НТЦ-Е	Науково-технічний центр електроенергетики (Росія)

НДІЕФА	Науково-дослідний інститут електрофізичної апаратури ім. Д.Ф. Єфремова (Росія)
ОСКЗ	обмежувач струму короткого замикання
РЗМ	рідкоземельні матеріали
РНЦ	Російський науковий центр
СКБ	спеціальне конструкторське бюро
ФТІНТ	Фізико-технічний інститут низьких температур (Харків, Україна)

Іноземні скорочення

<i>1G</i>	<i>First Generation</i> (1-е покоління ВТНП – на основі сполуки $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{CuO}_{10}$)
<i>2G</i>	<i>Second Generation</i> (2-е покоління ВТНП – на основі сполуки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)
<i>ACCI</i>	<i>Accelerated Coated Conductor Initiative</i> (Програма „Ініціатива прискореного освоєння покритих (плівкових) проводів”)
<i>AEIC</i>	<i>Association of Edison Illuminating Companies</i> (Асоціація освітлювальних компаній Едісона, США)
<i>AFRL</i>	<i>Air Force Research Lab.</i> (Дослідницька лабораторія військово-повітряних сил, США)
<i>AMSC</i>	<i>American Superconductor</i> , (Американський надпровідник, США)
<i>ANL</i>	<i>Argonne National Laboratory</i> (Аргонська Національна Лабораторія, США)
<i>BOC</i>	<i>British Oxygen Company Ltd</i> , Великобританія
<i>BSCCO</i>	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{CuO}_{10}$ – <i>Bismuth strontium calcium cooper oxide</i> (вісмут-стронцій-кальцієвий купрат)
<i>CAPS</i>	<i>Center for Advanced Power Systems</i> (Центр прогресивних енергосистем, США, Флорида)
<i>CAST</i>	<i>Center for Applied Superconductivity Technology</i> (Центр прикладних надпровідних технологій, Південна Корея)
<i>CEC</i>	<i>California Energy Commission</i> , (Каліфорнійська комісія з питань енергетики, США)
<i>Chubu</i>	<i>Chubu Electric Power Co.</i> , (Електроенергетична компанія Чубу, Японія)

<i>CR</i>	<i>Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano Ricerca</i> (Італійський дослідницький центр)
<i>CRIEPI</i>	<i>Central Research Institute of Electric Power Industry</i> (Центральний дослідницький інститут електроенергетики, Японія)
<i>CT-OP</i>	<i>ConTrolled-Over Pressure</i> (синтез, що керується високим тиском)
<i>DAPAS</i>	<i>Development of the Advanced Power System by Applied Superconductivity Technologies</i> (Розвиток передових електроенергетичних систем у галузі прикладної надпровідності, Південна Корея)
<i>DARPA</i>	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i> (Агентство з перспективних оборонних дослідницьких проєктів, США)
<i>DHS</i>	<i>Department of Homeland Security</i> (Міністерство національної безпеки, США)
<i>DI-BSCCO</i>	<i>Drastically Innovative BSCCO</i> (радикально оновлений BSCCO)
<i>DoD</i>	<i>Department of Defense</i> (Міністерство оборони, США)
<i>DoE</i>	<i>Department of Energy</i> (Міністерство енергетики, США)
<i>EHTS</i>	<i>European High Temperature Superconductors GmbH</i> (Європейські високотемпературні надпровідники, Німеччина)
<i>EPRI</i>	<i>Electric Power Research Institute</i> (Дослідницький електроенергетичний інститут, США)
<i>FACTS</i>	<i>Flexible alternating current transmission system</i> (керована система передачі змінного струму)
<i>FCL</i>	<i>flux collector</i> (акумулятор магнітного потоку)
<i>Fuji</i>	<i>Fuji Electric Systems Corp.</i> (Електричні системи Фуджі, Японія)
<i>GA</i>	<i>General Atomics</i> (Дженерал Атомікс, США)
<i>GmbH</i>	<i>Gesellschaft mit beschränkter Haftung</i> (Товариство з обмеженою відповідальністю)
<i>GFRP</i>	<i>glass fiber reinforced plastic</i> (пластик, посилений скловолокном)
<i>HTSC</i>	<i>high-temperature superconductor</i> (високотемпературний надпровідник – ВТНП)

<i>IBAD</i>	<i>Ion Beam Assisted Deposition</i> (іонно-променеве осадження)
<i>IGC</i>	<i>Intermagnetics General Corporation</i> (Корпорація Інтермагнетікс, США)
<i>IHEP</i>	<i>Institute for High Energy Physics</i> (Інститут фізики високих енергій, Росія, Протвіно)
<i>InnoST</i>	<i>Innova Superconductor Technology Co.</i> (Надпровідні технології, Китай)
<i>ISD</i>	<i>Inclined Substrate Deposition</i> (осадження на підложку, розташовану під кутом до напрямку осадження)
<i>ISTEC-SRL</i>	<i>International Superconductivity Technology Center Superconductivity Research Laboratory</i> (Міжнародний центр надпровідникових технологій – лабораторія досліджень з надпровідності, Японія)
J_c	густина критичного струму
<i>KAIST</i>	<i>Korea Advanced Institute of Science and Technology</i> (Корейський інститут науки і новітніх технологій)
<i>KEPRI</i>	<i>Korean Electric Power Research Institute</i> (Корейський науково-дослідний інститут електроенергетики)
<i>KERI</i>	<i>Korea Electrotechnology Research Institute</i> (Корейський електротехнологічний дослідницький інститут)
<i>KIMM</i>	<i>Korea Institute of Machinery and Materials</i> (Корейський інститут матеріалів та обладнання)
<i>KPU</i>	<i>Korea Polytechnic University</i> (Корейський політехнічний університет)
<i>LANL</i>	<i>Los-Alamos National Laboratory</i> (Лос-Аламоська Національна Лабораторія, США)
<i>LTSC</i>	<i>low-temperature superconductor</i> (низькотемпературний надпровідник – НТНП)
LH_2	<i>liquid hydrogen</i> (рідкий водень)
LN_2	<i>liquid nitrogen</i> (рідкий азот)
<i>METI</i>	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i> (Міністерство економіки, торгівлі та промисловості, Японія)
<i>MIT</i>	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> (Масачусетський технологічний інститут, США)
<i>MITI</i>	<i>Ministry of International Trade and Industry</i> (Міністерство зовнішньої торгівлі та промисловості, Японія)

<i>MOCIE</i>	<i>Ministry of Commerce, Industry and Energy</i> (Міністерство торгівлі, промисловості та енергетики, Південна Корея)
<i>MOCVD</i>	<i>Metal organic chemical vapor deposition</i> (хімічне осадження з парів металоорганічних сполук)
<i>MOD</i>	<i>Metal organic deposition</i> (осадження металоорганічних сполук з реакцією в рідкій фазі)
<i>MOST</i>	<i>Ministry of Science and Technology</i> (Міністерство науки і технологій, Південна Корея)
<i>NASA</i>	<i>US National Aeronautics and Space Administration</i> (Національне агентство з авіації та дослідження космічного простору, США)
<i>NEDO</i>	<i>New Energy and Industrial Technology Development Organization</i> (Організація розвитку нових промислових технологій та джерел енергії, Японія)
<i>NIH</i>	<i>National Institute of Health</i> (Національний інститут здоров'я, США)
<i>NHMI'L</i>	<i>National high magnetic field laboratory</i> (Національна лабораторія високих магнітних полів, США)
<i>NKT</i>	<i>Nordiske Kabel og Traadfabriker</i> , (Північний кабельний завод, Данія)
<i>NRL</i>	<i>Navy Research Laboratory</i> (Дослідницька лабораторія ВМС, США)
<i>NYSERDA</i>	<i>New York State Energy Research and Development Authority</i> (Адміністрація досліджень та розвитку електроенергетики штату Нью-Йорк, США)
<i>ONR</i>	<i>Office of Naval Research</i> (Управління морських досліджень, США)
<i>ORNL</i>	<i>Oak-Ridge National Laboratory</i> (Окриджська національна лабораторія, США)
<i>PIT</i> –технологія	<i>powder-in-tube</i> („порошок-у-трубі”)
<i>PLD</i>	<i>Pulse Laser Deposition</i> (імпульсне лазерне осадження)
<i>PPLP</i>	<i>Polypropylene Laminated Paper</i> (поліпропіленова плівка, імпрегнована рідким азотом)
<i>RABiTS</i>	<i>Rolling assisted biaxially textured substrate</i> (біаксіальне текстування підложки спеціальною прокаткою)
<i>SCE</i>	<i>Southern California Edison</i> (Електроенергетична компанія у Південній Каліфорнії, США)

