

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Мішин Богдан Михайлович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз роботи над провідникових трансформаторів та економічні ефекти їх
використання
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Мішин Б. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2022

АНОТАЦІЯ

Мішин Б. М. Аналіз роботи над провідникових трансформаторів та економічні ефекти їх використання. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

Основною метою кваліфікаційної роботи є дослідження принципів будови над провідникових трансформаторів та їх масогабаритних параметрів.

Виконані в кваліфікаційній роботі дослідження дозволили сформулювати вимоги до параметрів над провідникових трансформаторів з позиції визначення їх схем заміщення та провести оцінки їх масогабаритних параметрів.

Ключові слова: над провідникові трансформатори, пропускна здатність, схема заміщення, магнітна система.

ABSTRACT

Mishin B. M. Analysis of work on conductor transformers and economic effects of their use. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2022.

The main goal of the qualification work is to study the principles of the structure of conductor transformers and their mass-dimensional parameters.

The studies carried out in the qualification work allowed the formulators of requirements for the parameters of conductor transformers from the position of determining their replacement schemes and to evaluate their mass-dimensional parameters.

Key words: over conductor transformers, bandwidth, substitution scheme, magnetic system.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ	7
1.1. Явище надпровідності	7
1.2. Сучасні токонесучі елементи на основі високотемпературних над провідників.	10
1.3. Застосування високотемпературних надпровідників в електроенергетиці.	13
1.4. Кріогенна техніка для охолодження надпровідникових пристроїв.	24
Висновки по розділу 1	27
РОЗДІЛ 2. СКЛАДАННЯ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ РОБОТИ НАДПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА ВЕКТОРНОЇ ДІАГРАМИ ЇЇ РОБОТИ	28
2.1. Параметри схеми заміщення над провідникового трансформатора.	28
2.2. Векторна діаграма над провідникового трансформатора та вплив на рівень напруги.	32
Висновки по розділу 2	36
РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНІ ЕФЕКТИ ВІД ВИКОРИСТАННЯ НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	37
3.1. Втрати енергії в над провідниковому трансформаторі	37
3.2. Можливості паралельної роботи НПТ із звичайним трансформатором	42
3.3. Порівняльний аналіз габаритних показників трансформаторів	
Висновки по розділу 3	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток електроенергетичних систем (ЕЕС) потребує підвищення їх енергоефективності та технічного вдосконалення. Традиційні силові трансформатори мають досить високий коефіцієнт корисної дії (ККД), однак, збільшення вартості електричної енергії, внаслідок збільшення вартості палива, стимулює інтенсивні пошуки шляхів зниження втрат в ЕЕС, у тому числі і в силових трансформаторах, втрати в яких становлять близько половини втрат при передачі та розподілі електроенергії [1].

В даний час втрати енергії в електричних мережах неприпустимо високі. Застосовуване для охолодження пристроїв в електроенергетиці трансформаторна олія – матеріал вогнебезпечний і забруднює довкілля, прийнятні втрати енергії на змінному струмі у високотемпературних надпровідників (ВТНП) забезпечують значне збільшення ефективності роботи електроенергетичних пристроїв, а охолодження рідким азотом відрізняється екологічною чистотою та безпекою [2].

У світлі вищесказаного актуально використання силових трансформаторів з надпровідниковими (НП) обмотками на основі високотемпературних надпровідників з робочою температурою 65-77 К, головною перевагою яких є низькі навантажувальні втрати в порівнянні з традиційними трансформаторів. Крім цього, надпровідникові трансформатори мають такі переваги як менші масогабаритні показники можливість обмеження струмів короткого замикання, екологічна безпека, пожежна вибухобезпека та ін.

Розробка надпровідникових трансформаторів (НПТ) ведеться з 1960-х років. в нашій країні та за кордоном ще на технології низькотемпературної надпровідності (НТНП) з робочою температурою 4,2-12 К. Використання понадпровідникових трансформаторів присвячені роботи Ш.І. Лутідзе, Е.А. Джафарова, Е.П. Волкова та ін.

Основною метою кваліфікаційної роботи є дослідження принципів будови над провідникових трансформаторів та їх масогабаритних параметрів.

В роботі були поставлені такі завдання:

- уточнення параметрів схеми заміщення над провідникових трансформаторів у встановлених та перехідних режимах;
- оцінка масогабаритних параметрів над провідникових трансформаторів та доцільності їх застосування в ЕЕС.