<i>SECRI</i>	<i>Shanghai Electric Cable Research Institute</i> (Шанхайський дослідницький інститут електричних кабелів, Китай)
<i>SNU</i>	<i>Seoul National University</i> (Національний університет у Сеулі, Південна Корея)
<i>SPI</i>	<i>Superconductivity Partner Initiative</i> (Програма „Партнерська ініціатива в галузі надпровідності”)
<i>SRL</i>	<i>Superconductor Research Lab.</i> (Лабораторія досліджень з надпровідності, Японія)
<i>Super-GM</i>	<i>Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials</i> (Асоціація технічних досліджень НП обладнання і матеріалів, Японія)
<i>Super-ACE</i>	Проект „ <i>Research & Development on fundamental technologies for superconducting alternating current power equipment</i> ” („Дослідження та розвиток фундаментальних технологій надпровідного електроенергетичного устаткування змінного струму”, Японія)
<i>TBEA</i>	<i>Tebian Electric Apparatus Stock Co., Ltd</i> (Тебійські електричні апарати, Китай)
<i>TEPCO</i>	<i>Tokyo Electric Power Company</i> (Токійська електроенергетична компанія, Японія)
<i>TFA</i>	<i>trifluoroacetate</i> (трифторацетат)
<i>TVA</i>	<i>Tennessee Valley Authority</i> (Електроенергетична компанія у Теннессі, США)
<i>WES</i>	<i>Waukesha Electric Systems</i> , США
YBaCuO , YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ – ітрієво-барієвий окис міді
<i>YSZ</i>	<i>Yttrium Stabilized Zirconia</i> (стабілізований ітрієм окис цирконію)
<i>YU</i>	<i>Yonsei University</i> (Університет Йонсей, Південна Корея)

Список літератури

1. Иванов-Смоленский А.В. Перспективы развития электромеханики в XXI веке / А.В. Иванов-Смоленский, И.П. Копылов, Е.М. Лопухина // Электротехника. – 2000. – № 8. – С. 1–4.
2. Черноплеков Н.А. Сверхпроводниковые технологии: современное состояние и перспективы промышленного применения / Н.А. Черноплеков // Вестник Российской академии наук. – 2001. – Т. 71; №4. – С. 303–319.
3. Power applications of superconductivity in Japan and Germany: Panel Report (final) /Larbalestier David, Richard D. Blaugher, Robert E. Schwall, et al. // WTEC & International Technology Research Institute at Loyola College.; NTIS PB98-103161; NSF-ENG-9416970. – Maryland (USA), 1997. – 173 p. – ISBN 1-883712-46-7.
4. Rosner C.H. Superconductivity: Star Technology for the 21st Century / C.H. Rosner // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 39–48.
5. Данько В.Г. Стан і перспективи надпровідникових пристроїв / В.Г Данько, В.Ф. Болух // Новини енергетики. – 1999. – №12. – С. 45–50.
6. Никулин А.Д. ВТСП-проводники: от исследования к применению: XVI совещание по ускорителям заряженных частиц, 20 – 22 октября, 1998 г.: тезисы докл. / А.Д. Никулин, А.К. Шиков, И.И. Акимов // ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий. – Протвино, 1998. – С.13–19.
7. Самойленков С.В. Генераторы переменного тока на сверхпроводниках / С.В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3, № 1. – С. 4–9.
8. The development of second generation HTS wire at American Superconductor / Xiaoping Li, Martin W. Rupich, Cornelis L. H. Thieme, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 3231–3235.
9. Самойленков С.В. ВТСП провода и кабели 2G. Последние новости 2006 / С.В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3; № 3. – С. 1–4.
10. Самойленков С.В. Технология ВТСП второго поколения: различные пути к одной цели / С.В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 4. – С. 1–3.
11. Teranishi R. Highlights of coated conductor development in Japan / R. Teranishi, T. Izumi, Y. Shiohara // Supercond. Sci. Technol. – 2006. – Vol. 19, № 3. – P. 4–12.
12. Goyal A. Status of HTS conductor R&D and manufacturing in S. Korea and

China [*Электронный ресурс*]: 2007 Wire Development Workshop, January 16-17, 2007.: report / Goyal A. // U.S. Department of Energy. – Florida, Panama City, 2007. – Режим доступа: <http://events.energetics.com/wire07/agenda.html>

13. Selvamanickam V. SuperPower's second generation HTS conductors: status & outlook [*Электронный ресурс*]: 2006 Wire Development Workshop, January 31-February 1, 2006.: report / V. Selvamanickam // U.S. Department of Energy. – Florida, St. Petersburg, 2006. – Режим доступа: <http://events.energetics.com/wire06/>

14. Fabrication of coated conductors by multiple-stage CVD / Kashima N., Niwa T., Mori M., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 2763–2766.

15. Rupich M. Performance and status of manufacturing scale up of 344 superconductors [*Электронный ресурс*]: 2007 Wire Development Workshop, January 16-17, 2007.: report / M. Rupich // U.S. Department of Energy. – Florida, Panama City, 2007. – Режим доступа:

<http://events.energetics.com/wire07/agenda.html>

16. Selvamanickam V. Scale up of coated conductor technology at SuperPower [*Электронный ресурс*]: Superconductivity for Electric Systems 2004 Annual Peer Review, July 27-29, 2004.: report / V. Selvamanickam, J. Reeves, D.E. Peterson // U.S. Department of Energy. – Washington, DC, 2004. – Режим доступа:

<http://www.htspeerreview.com/2004/>

17. Sumitomo Electric Industries (Япония). Традиции и инновации // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3; № 5. – С. 5–8.

18. Bhattacharjee Pinaki P. Nickel base substrate tapes for coated superconductor applications / Pinaki P. Bhattacharjee, Ranjit Kumar Ray, Anish Upadhyaya // Journal of Materials Science. – 2007. – Vol. 42, № 6. – P. 1984–2001.

19. Nickel base substrate tapes for coated superconductor applications / C. Cantoni, D.K. Christen, M. Varela, et al. // Journal of Materials Research. – 2003. – Vol. 18, № 10. – P. 2387–2400.

20. Самойленков С.В. Медь как материал текстурированной ленты-подложки / С.В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. . – 2006. – Т. 6; № 2. – С. 3–4.

21. Fabrication of $YBa_2Cu_3O_7$ thin film on eube-textured Cu tape / Makoto Tokudome, Toshiya Doi, Ryota Tomiyasu, et al. // Journal Applied Physics. – 2008. – Vol. 104, № 10. – 6 p.

22. Electrical and magnetic properties of conductive Cu-based coated conductors / T. Aytug, M. Paranthaman, J.R. Thompson, et al. // Applied Physics Letters. – 2003.

– Vol. 83, № 10. – P. 3963–3965.

23. High- J_c $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coatings on LaMnO_3 -buffered biaxially textured Cu tapes for coated conductor applications / T. Aytug, A. Goyal, N. Rutter, et al. // *Journal of Materials Research*. – 2003. – Vol. 18, № 4. – P. 872–877.

24. Elongated grains in textured substrate tapes and their effect on transport currents in superconductor layers / J. Eickemeyer, D. Selbmann, R. Hühne, et al. // *Applied Physics Letters* – 2007. – Vol. 90, № 10.

25. Шавкин С.В. Перспективы снижения стоимости ВТСП проводов второго поколения / С.В. Шавкин // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2009. – Т. 6; № 2. – С. 1–3.

26. Selvamanickam V. Progress in scale up of 2G conductor at SuperPower [*Электронный ресурс*]: Superconductivity for Electric Systems 2007 Annual Peer Review, August 7-9, 2007.: report / Venkat Selvamanickam, Yi-Yuan Xie, Jodi Reeves // U.S. Department of Energy. – Arlington, Virginia, 2007. – Режим доступа: <http://www.htspeerreview.com/2007/agenda.html>

27. Самойленков С.В. ВТСП материалы 2-го поколения. YBCO vs. RBCO / С.В. Самойленков // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2008. – Т. 5; № 4. – С. 3–6.

28. Статус работ по ВТСП 2-го поколения в мире на февраль 2007 года // *Сверхпроводники для электроэнергетики: инф. бюл.* – 2007. – Т. 4, № 2. – С. 9.

29. Самойленков С.В. Разработки 2G ВТСП в Японии, 2008 год / С.В. Самойленков // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2008. – Т. 5; № 6. – С. 3–6.

30. Yamada Y. Global Progress in HTS, Japan Update [*Электронный ресурс*]: High Temperature Superconductivity Program Peer Review, July 29-31, 2008.: report / Y. Yamada // U.S. Department of Energy. – Arlington, Virginia, 2008. – Режим доступа: <http://www.htspeerreview.com/2008/agenda.html>

31. Самойленков С.В. Перспективы европейской сверхпроводимости / С.В. Самойленков // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2009. – Т. 6; № 3. – С. 5–6.

32. A Round Table Discussion on MgB_2 Toward a Wide Market or a Niche Production? – A Summary / Iwasa Y., Larbalestier D.C., Okada M., et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2006. – Vol. 16, № 1. – P. 1457–1464.

33. Самойленков С.В. Диборид магния. Технологические аспекты / С.В. Самойленков // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2006.

– Т. 3; № 6. – С. 5–8.

34. Progress in the deposition of MgB_2 thin films / Xiaoxing Xi, A.V. Pogrebnyakov, X.H. Zeng, et al. // *Superconductors Science and Technology*. – 2004. – Vol. 17, № 5. – P. 196–201.

35. In situ epitaxial MgB_2 thin films for superconducting electronics / Xianghui Zeng, Alexej V. Pogrebnyakov, Armen Kotcharov, et al. // *Nature Materials*. – 2002. – Vol. 1, № 1. – P. 35–38.

36. Thick polycrystalline MgB_2 film on Cu substrate by hybrid physical–chemical vapour deposition / Fen Li, Tao Guo, Kaicheng Zhang, et al. // *Superconductors Science and Technology*. – 2006. – Vol. 19, № 11. – P. 1196–1199.

37. A round table discussion on MgB_2 toward a wide market or a niche production? – A summary / Yukikazu Isawa, David C. Larbalestier, Michiya Okada, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2006. – Vol. 16, № 2. – P. 1457–1464.

38. Hyper Tech Research, Inc. (США) – лидер в разработке MgB_2 проводов // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2006. – Т.3; № 6. – С.1–5.

39. Columbus Superconductors Spa – производитель MgB_2 проводов в Италии // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2006. – Т. 3; № 6. – С. 5.

40. A 0.6 T/650 mm RT Bore solid nitrogen cooled MgB_2 demonstration coil for MRI – a status report / Juan Bascunan, Haiguan Lee, Emmanuel S Bobrov, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2006. – Vol. 16, № 2. – P. 1427–1430.

41. High critical current density multifilamentary MgB_2 strands / Michael D. Sumption, Michael A. Susner, Mohit Bhatia, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2838–2841.

42. Behavior of MgB_2 reacted and wound coils from 14 K to 32 K in a cryogen free apparatus / Marco Modica, Giovanni Grasso, Michela Greco, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2006. – Vol. 16, № 2. – P. 1449–1452.

43. Critical currents in magnetically pressed MgB_2 rods / S.P. Anan'ev, V.A. Grinenko, V.E. Keilin, et al. // *Superconductors Science and Technology*. – 2004. – Vol. 17, № 5. – P. 274–275.

44. Garwin R.L. Superconducting lines for the transmission of large amounts of electrical power over great distances / R.L. Garwin, J. Matisoo // *Proceedings of the IEEE*. – 1967. – Vol. 55, № 4. – P. 538–548.

45. Поспелов Г.Е. Технико-экономическое обоснование эффективности применения криогенных и нормальных линий электропередачи / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, Ю.В. Белянчев // *Сверхпроводимость: Тр. конференции по техническому использованию сверхпроводимости.* – М.: Атомиздат, 1977. – Т. 3: Сверхпроводящие электрические машины и линии электропередач. – С. 111–118.

46. Форсиз Э.Б. Брукхейвенская программа разработки линий электропередач с гелиевым охлаждением / Э.Б. Форсиз // *Сверхпроводимость: Тр. конференции по техническому использованию сверхпроводимости.* – М.: Атомиздат, 1977. – Т. 3: Сверхпроводящие электрические машины и линии электропередач. – С. 125–152.

47. Конструкция сверхпроводящих кабелей для постоянного и переменного тока / И. Киршнер, Й. Банкути, Л. Ласлоффи и др. // *Сверхпроводимость. Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости.* – М.: „Атомиздат”, 1977. – Т. 3: Сверхпроводящие электрические машины и линии электропередач. – С. 153-156.

48. Hassenzahl W.V. Superconductivity, an enabling technology for 21st century power systems / W.V. Hassenzahl // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 1447–1453.

49. Hassenzahl W.V. More applications of superconductivity to electric power systems / W.V. Hassenzahl // *IEEE Power Engineering Review.* – 2000. – Vol. 20, № 6. – P. 4–6.

50. Сверхпроводящие машины и устройства [текст]: пер. с англ. / ред. пер. Е.Ю. Клименко; ред.: С. Фонер, Б. Шварц. – М.: Мир, 1977. – 763 с.

51. Grant P.M. Energy for the city of the future / Paul M. Grant // *The Industrial Physicist.* – 2002. – Vol. 8, № 22. – P. 22–25.

52. Grant P.M. The SuperCable: Dual Delivery of Hydrogen and Electric Power / Paul M. Grant // *Power Systems Conference and Exposition, 10-13 October 2004 / IEEE PES.* – New York, 2004. – Vol. 3. – P. 1745–1749.

53. Grant P.M. The SuperCable: Dual Delivery of Chemical and Electrical Power / Paul M. Grant // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* – 2005. – Vol. 15. – P. 1810–1813.

54. Grant P.M. Will MgB₂ Work / Paul M. Grant // *The Industrial Physicist.* – 2001. – Vol. 7, № 5. – P. 22–23.

55. Trevisani L. Long distance renewable-energy-sources power transmission using hydrogen-cooled MgB₂ superconducting line / L. Trevisani, M. Fabbri,

F. Negrini // *Cryogenics*. – 2007. – Vol. 47, Issue 2. – P. 113–120.

56. Смаев М.П. Сверхпроводниковые кабели как трубопроводы для энергоносителей / М.П. Смаев // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2007. – Т. 4; № 4. – С. 8–9.

57. Высоцкий В.С. Крупнейшие ВТСП кабели / В.С. Высоцкий // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2007. – Т. 4; № 3. – С. 7–8.

58. Demonstration of a 500 m HTS Power Cable in the Super-ACE Project / M Yagi, S. Mukoyama, M. Ichikawa, et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 7th European Conference on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 43, P. 849–852.

59. Kimura A. R & D of superconductive cable in Japan / A. Kimura, K. Yasuda // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1818–1822.

60. Demonstration and verification tests of 500 m long HTS Power Cable / T. Takahashi, H. Suzuki, M. Ichikawa, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1823–1826.

61. Measurement of AC losses in an HTS conductor by calorimetric method / M. Yagi, S. Tanaka, S. Mukoyama, et al. // *Physica C: Superconductivity*. – 2003. – Vol. 392–396, № 2. – P. 1124–1128.

62. Dielectric Properties of 500 m Long HTS Power Cable / T. Takahashi, H. Suzuki, M. Ichikawa, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1767 – 1770.

63. Experimental results of a 500 m HTS power cable field test / S. Mukoyama, M Yagi, M. Ichikawa, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1680 – 1683.

64. Thermomechanical characteristics of 500-m HTS Power Cable / M. Ichikawa, M. Kanegami, T. Okamoto, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1771 – 1774.

65. Development and demonstration of a long length HTS cable to operate in the Long Island Power Authority transmission grid / J.F. Maguire, F. Schmidt, F. Hamber, T.E. Welsh // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1787–1792.

66. Шавкин С.В. Сверхпроводниковая электротехника в США (2006–2007) / С.В. Шавкин, В.И. Щербаков // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2008. – Т. 5; № 1. – С. 4–6.

67. Чернышева А.К. ВТСП кабель несёт свет людям / А.К. Чернышева // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 4. – С. 6–8.

68. Development and Demonstration of a HTS Power Cable to Operate in the Long Island Power Authority Transmission Grid / J.F. Maguire, F. Schmidt, S. Bratt, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2034–2037.