Об'єктом дослідження є надпровідникові трансформатори та їх параметри (опір у різних режимах роботи, втрати).

Предметом дослідження є принцип та режими роботи, а також в ЕЕС при використанні в них надпровідникових трансформаторів.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань базується на виводах фундаментальних і прикладних наук, таких як електромагнетизм, електротехніка, математичний аналіз, математичне моделювання та ін.

Практична значущість результатів роботи. Виконані в кваліфікаційній роботі дослідження дозволили отримати такі результати:

- сформульовані вимоги до параметрів над провідникових трансформаторів з позиції визначення їх схем заміщення;
- розроблено алгоритм та приведена методика оцінки масогабаритних параметрів над провідникових трансформаторів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Мішин Б. М. ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАДПРОВІДНИКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Студентські читання – 2022: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2022». 26 жовтня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022.- 400 с.

Соколовський О. Ф., Мішин Б. М. ВЕКТОРНА ДІАГРАМА НАД ПРОВІДНИКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТА ВПЛИВ ЙОГО НА РІВЕНЬ НАПРУГИ.

Студентські читання – 2022: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2022». 26 жовтня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022.- 400 с.

Соколовський О. Ф., Мішин Б. М. Кухарець М. М. АНАЛІЗ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В НАД ПРОВІДНИКОВОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ.

Студентські читання – 2022: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2022». 26 жовтня 2022 р. Житомир: Поліський національний університет, 2022.- 400 с.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРИСТРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ

1.1. Явище надпровідності

Надпровідність – явища відсутності опору електричному струму. Відкриття явища надпровідності пов'язане з дослідженням електричного опору металів за низьких температур - поблизу абсолютного нуля (1...10 K). Отримання таких низьких температур стало можливим після зрідження інертного газу гелію. У 1908 р. у кріогенній лабораторії Лейденського університету (Нідерланди) Хейке Камерлінг - Оннес вдалося отримати рідкий гелій, а через три роки він вже відкрив явище надпровідності. Спочатку була отримана надпровідність ртуті, опір якої за температури 4,2 К різко зменшувалася до такої малої величини, що її не вдавалося виявити жодним способом. Температура за якої виникає надпровідність була названа критичною - ТК. За оцінкою Оннеса, опір ртуті в точці переходу в надпровідний стан ставав менше однієї мільйонної від свого первісного значення. Після цього Оннес показав, що в надпровідний (НП) стан переходять і інші матеріали (метали) [2].

Надпровідний стан металевих речовин мав місце в обмеженому діапазоні зміни температури та індукції магнітного поля. Нижче критичної температури порушення надпровідності могло бути досягнуто поміщенням надпровідника у зовнішнє магнітне поле. Мінімальне значення індукції магнітного поля, при якому руйнується надпровідність, назвали критичною індукцією магнітного поля – ВК. Вчені також виявили, що для підтримки надпровідності необхідно, щоб струм, що протікає в над провіднику, не перевищував деякого критичного значення.

На рисунку 1.1 показана область надпровідності, обмежена трьома критичними параметрами

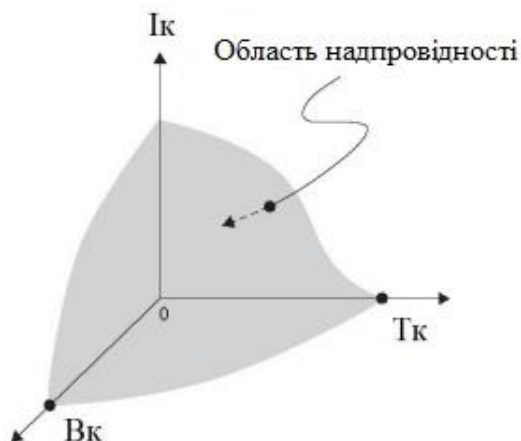


Рисунок 1.1 – Область надпровідності

У 1933 р. у результаті експериментальних досліджень В. Мейснер та Р. Оксенфельд виявили властивість діамagnetизму надпровідників, що з'ясування природи надпровідності мало таке значення, як саме відкриття Оннеса. Однак у зв'язку з низькими значеннями параметрів T_K і B_K цей період характеризувався відсутністю практичного застосування надпровідності на основі над провідників із чистих металів, які згодом утворили над провідники першого роду (крім ніобію, ванадію та технецію). Така картина спостерігалася до 1957 р., поки не були відкриті над провідники другого роду - на базі надпровідних сплавів та інтерметалевих з'єднань з високими критичними параметрами [2].