69. Installation and Testing Results of Long Island Transmission Level HTS Cable / J.F. Maguire, F. Schmidt, S. Bratt, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1692–1697.

70. Design and experimental results for Albany HTS cable / T. Masuda, H. Yumura, M. Watanabe, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1806–1809.

71. Высоцкий В.С. Наши в Олбани / В.С. Высоцкий // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 3. – С. 6–7.

72. Шутова Д. Испытание 350 м ВТСП кабеля в электросети Олбани (шт. Нью-Йорк) / Д. Шутова // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 1. – С. 8–9.

73. Fabrication and installation results for Albany HTS Cable / Takato Masuda, Hiroyasu Yumura, M. Watanabe, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1648–1651.

74. Testing and demonstration results of the 350 m long HTS cable system installed in Albany, NY / C.S. Weber, R. Lee, S. Ringo, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2038–2042.

75. Phase II of the Albany HTS cable project / H. Yumura, Y. Ashibe, H. Itoh, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1698–1701.

76. Tests of tri-axial HTS cables / M.J. Gouge, D.T. Lindsay, J.A. Demko, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1827–1830.

77. Triaxial HTS Cable for the AEP Bixby Project / J.A. Demko, I. Sauers, D.R. James, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2047–2050.

78. Demko J.A. Cooling configuration design considerations for long-length HTS cables / J.A. Demko, R.C. Duckworth // IEEE Transactions on Applied Superconduc-

tivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1752–1755.

79. Самойленков С.В. ВТСП разработки в Германии / С.В. Самойленков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 2. – С. 5–7.

80. Щербаков В.И. Криогенное оборудование для сверхпроводниковых электротехнических устройств / В.И. Щербаков, В.В. Лобынцев // Сверхпроводники для электроэнергетики: инф. бюл. – 2008. – Т. 5, № 1. – С. 7–11.

81. Шутова Д.И. ВТСП технологии в Китае / Д.И. Шутова, А.Ю. Коваленко, И.Л. Иванова // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 6. – С. 1–3.

82. Xiao L., Lin L. Recent progress of power application of superconductor in China / Liye Xiao, Liangzhen Lin // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2355–2360.

83. Recent main events in applied superconductivity in China / Songtao Wu, Yu Wu, Yuntao Song, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1069–1080.

84. Новые контракты American Superconductor // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3; № 5. – С. 9–10.

85. The 5 m HTS power cable development and test / Victor E. Sytnikov, Vitaly S. Vysotsky, Alexander V. Rychagov, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1684–1687.

86. The AC losses analysis in the 5 m HTS power cables / Victor E. Sytnikov, Kirill A. Shutov, Nelly V. Polyakova, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1706–1709

87. Смаев М.П. Первый российский экспериментальный силовой ВТСП кабель доставлен на испытательный стенд / М.П. Смаев, В.И. Щербаков, В.С. Высоцкий // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 2. – С. 1–4.

88. 30 m HTS power cable development and witness sample test / Victor E. Sytnikov, Vitaly S. Vysotsky, Alexander V. Rychagov, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1702–1705.

89. The study of Mechanical properties of HTS tapes for power cable use / Victor E. Sytnikov, Irlama P. Radchenko, Kirill A. Shutov, Vitaly S. Vysotsky // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1770–1773.

90. Высоцкий В.С. Первый российский сверхпроводящий силовой кабель на

основе ВТСП успешно прошел испытания / В.С. Высоккий // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2009. – Т. 6; № 3. – С. 1–5.

91. Electric properties of a 66 kV 3-core superconducting power cable system / S. Honjo, M. Shimodate, Y. Takahashi, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 1952–1955.

92. A new HTS cable project in Japan / Takato Masuda, Hiroyasu Yumura, M. Ohya, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1735–1739.

93. The results of installation and preliminary test of 22.9 kV, 50 MVA, 100 m class HTS power cable system at KEPCO / S.H. Sohn, J.H. Lim, S.W. Yim, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2043–2046.

94. Performance test of 100 m HTS power cable system / J.H. Lim, S.H. Sohn, H.S. Ryoo, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1710–1713.

95. Long term performance test of KEPCO HTS power cable / Hyung Suk Yang, Dong Lak Kim, Song Ho Sohn, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1782–1784.

96. SuperPower Inc., (США) // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2004. – Т. 1; № 1. – С. 6–10.

97. Installation and operation of the Southwire 30-meter high-temperature superconducting power cable / J.P. Stovall, J.A. Demko, P.W. Fisher, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 2467–2472.

98. Щербаков В.И. Компания NKT планирует проложить в Амстердаме ВТСП кабель длиной 6 км / В.И. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 4. – С. 9.

99. HTS cables open the window for large-scale renewables / A. Geschiere, D. Willen, E. Piga, et al. // Journal of Physics: Conference Series. 8th European Conference on Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 97. – P. 12183.

100. Лобынцев В.В. Новые решения для распределительных сетей на основе ВТСП кабелей / В.В. Лобынцев // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 3. – С. 4–5.

101. Development and Demonstration of a Fault Current Limiting HTS Cable to be Installed in the Con Edison Grid / J. Maguire, D. Folts, Jie Yuan, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1740–1743.

102. Testing of 3-meter prototype Fault Current Limiting Cables / Michael J. Gouge, R.C. Duckworth, J.A. Demko, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1744–1747.
103. Barnes P.N. Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings / P.N. Barnes, M.D. Sumption, G.L. Rhoads // Cryogenics. – 2005. – Vol. 45, Issue 10–11. – P. 670–686.
104. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
105. Данько В.Г. Некоторые результаты разработок и модельных исследований криотурбогенераторов / В.Г. Данько // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – М.: – 1976. – № 6. – С. 3–10.
106. Электрическая машина с глубоким охлаждением: А.с. 262240 СССР. Данько В.Г., Кильдишев В.С., Кучинский В.П., Станиславский Л.Я. (СССР) Бюл. изобретений, открытий и тов. знаков, 1970. – №6.
107. К вопросу разработки криотурбогенератора со сверхпроводящим статором / Болюх В.Ф., Данько В.Г., Кожемякин С.М., Станкевич А.И. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – М.: – 1993. – № 2. – С. 69–75.
108. Сверхпроводниковая синхронная электрическая машина: А.с. 1671123 СССР, МКИ H02K 55/02 / В.Ф. Болюх, В.Г. Данько, С.М. Кожемякин и др. (СССР). – Заявл. 15.04.91.
109. Использование электромагнитных экранов из сверхпроводников в условиях вращающегося магнитного поля / Болюх В.Ф., Гаврилов Р.В., Данько В.Г. и др. – Х.: ФТИНТ АН УССР, 1990. – № 8. – 6 с.
110. Glebov I.A. High efficiency and low consumption material electrical generators / I.A. Glebov, V.N. Shaktarin // IEEE Transactions on Magnetics. – 1983. – Vol. 19, № 3. – P. 541–544.
111. Recent Progress on 70 MW Class Superconducting Generators Shimada / T., Shibuya M., Takahashi R. et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 1189–1192.
112. Cryogenic and Electrical Performance at a Factory Test of a Rotor for 70 MW Class Slow-Response Excitation Type Superconducting Generator / Shimohada K., Kodera I., Morita M., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 1213–1216.
113. Measurement and Analysis of 70 MW Superconducting Generator Constants / K. Ueda, R. Shiobara, M. Takahashi, T. Ageta // IEEE Transactions on Applied Su-

perconductivity. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 1193–1196.

114. 70 MW Class Superconducting Generator Test. / Yamaguchi K., Takahashi M., Shiobara R., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 1209–1212.

115. Данько В.Г. Перспективні розробки турбогенераторів з надпровідними обмотками / В.Г. Данько // Електротехніка і електромеханіка. – Х.: НТУ „ХП”. – 2004. – Вип. 4. – С. 17–20.

116. AC losses in a high temperature Superconducting Generator / Kiruba Sivasubramaniam, Xianrui Huang, David Ryan, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 2162–2165.

117. HTS-110 (H-T-S- one-ten), Новая Зеландия // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3; № 3. – С. 7–8.

118. Шутова Д.И. ВТСП и возобновляемые источники энергии / Д.И. Шутова // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 2. – С. 6.

119. Никонов А.А. AMSC и TECO-Westinghouse совместно разрабатывают мощные ВТСП синхронные генераторы для прибрежных ветряных электростанций / А.А. Никонов // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 1. – С. 6–7.

120. Лобынцев В.В. Сверхпроводниковые динамические синхронные компенсаторы / В.В. Лобынцев // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 2. – С. 7–8.

121. Discussion of test results of a superconductor synchronous condenser on a Utility grid / S.S. Kalsi, D. Madura, G. Snitchler, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2026–2029.

122. High-Temperature Superconducting Homopolar Inductor Alternator for Marine Applications / Kiruba Sivasubramaniam, E.T. Laskaris, M.R. Shah, et al. // IEEE Transaction On Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 18, № 1. – P. 1–6.

123. Шутова Д.И. General Electric разрабатывает униполярные электрические машины с ВТСП обмотками подмагничивания для использования на флоте / Д.И. Шутова // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5; № 3. – С. 1–2.

124. Rosner С.Н. Superconductivity: star technology for the 21st century / С.Н. Rosner // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 39–48.

125. Driscoll D. Development status of superconducting motors / Driscoll D., Dombrovski V., Zhang B.X. // IEEE Power Engineering Review. – 2000. – Vol. 20, № 5. – P. 12–15.

126. Status of the 1,000 hp HTS Motor Development / D. Aized, D.D. Gamble, F. Sidi-Yekhlef, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 1197–1200.

127. Щербаков В.И. ВТСП приводы и генераторы для нужд флота / В.И. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 3. – С. 8–10.

128. Okazaki T. Study on Application of HTS Drive System for Movable Bodies / Toru Okazaki // SEI Technical Review. – 2006. – № 62. – P. 24–28.

129. Industrial Applications of HTS Coils Using DI-BSCCO Wire / T. Okazaki, K. Ohkura, T. Kato, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 16, № 2. – P. 1088–1091.

130. Okazaki T. Industrial Application of HTSC Coils Using Next-Generation BSCCO Wire / Toru Okazaki, Kazuhiko Hayashi, Kenichi Sato // SEI Technical Review. – 2006. – № 61. – P. 24–28.

131. Development of Superconducting Coil for Ship Pod-Propulsion Motors / Koso Fujino, Toshihiro Hayashi, Takeshi Sanami, et al. // SEI Technical Review. – 2007. – № 65. – P. 41–45.

132. Development of an Axial Flux Type PM Synchronous Motor With the Liquid Nitrogen Cooled HTS Armature Winding / Hidehiko Sugimoto, Teppei Tsuda, Takaya Morishita, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1637–1640.

133. Design of an Axial Flux Inductor Type Synchronous Motor With the Liquid Nitrogen Cooled Field and Armature HTS Winding / Hidehiko Sugimoto, Teppei Tsuda, Takaya Morishita, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1571–1574.

134. Snitchler G. The performance of a 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor / Greg Snitchler, Bruce Gamble, Swarm S. Kalsi // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 2206–2209.

135. Jo Y.-S. 1st Phase Results and Future Plan of DAPAS Program / Y.-S. Jo, K.-S. Ryu, M. Park // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 16, № 2. – P. 678–682.

136. Ryu K.-S. Overview of the development of the advanced power system by

the applied superconductivity technologies programme in Korea / Kang-Sik Ryu, Young-Sik Jo, Minwon Park // *Supercond. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 19, № 3, P. 102–108.

137. Status of HTS Motor Development for Industrial Applications at KERY & DOOSAN / Y.K. Kwon, S.K. Baik, E.Y. Lee, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1587–1590.

138. Advances in and prospects for development of high-temperature superconductor rotating machines at Siemens / H.W. Neumuller, W. Nick, B. Wacker, et al. // *Supercond. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 19, № 3, P. 114–117.

139. High-Temperature Superconducting Rotating Machines for Ship Applications / Michael Frank, Peter van Haßelt, Peter Kummeth, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2006. – Vol. 16. №2. P.1465–1468.

140. Ковалев Л.К. Опыт создания электрических машин на основе массивных ВТСП элементов с азотным охлаждением / Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев, В.П. Фирсов, Б. Освальд // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2007. – Т. 4, № 6. – С. 1–4.

141. Многодисковый гистерезисный электродвигатель на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников / Л.К. Ковалев, В.Н. Полтавец, Л.А. Егошкина и др. / *Электричество.* – 1998. – № 3. – С. 33–42.

142. Hysteresis and Reluctance Electric Machines with Bulk Rotor Elements / K.V. Ilushin, S.M.-A. Koneev, K.L. Kovalev, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 1261–1264.

143. Илюшин К.В. Синхронные генераторы с возбуждением от высокотемпературных криомагнитов / К.В. Илюшин, Л.К. Ковалев, С.М.-А. Конев // *Электричество.* – 2005. – № 1. – С. 19–25.

144. Илюшин К.В. Синхронные высокотемпературные сверхпроводниковые электродвигатели с комбинированным ротором / Илюшин К.В., Ковалев Л.К., Конев С.М.-А. // *Электричество.* – 2006. – № 10. – С. 36–41.

145. Синхронные двигатели с объемными высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами и возбуждением от постоянных магнитов / Л.К. Ковалев, С.М.-А. Конев, В.Н. Полтавец и др. / *Электричество.* – 2007. – № 2. – С. 28–33.

146. HTS Motor Program at OSWALD, Present Status / B. Oswald, K.-J. Best, M. Soell, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1583–1586.

147. ВТСП электроэнергетическая установка // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 2. – С. 1–4.

148. Разработка и создание синхронного генератора со сверхпроводниковой обмоткой якоря / Андреев Е.Н., Волынкин И.В., Манзук М.В. и др. // 2-я Международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС’06)”, 9–13 октября, 2006. // Сб. трудов конф. М.: ФИАН, 2006. – С. 235.

149. Теоретические и экспериментальные исследования сверхпроводниковых трансформаторов с сердечниками из аморфной стали / Андреев Е.Н., Волков Д.А., Коротков Д.А. и др. // 2-я Международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС’06)”, 9–13 октября 2006 г. // Сб. трудов конф. – М.: ФИАН, 2006. – С. 307.

150. Многодисковые криогенные синхронные двигатели с ВТСП массивами и постоянными магнитами / Е.Н. Андреев, Н.Ю. Вандюк, С.С. Тимофеев, Л.И. Чубраева // 2-я Международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС’06)”, 9-13 октября 2006 г. Сб. трудов конф. – М.: ФИАН, 2006. – С. 221.

151. Development of Synchronous Alternator with HTSC Armature / E.N. Andreev, L.I. Chubraeva, M.V. Manzuk et al. // XVII-th International Conference on Electrical Machines, Chania, Greece, Conference papers, 2006. – PSA 5-1. Ref. 348.

152. Kajikawa K., Nakamura T. Proposal of a fully superconducting motor for liquid hydrogen pump with MgB_2 wire / Kazuhiro Kajikawa, Taketsune Nakamura // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1669–1673.

153. Flux pump excited double-helix rotor for use in synchronous machines / Sasha Ishmael, Carl Goodzeit, Philippe Masson, et al. // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 18, № 2. – P. 693–696.

154. Лобынцев В.В. Сверхпроводниковые трансформаторы / В.В. Лобынцев // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3; № 4. – С. 4–8.

155. Development of High- Temperature Superconducting Transformers for Railway Applications / R. Schlosser, H. Schmidt, M. Leghissa, M. Meinert // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 2325–2330.

156. System test of a 1-MVA-HTS-Transformer connected to a converter-fed drive for rail vehicles / Michael Meinert, Martino Leghissa, Reinhard Schlosser,

Heinz Schmidt // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 2348–2351.

157. Active damping of inrush and DC-currents for High Temperature Superconducting (HTS)-Transformers on rail vehicles / Michael Meinert, Andreas Binder// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1851–1854.

158. Parks W. Superconductivity for Electric Systems, Program Plan FY 2005-2009 / William Parks, Joanna Livengood // */Электронный ресурс/*: Oak Ridge National Laboratory, 2005. – Режим доступа: <http://www.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/HighTemperatureSuperconductivity-ProcessPlan.pdf>

159. Design and Operational Testing of a 5/10-MVA HTS Utility Power Transformer / C.S. Weber, C.T. Reis, D.W. Hazelton, et al. // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 2210–2213.

160. Pleva E.F. Assembly and test of 5/10 MVA HTS transformer / Pleva E.F., Schwenterly S.W. // Power Engineering Society General Meeting, IEEE. – 2004. – Vol. 2. – P. 2210–2213.