У 1986 році були відкриті високотемпературні надпровідники, що є сполуками на основі лантану, вісмуту і талію, що містять атоми міді та кисню. Ці сполуки характеризуються високим значенням T_K , що забезпечило численні застосування надпровідності, які раніше не могли бути реалізовані з економічних причин.

На рисунку 1.2 наведено хронологію зростання критичної температури надпровідників.

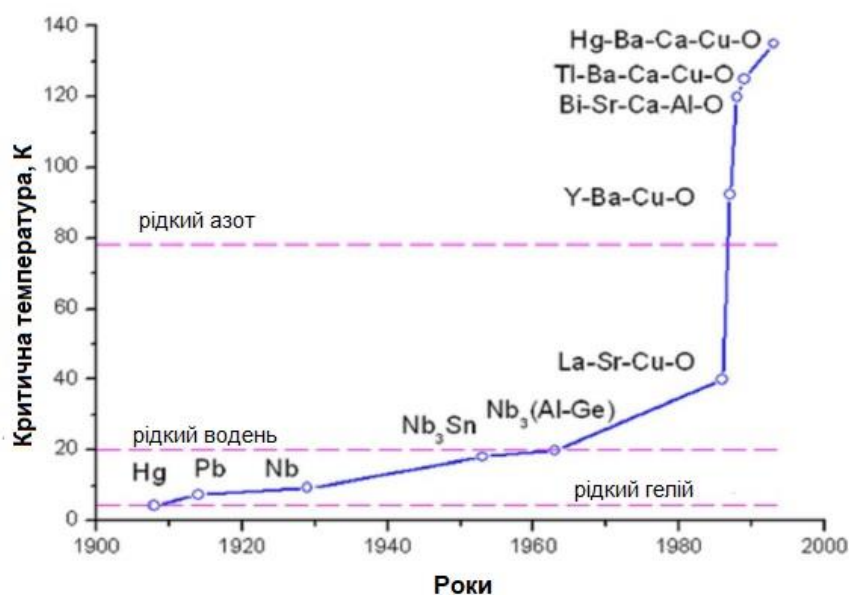


Рисунок 1.2 – Хронологія зростання критичної температури над провідників

Вирішальне значення для дослідження та розробки надпровідності та на їх основі різних НП пристроїв мало створення послідовної теорії надпровідності. Ландау у своїх роботах описав властивості близького за багатьма проявами фізичного ефекту - надплинності рідкого гелію. Ця теорія була побудована у 30-х роках минулого сторіччя і на перший погляд могла бути автоматично використана для пояснення надпровідності. Але зуміли це зробити лише наприкінці 50-х років американські теоретики Дж. Бардін, Л. Купер та Дж. Шриффер.

Тільки після появи їх робіт став зрозумілим механізм надпровідності. У їх вперше було показано, що надпровідний струм переноситься електронними парами, які утворюють зв'язані квазічастинки всередині надпровідника за рахунок обміну фононами [2].

Після відкриття високотемпературної надпровідності провідні фізики теоретики докладають величезних зусиль для створення теорії, здатної пояснити це явище. Всі ці моделі припускають, що, як і в класичних надпровідниках, у високотемпературних надпровідниках електрони об'єднуються в пари. Однак досі так і не запропоновано механізму, який зміг би переконливо

пояснити причини виникнення сил тяжіння між електронами за таких високих температур.

1.2. Сучасні токонесучі елементи на основі високотемпературних надпровідників

Відкриття явища високотемпературної надпровідності і досягнуте підвищення їх критичної температури до ~ 100 К створило принципово нові можливості для практичних застосувань надпровідності. Головна з них полягає у підвищенні робочих температур над провідникових пристроїв від одиниць градусів Кельвін до температур 30–100 К. Існуючі на сьогоднішній день технології дозволяють отримувати струмонесучі ВТНП елементи у вигляді композитних ВТНП проводів, об'ємних елементів з монодоменною та полікристалічною структурою, а також у вигляді листових композитів. В останні роки у США була розроблена технологія, що дозволяє одержувати плівкові ВТНП матеріали методом напилення. Загальна класифікація НП матеріалів наведена на рисунку 1.3 [3].

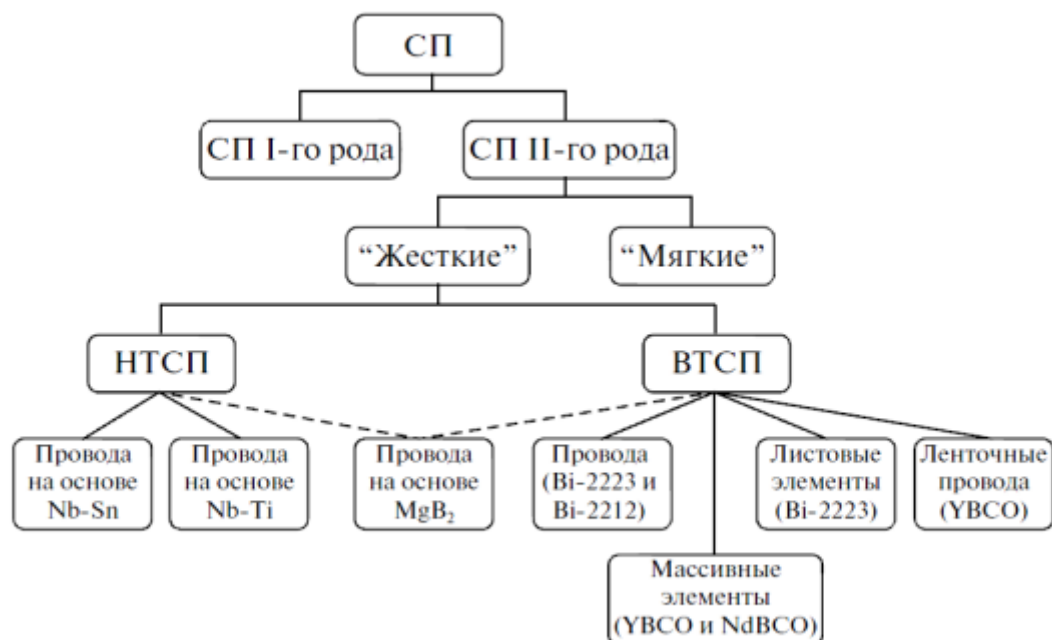


Рисунок 1.3 – Класифікація НП матеріалів [3]

Високотемпературні надпровідники відносяться до надпровідників 2

роду, у яких фазовий перехід із нормального стану до надпровідного (або назад) відбувається не відразу, а є проміжний змішаний стан, обмежений першим і другим критичним полями B_{K1} і B_{K2} відповідно.

Серед ВТНП проводів виділяють проводи двох поколінь. Провід 1-го покоління (1G) – це проводи на основі срібної матриці з мікроканалами, в яких знаходиться надпровідна кераміка Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO), як правило, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) з критичною температурою 80 К або $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) з критичною температурою 110 К. Перші довгомірні проводи 1G були створені в середині 90-х. Сьогодні технологія їх виробництва («порошок у трубі») досить добре розвинена, у світі випускаються сотні кілометрів проводу, які йдуть на створення прототипів надпровідникового електротехнічного обладнання. Особливих успіхів у цій технології досягла японська фірма Sumitomo. Проте дроти 1G більш ніж на 2/3 складаються з чистого срібла, що виключає значне зниження їх вартості у майбутньому.

Є ще один недолік: надпровідність у BSCCO швидко руйнується у зовнішньому магнітному полі. Це обмежує спектр застосування надпровідників першого покоління пристроями із відносно слабкими робочими магнітними полями та робить безперспективним виготовлення на їх основі таких виробів як генератори, двигуни, накопичувачі енергії тощо.

Ці обставини призвели до розробки надпровідників другого покоління (2G) на основі ітрієвої кераміки Y-Ba-Cu-O (YBCO) з критичною температурою 92 К. Ці надпровідники, які часто називають «стрічками з покриттям» (англ. coated conductors), є на сьогоднішній день найперспективнішим напрямом розвитку технічної надпровідності. Основна фундаментальна перевага 2G полягає в тому, що вони володіють максимальною щільністю критичного струму. На рисунку 1.4 неважко помітити, що надпровідник становить лише малу частину від загального поперечного перерізу проводу: у стрічках 1-го покоління ця величина зазвичай не перевищує 40%, а в стрічках 2-го покоління ще менше - 5% [8]