161. Development of HTS power transformers for the 21st century: Waukesha Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI collaboration / S.W. Schwenterly, S.P. Mehta, M.S. Walker, R.H. Jones // Physica C: Superconductivity. – 2002. – Vol. 382, № 1. – P. 1–6.

162. Design of 1 MVA High T_c Superconducting Transformer / W.-S. Kim, S.-Y. Hahn, K.-D. Choi, et al. // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2003. Vol. 13, № 2. – P. 2291–2293.

163. Characteristics test of a 1 MVA single phase HTS transformer with pancake windings / W.-S. Kim, S.-R. Lee, S.-H. Kim, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, № 2. – P. 904–907.

164. Characteristic test of a 1 MVA single phase HTS transformer with concentrically atranged windings / S.-H. Kim, W.-S. Kim, K.-D. Choi, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 2214–2217.

165. Conceptual design of a 5 MVA single phase high temperature superconducting transformer / Jeehoon Choi, Seungwook Lee, Sukjin Choi, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 18, № 2. – P. 636–639.

166. Design of a single phase 33 MVA HTS transformer with OLTC / S.W. Lee, S.B.Byun, W.S. Kim, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. –

2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1939–1942.

167. Design of the cryogenic system for 100 MVA HTS transformer / S.-R. Kim, J. Han, W.-S. Kim, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1935–1938.

168. The insulation design of 154 kV HTS transformer and on load tap changers / J.H. Choi, J.W. Choi, S.M. Baek, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1972–1975.

169. Insulation design and experimental results for transmission class HTS transformer with composite winding / H.G. Cheon, D.S. Kwag, J.H. Choi, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2008. – Vol. 18, № 2. – P. 648–651.

170. Development of 66 kV/6.9 kV 2 MVA prototype HTS power transformer / T. Bohno, A. Tomioka, M. Imaizumi et al. // Physica C: Superconductivity. – 2005. Vol. 426–431, № 2. – P. 1402–1407.

171. Fabrication of Winding Model of High-Tc Superconducting Transformer for Railway Rolling Stock / H. Kamijo, H. Hata, H. Fujimoto, et al. // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2003. Vol. 13, № 2. – P. 2337–2340.

172. Fabrication of inner secondary winding of high-Tc superconducting traction transformer for railway rolling stock / H. Kamijo, H. Hata, H. Fujimoto, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1875–1878.

173. Test of superconducting traction transformer for railway rolling stock / H. Kamijo, H. Hata, H. Fujimoto, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1927–1930.

174. Nagasawa T. Conceptual Design of 100 MVA High Temperature Superconducting Auto-transformers / T. Nagasawa, M. Yamaguchi, S. Fukui // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. – 2003. Vol. 13, № 2. – P. 2306–2309.

175. Design requirements of a high temperature superconducting transformer / Toru Nagasawa, Mitsugi Yamaguchi, Satoshi Fukui, Mitsuyoshi Yamamoto // Physica C: Superconductivity. – 2002. – Vol. 372-376, – P. 1715 – 1718.

176. Yamamoto M. Superconducting transformers / Yamamoto M., Yamaguchi M., Kaiho K. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, № 2. – P. 599 – 603.

177. Cryogenic liquid insulation system for electrical machines / M. Yamamoto, I. Ishii, H. Yoshida, M. Yamaguchi // Proceed 6th International Symposium on high voltage engineering. – 1989. – P. 1–5.

178. A single phase model 9 kVA high-temperature superconducting power trans-

former / Yinshun Wang, Huidong Li, Xiang Zhao, et al. // *Supercond. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 17, № 8. – P. 1014–1017.

179. Development of Solenoid and Double Pancake Windings for Three-Phase 26 kVA HTS Transformer / Y.S. Wang, X. Zhao, H.D. Li, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2004, Vol. 14, № 2. – P. 924–927.

180. Development of a 45 kVA Single-Phase Model HTS Transformer / Y. Wang, J. Han, H. Li, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2006. – Vol. 16, № 2. P. 1477–1480.

181. Tixador T. Design and Construction of 41 kVA Bi/Y Transformer / T. Tixador, G. Donnier-Valentin, E. Maher // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2003. Vol. 13, № 2. – P. 2331–2336.

182. Test of a Bi/Y Transformer / P. Tixador, Y. Cointe, T. Trollier, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2005. Vol. 15, № 2. P. 1847–1850.

183. Multi-layer coated conductor cylinders – an alternative approach to superconducting coil fabrication / E.F. Maher, J.S. Abell, R.I. Chakalova et al. // *Supercond. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 17, № 12. – P. 1440–1445.

184. Пат. WO 03019589 GB, МКИ H01F 41/04. Superconducting coil fabrication: Пат. WO 03019589 GB, МКИ H01F 41/04. Maher Eamonn (GB); Coated Conductors Consultancy LTD. – № PCT/GB2002/003898. Заявл. 32.08.2002; Опубли. 06.03.2003. – 38 с.

185. Test Result of 14 kVA Superconducting Transformer With Bi-2223/Ag Windings / Z. Jelinek, Z. Timoransky, F. Zizek, et al. // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity.* – 2003. Vol. 13, № 2. – P. 2310–2312.

186. Comparison of Insulation Test of Mini-Models With Different Winding for a HTS Transformer / H.G. Cheon, S.M. Baek, D.S. Kwag, S.H. Kim // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2006. Vol. 16, № 2. P. 1497–1500.

187. Magnetic characteristics of magnetic materials at very low temperature and their application to transformers / T. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara, et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 1992. – Vol. 112. – P. 174–176.

188. Kubota T. Recent progress and future trend on grain-oriented silicon steel / Takeshi Kubota, Masahiro Fujikura, Yoshiyuki Ushigami // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 2000. – Vol. 215–216. – P. 69–73.

189. Current limitation properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{Au}$ thin films: application to transformer connection / C. Peroz, C. Villard, D. Buzon, P. Tixador // *Supercond. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 16, № 1. – P. 54–60.

190. 630 kVA high temperature superconducting transformer / Berends F.A., Papadopoulos C.G., Pittau R., Zueger H. // *Cryogenics*. – 1998. – Vol. 38, № 11. – P. 1169–1172.
191. High Temperature 630 kVA Superconducting Transformer / P.G. Therond, C. Levillain J.-F. Picard, et al. // *Proceed of 37.sup.th Cigre Session 1998, Prais, Aug. 30-Sep. 5 – 1998. – Paper No. 12-302.*
192. Hornfeldt S.P. HTS in electric power applications, transformers /Sven P. Hornfeldt// *Physica C: Superconductivity*. – 2000. – Vol. 341 – 348, № 4. – P. 2531–2533.
193. Performance of a 1-MVA HTS demonstration transformer / Schwenery S.W., McConnell B.W., Demko J.A., et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 680–684.
194. Руднев И. ВТСП трансформатор в энергетической сети Китая / И. Руднев // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2006. – Т. 3; № 2. – С. 11.
195. Development of a 630 kVA tree-phase HTS transformer with amorphous alloy cores / Yinshun Wang, Xiang Zhao, Junjie Han, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 2051–2054.
196. Смаев М.П. Тенденции использования сверхпроводниковых технологий в Японии / М.П. Смаев // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2007. – Т. 4; № 6. – С. 9–11.
197. Development of REBCO superconducting power transformers in Japan /M. Iwakuma, H. Hayashi, H. Okamoto, et al. // *Physica C: Superconductivity*. – 2009. – Vol. 469, № 15–20. – P. 1726–1732.
198. Development of a 22 kV/6.9 kV single-phase model for a 3 MVA HTS power transformer / Funaki K., Iwakuma M., Kajikawa K., et al.// *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2001. – Vol. 11, № 1. – P. 1578–1581.
199. Шутова Д.И. ВТСП токоограничивающий трансформатор / Д.И. Шутова // *Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл.* – 2009. – Т. 6; № 1. – С. 1–2.
200. High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) With 2G Coated Conductors / H. Okubo, S. Kurupakorn, S. Ito, et al. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1768–1771.
201. Current Limiting Characteristics of Parallel-Connected Coated Conductors for High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) /

Koki Omura, Hiroki Kojima, Naoki Hayakawa, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1880–1883.

202. ВТСП энергетическая программа Ю. Кореи // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 3; № 2. – С. 12–13.

203. Лобынцев В.В. Сверхпроводниковый трансформатор готов к установке на высокоскоростной подвижной состав / В.В. Лобынцев, В.И. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 5. – С. 9–10.