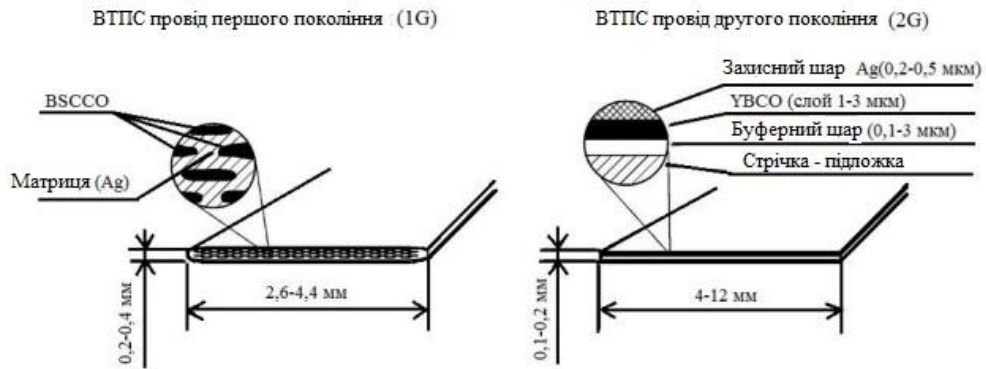


Рисунок 1.4 – Перетин ВТНП стрічок на основі BSCCO та YBCO

На рисунку 1.5 наведено структуру ВТНП проводу другого покоління виробленої фірмою SuperPower.

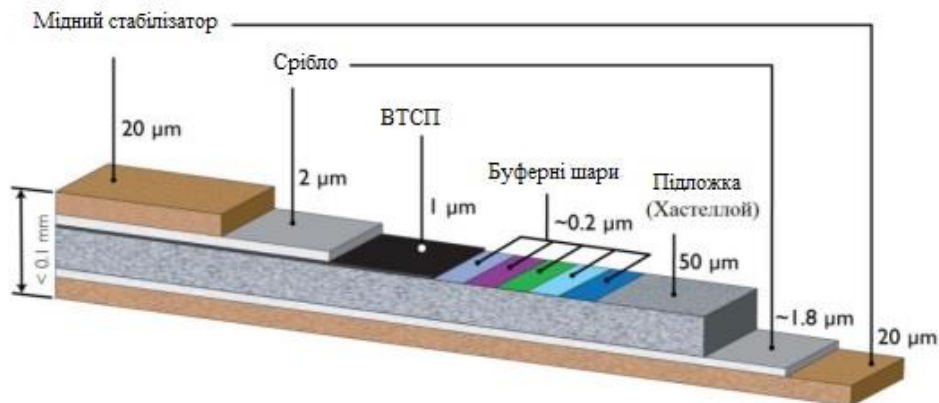


Рисунок 1.5 – Структура ВТНП проводу другого покоління виробництва фірми SuperPower

Для створення стрічок 2-го покоління зазвичай застосовують стрічки-підкладки (як правило, зі сплавів на основі нікелю), а ВТНП жила одна і являє собою тонке покриття на поверхні стрічки. Для запобігання хімічній взаємодії ВТНП та стрічки використовують так званий «буферний шар» – ключову ланку в технології виготовлення. Металевий захисний шар (як правило, зі срібла) оберігає ВТНП від взаємодії з парами води та CO_2 повітря, служить захистом від механічних пошкоджень і від прямого контакту ВТНП зі стабілізатором – шаром НП проводу, функціональне призначення якого полягає в шунтуванні НП шару при втраті їм НП стану (зміцнена мідь,

нержавіюча сталь). Щільність струму в ВТНП матеріалі (YBCO) на постійному струмі і при 77 К може становити до 106 А/см². З урахуванням того, що критичний струм над провідника при використанні його на змінному струмі знижується приблизно наполовину і з урахуванням того, що ВТНП шар займає лише 1-5% від загального поперечного перерізу ВТНП проводу, робоча щільність струму в НПТ становить приблизно 50 -150 А / мм².

НТНП проводи першого і другого поколінь відрізняються не тільки технологією виготовлення, але хімічним складом, механічними та електрофізичними параметрами. В електроенергетичних ВТНП пристроях проводи охолоджуються рідким азотом при 77 К. Відмінність критичних температур проводів першого і другого поколінь призводить до того, що відносно невеликий (на 10-15К) розігрів проводів вище температури рідкого азоту по-різному впливає на їхній надпровідний стан. Для проводів першого покоління розігрів призводить до деякого зниження критичного струму без втрати надпровідності, проводи другого покоління практично втрачають здатність пропускати скільки-небудь значний надпровідний струм (при $T \approx 92$ К) або повністю переходять у нормальний стан (при $T > 92$ К). З цього випливає, що теплові процеси повинні відігравати істотну роль у роботі електротехнічних пристроїв із використанням ВТНП проводів другого покоління [4].