204. Лобынцев В.В. Сверхпроводниковое оборудование для систем тягового электроснабжения железных дорог / В.В. Лобынцев, В.И. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 5. – С. 8–9.

205. A MgB_2 12.5 kVA superconductor transformer / Y.S. Hascicek, Y. Akin, T.W. Baldwin, et al. // Superconductor Science and Technology. – 2009. – Vol. 22, № 6. – pp. – 065002.

206. Теоретические и экспериментальные исследования сверхпроводниковых трансформаторов с сердечниками из аморфной стали / Е.Н. Андреев, Д.А. Волков, Д.А. Коротков и др. // 2-я Международная конференция „Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости (ФПС’06)”, 9–13 октября 2006 г. // Сб. трудов конф. – М.: ФИАН, 2006. – С. 307.

207. Development of Three-Phase Transformer with HTSC Windings and Amorphous Alloy Cores / E.N. Andreev, L.I. Chubraeva, D.A. Korotkov, et al. // XVII-th International Conference on Electrical Machines, Chania, Greece, Conference papers, 2006. – PSA 5-2. Ref. 347.

208. Тенденції розвитку і використання високотемпературних надпровідникових струмообмежувачів / Данько В.Г., Гончаров Є.В., Лисенко Л.І. та ін. // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2006. – № 38. – С. 35 – 44.

209. Данько В. Г. Вибір еквівалентної моделі для розрахунку надпровідникового обмежувача струму / В.Г. Данько, Є.В. Гончаров // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2007. – № 3/3 (27). – С. 3 – 7.

210. Данько В.Г. Аналіз роботи високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання / В.Г. Данько, Є.В. Гончаров // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2007. – № 6/5 (30). – С.45 – 48.

211. Noe M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status / M. Noe, M. Steurer // Supercond. Sci. Tech-

pol. – 2007. – Vol. 20, № 3. – P. 15–29.

212. Существующие в мире проекты ВТСП токоограничителей / научн. ред. Н. А. Черноплеков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2008. – Т. 5, № 3. – С. 4 – 5.

213. Переключатель магнитного потока на основе сверхпроводящих колец из керамики / А. С. Веселовский, В. Д. Жемерикин, С.С. Иванов, С. И. Копылов // «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» ФПС'04: Сб. расширенных тезисов / Физический институт им. П. Н. Лебедева. – М., 2004. – С. 303 – 304.

214. Вершинин Ю.Н. Токоограничивающие выключатели трансформаторного типа с управляемыми сверхпроводниковыми экранами / Ю.Н. Вершинин, И.В. Якимец // Электричество. – 1985. – № 3. – С. 1–5.

215. Characteristics Analysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter / Hiroshi Yamaguchi, Teruo Kataoka, Kazuyoshi Yaguchi, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, № 2. – P. 815 – 818.

216. Лутидзе Ш. И. Сверхпроводниковые токоограничители для энергосистем / Ш. И. Лутидзе, Л. С. Флейшман // «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» ФПС'04: Сб. расширенных тезисов / Физический институт им. П. Н. Лебедева. – М., 2004. – С. 335–336.

217. Sasaki K. Effect of Magnetic Diffusion on Temperature Distribution in Conduction Cooled Bi2223 Fault Current Limiter / K. Sasaki, C. Nishizawa, T. Onishi // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, № 2. – P. 879 – 882.

218. Minseok Joo Reduction of fault current peak in an inductive high- T_c superconducting fault current limiter / Joo Minseok // Cryogenics. – 2005. – Vol. 45, № 5. – P. 343 – 347.

219. Щербаков В. ВТСП устройства: сверхпроводящие ограничители тока (СОТ). 1996 – 2006 гг. / В. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: инф. бюл. – 2006. – Т. 3, № 6. – С. 10 – 13.

220. Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications / W. Paul, M. Chen, M. Lakner, et al. // Physica C. – 2001. – Vol. 354, № 1/4. – P. 27 – 33.

221. Test of 1.2 MVA high- T_c superconducting fault current limiter / W. Paul, M. Lakner, J. Rhyner, et al. // Supercond. Sci. Technol. – 1997. – Vol. 10, № 12. – P. 914 – 918.

222. Копылов С.И. Влияние сверхпроводниковых устройств на повышение надежности работы энергосистемы / С.И. Копылов, С.С. Иванов // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 2. – С. 4 – 6.

223. Пат. 5642249 США, МКИ H02H9/02. Methods and apparatus for limiting high current electrical faults in distribution networks by use of superconducting excitation in transverse flux magnetic circuit: Пат. 5642249 США, МКИ H02H9/02 Kuznetsov Stephen B. (США); Measurex Corp. – Заявл. 12.28.1995; Оpubл. 24.06.1997, НКИ 361/58. – 40 с.

224. Пат. 5596469 США, МКИ H02H9/02. Apparatus for limiting high current electrical faults in distribution networks by use of superconducting excitation in transverse flux magnetic circuit: Пат. 5596469 США, МКИ H02H9/02 Kuznetsov Stephen B. (США); Power Superconductor Applications Co. – Заявл. 13.02.1996; Оpubл. 21.01.1997, НКИ 361/58. – 24 с.

225. Балашов Н. Наступление ВТСП на электротехнику / Н. Балашов // Перспективные технологии: информ. бюл. – 2001. – Т. 8; № 4. – С. 2 – 3.

226. Hawley C. J. Performance of a 1 MVA high temperature superconductors-enabled saturable magnetic core-type fault current limiter / C. J. Hawley, F. Darmann, T. P. Beales // Supercond. Sci. Technol. – 2005. – Vol. 18, № 3. – P. 255 – 259.

227. Пат. 2254654 Россия, МКИ H02H3/08. Токоограничитель: Пат. 2254654 Россия, МКИ H02H3/08 Микляев С.М. (Россия). – Заявл. 19.08.2003; Оpubл. 20.06.2005 Бюл. № 17. – 5 с.

228. Пат. 2254655 Россия, МКИ H02H3/08. Токоограничитель: Пат. 2254655 Россия, МКИ H02H3/08 Микляев С.М. (Россия). – Заявл. 19.08.2003; Оpubл. 20.06.2005 Бюл. № 17. – 7 с.

229. Сверхпроводящий ограничитель тока короткого замыкания / М. П. Алексеев, В. Е. Кейлин, С. А. Микляев [и др.] // Электричество. – 2003. – № 9. – С. 20 – 26.

230. Model of HTS three-phase saturated core fault current limiter / V. Keilin, I. Kovalev, S. Kruglov, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2000. – Vol. 10, № 1. – P. 836 – 839.

231. Щербаков В.И. Токоограничители с насыщенным магнитопроводом: pro и contra / В.И. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 4. – С. 6–8.

232. DC Magnetization System for a 35 kV/90 MVA Superconducting Saturated Iron-Core Fault Current Limiter / Hui Hong, Zhengjian Cao, Jingyin Zhang, et al. //

IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009.– Vol. 19, № 3. – P. 1851 – 1854.

233. Manufacturing and Test of a 35 kV/90 MVA Saturated Iron-Core Type Superconductive Fault Current Limiter for Live-Grid Operation / Yin Xin, Gong W.Z., Niu, X.Y., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009.– Vol. 19, № 3. – P. 1934 – 1937.

234. Saturated Cores FCL – A New Approach / V. Rozenshtein, A. Friedman, Y. Wolfus, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007.– Vol. 17, № 2. – P. 1756 – 1759.

235. Смаев М.П. Токоограничитель Toshiba-Fujikura / М.П. Смаев // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2009. – Т. 6; № 1. – С. 2 – 3.

236. Design and Experimental Results of Three-Phase Superconducting Fault Current Limiter Using Highly-Resistive YBCO Tapes / Yazawa T., Koyanagi K., Takahashi M., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1956 – 1959.

237. *CURL* 10: development and field-test of a 10 kV/10 MVA resistive current limiter based on bulk MCP-BSCCO 2212 / J. Bock, F. Breuer, H. Walter, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1955 – 1960.

238. Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter / S. Elschner, F. Breuer; M. Noe, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 1980 – 1983.

239. Testing bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters limiter / Noe M., Juengst K.-P., Werfel F. N., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol. 13, № 2, P. 1976 – 1980.

240. System technology and test of *CURL* 10, a 10 kV, 10 MVA resistive high- T_c superconducting fault current limiter / R. Kreutz, J. Bock, Breuer, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1961 – 1964.

241. 6,4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor / Makan Chen, Willi Paul, Martin Lakner, et al. // Physica C. – 2002. – Vol. 372-376, Part 3. – P. 1657 – 1663.

242. Resistive fault current limiters with YBCO films: 100 kVA functional model / B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1999. – Vol. 9, № 2. – P. 656 – 659.

243. Щербаков В.И. На пути к высоковольтному ВТСП токоограничителю /

В.И. Щербаков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2009. – Т. 6; № 3. – С. 6 – 8.

244. Development of Resistive Fault Current Limiters Based on YBCO Coated Conductors / Neumueller H.-W., Schmidt W., Kraemer H.-P., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1950 – 1955.

245. Villard C. Limitation of DC currents by $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ -Au superconducting films / Villard C., Peroz C., Guinand B., Tixador P. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 1. – P. 11 – 16.

246. Young-Sik Jo 1st Phase Results and Future Plan of DAPAS Program / Young-Sik Jo, Kang-Sik Ryu, Park, M., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 16, №2. – P. 678 – 682.

247. Шутова Д. И. Сверхпроводниковые ограничители токов на основе ВТСП лент 2-го поколения AMSC / Д.И. Шутова // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 2. – С. 8 – 9.

248. Лобынцев В. В. Новые решения для распределительных сетей на основе ВТСП кабелей / В. В. Лобынцев // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 3. – С. 4–6.

249. Resistive Fault Current Limiter Prototypes: Mechanical and Electrical Analyses / L. Martini, I. Arcos, M. Bocchi, et al. // Journal of Physics: Conference Series. 7th European Conference on Applied Superconductivity. – 2006. – Vol. 43, P. 925 – 928.

250. Test Results on 500 kVA-Class MgB_2 -Based Fault Current Limiter Prototypes / Dalessandro R.B., Bocchi M., Rossi V., Martini L.F. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 1776 – 1779.

251. Пат. 6664875 США, МКИ H02H9/02. Matrix-type superconducting fault current limiter: Пат. 6664875 США, МКИ H02H9/02 Yuan Xing, Hazelton Drew W. (США); IGC-Superpower. – Заявл. 17.01.2002; Оpubл. 16.12.2003, НКИ 335/216. – 17 с.

252. Сверхпроводниковые технологии для электросетей США / Науч. ред. Н. А. Черноплеков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 4; № 4. – С. 4 – 6.

253. Proof-of-concept prototype test results of a superconducting fault current limiter for transmission-level applications / Xing Yuan, Tekletsadik K., Kovalsky L., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2005. – Vol. 15, № 2. – P. 1982 – 1985.

254. Матричный ВТСП ограничитель тока – Matrix Fault Current Limiter (*MFCL*) / Науч. ред. Н. А. Черноплеков // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2006. – Т. 1; № 1. – С. 9.

255. Llambes J.-C.H. Recovery Under Load Performance of 2nd Generation HTS Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power Transmission Lines / Llambes J.-C.H., Hazelton D.W., Weber C.S. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2009. – Vol. 19, № 3. – P. 1968 – 1971.

256. Coil in coil – components for the high voltage superconducting resistive current limiter CULT 110 / S. Elschner, M. Stemmler, F. Breuer, et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – Vol. 97, № 012309. – 6 pp.

257. Coil in coil – components for the high voltage superconducting resistive current limiter *CULT* 110 / S. Elschner, M. Stemmler, F. Breuer, et al. // IEEE/CSC & ESAS European superconductivity news forum. – 2008. – № 3. – 9 pp.

258. Györe A. Series and parallel connections of inductive high-temperature superconducting fault current limiters / Attila Györe, Laszlo Farkas, Istvan Vajda // Superconductor Science and Technology. – 2005. – Vol. 18, № 2. – P. 82 – 86.

259. Балашов Н. Новые исследования по токоограничителям / Н. Балашов // Сверхпроводники для электроэнергетики: информ. бюл. – 2007. – Т. 2; № 5. – С. 6 – 7.

260. Malkin P. Cap that current [superconducting fault current limiters] / Malkin P., Klaus D. // IEE Review. – 2001. – Vol. 47, № 2. – P. 41 – 45.

261. Sung-Hun Lim Operational characteristics of a Flux-Lock-Type High-Tc Superconducting Fault Current Limiter With a Tap Changer / Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Byoung-Sung Han // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol. 14, № 1. – P. 82 – 86.

262. Restoration and testing of an HTS fault current controller / Waynert J.A.; Boenig H.J.; Mielke C.H., et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 1984 – 1987.

263. Design & development of a 15 kV, 20 kA HTS Fault Current Limiter / E. Leung, B. Burley, N. Chitwood, et al. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2000. – Vol. 10, № 1. – P. 832 – 835.

Відомості про авторів



Данько Володимир Григорович – доктор технічних наук, професор.

Фахівець у галузі нагрівання і охолодження традиційних електричних машин та розроблення надпровідних машин.

Закінчив Харківський авіаційний інститут. Працював у науково-дослідному інституті заводу “Електроважмаш” на різних посадах (1957 – 1983 рр.).

Завідувач кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Професор Данько В.Г. опублікував 180 наукових праць і методичних розробок, у тому числі 3 монографії і 3 навчальних посібника. Він є автором 60 авторських свідоцтв та патентів України і Росії на винаходи.



Полянська Ірина Сергіївна – кандидат технічних наук зі спеціальності 05.09.03 – Електротехнічні комплекси і системи, старший викладач кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Полянська І.С. є автором 14 наукових праць та 1 патенту України.



Гончаров Євген Вікторович – молодший науковий співробітник кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Закінчив Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” і отримав кваліфікацію інженера-електромеханіка зі спеціальності “Електричні машини й апарати”.

Гончаров Є.В. є автором 12 наукових праць та 1 патенту України.

Зміст

Вступ	3
Розділ 1. Надпровідні матеріали	14
1.1. Загальна класифікація надпровідних обмотувальних матеріалів та технологій їхнього виготовлення.....	14
1.2. Металева основа ВТНП проводів.....	22
1.3. ВТНП обмотувальні матеріали 2-го покоління	25
1.4. Надпровідні проводи на основі дібориду магнію.....	37
Розділ 2. Кабелі, лінії електропередачі	43
2.1. Перші проекти потужних надпровідних кабельних ліній електропередачі постійного та змінного струмів	43
2.2. Надпровідні кабелі як трубопроводи для енергоносіїв.....	44
2.3. Найзначніші ВТНП кабельні проекти.....	46
Розділ 3. Електромеханічні перетворювачі енергії	85
3.1. Надпровідні генератори змінного струму	85
3.2. Стан розроблень надпровідних електродвигунів	110
Розділ 4. Надпровідні трансформатори	137
4.1. Вибір конструкції магнітопроводу та обмоток.....	139
4.2. Нові технологічні концепції.....	142
4.3. Трансформатори для розподільних енергомереж.....	145
4.4. Тягові трансформатори.....	155
4.5. Дослідницькі роботи Росії.....	159
Розділ 5. Надпровідні обмежувачі струму короткого замикання	161
5.1. Конструкція та принцип дії надпровідного обмежувача струму короткого замикання.....	162
5.2. Індуктивний надпровідний обмежувач струму.....	168
5.3. Резистивний надпровідний обмежувач струму.....	186
5.4. Надпровідний обмежувач струму випрямного типу	211
Перелік умовних скорочень	216
Список літератури	222
Відомості про авторів	246

Наукове видання

ДАНЬКО Володимир Григорович
ПОЛЯНСЬКА Ірина Сергіївна
ГОНЧАРОВ Євген Вікторович

**ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ
НАДПРОВІДНОСТІ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОМУ
ОБЛАДНАННІ**

Монографія

Роботу до видання рекомендував В.І. Мілих

Редактор О.І. Шпільова

План 2010 р., поз. 15/

Підписано до друку 10.05.2011. Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – офсет. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 13,7.
Обл.-вид. арк. 16,5. Тираж 300 прим. Зам № 47. Ціна договірна.

Видавництво „НТМТ”. 61072, м. Харків, вул. Леніна, 58 к. 106.

Тел.: (057) 763-03-80, 763-03-72

Свідоцтво про Державну реєстрацію ДК № 1748 від 15.04.2004 р.

Друкарня ТОВ „Цифра Прінт”. 61058, м. Харків, вул. Культури, 22–Б.

Тел.: (057) 766-47-10.