1.3. Застосування високотемпературних надпровідників в електроенергетиці

Надпровідникові кабелі.

Надпровідникові кабелі в порівнянні зі звичайними мають зменшені втрати, більшу пропускну здатність навіть при зниженні класу напруги, пожежобезпечні та екологічні, що також відіграє чимало важливу роль. При однаковій потужності в порівнянні зі звичайним кабелем ВТНП кабель має меншу вагу і компактніший, це полегшує монтаж і транспортування, для нього потрібна менша кількість муфт, отже, зменшується площа прокладки.

Особливість охолодження ВТНП кабелів дозволяє уникнути небажаного перегріву електричної ізоляції. У зв'язку з тим, що втрати електроенергії на змінному струмі мають місце в НП проводах, для ВТНП кабелів економічніше передавати електроенергію на постійному струмі [5].

Найбільшими розробниками ВТНП кабелів є Southwire (США), Sumitomo Electric (Японія), Pirelli (Італія), Condumex Cable (Мексика), NKT Cables (Данія), CAS, IEE, TIPC (Китай) та інші. У таблиці 1.1 наведено найбільші існуючі та проєктовані кабелі з використанням ВТНП провідників [5].

Надпровідникові трансформатори.

Особливістю робіт у галузі ВТНП пристроїв стала більша доступність створення та випробування невеликих моделей трансформаторів у порівнянні з НТНП пристроями, оскільки робота з рідким азотом простіше, ніж з рідким гелієм, і він значно дешевший. В результаті кількість учасників розробок ВТНП трансформаторів суттєво розширилася за рахунок університетів, які раніше брали участь на етапі НТНП, але самостійних серйозних робіт не вели. Тому нижче розглядаються найбільші та найвідоміші проєкти.

ВТНП трансформатори в порівнянні з традиційними володіють значними технічними перевагами, а саме:

- зниження навантажувальних втрат при номінальному струмі до 90%, що збільшує ККД трансформатора;
- зменшення масогабаритних показників трансформатора до 40%;
- обмеження струмів короткого замикання, що в аварійних режимах захищає електроустаткування мережі;
- велика перевантажувальна здатність без пошкодження ізоляції та старіння трансформатора;
- зменшення рівня шуму.
- низькі втрати холостого ходу та короткого замикання.

Таблиця 1.1 - Існуючі та проєктовані ВТНП кабелі [13].

Країна / місце / проєкт	Напруга кВ / струм, кА	Довжина, м	Тип кабеля	Провідник	Дата
USA/ Carrollton, GA	12,5/1,25	30	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2000-
USA/ Detroit	24/2,4	120	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2001
Japan/ Yokosuka	66/1	100	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2001- 2002
Denmark/ Copenhagen	36/2	30	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2001- 2003
China/ Yunnan	35/2	33,5	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2003- 2005
China/ Lanzhou	10,5/1,5	75	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2003- 2005
Japan/ Yokosuka/ Super Ace	77/1	500	однофазний	Ві	2004- 2005
USA/ Albany	34,5/0,8	350	3 фази в загальному кріостаті	Ві, Ві/У	2006- 2008
USA/ Columbus, OH	13,2/3	200	трифазний, коаксіальний	Ві	2006-
Korea/ Gochang	22,9/1,26	100	3 фази в загальному кріостаті	Ві	2006-
Japan/ Kyoto	66/1	20	3 фази в загальному кріостаті	У	2006-2007
Japan/ Yokohama	66/3	~250	3 фази в загальному кріостаті	Ві	2007-2012
USA/Long Island/ LIPA	138/2,4	600	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2008-
USA/ New York/ HYDRA	13,8/4	300	трифазний, коаксіальний	У	2008-2010
Korea/ Seoul/ GENI	22,9/1,26	500	3 фази в окремих кріостатах	У	2008-2010
Japan/ Kumatori/ M- PACC	66/5	15	3 фази в загальному кріостаті	У	2008-2012
Japan/ Ichihara/ M-PACC	275/3	30	однофазний	У	2008-2012
EU/ Spain/ Super-3C	10/1	30	однофазний	У	2009
Russia/ Moscow	20/1,5	200	3 фази в окремих кріостатах	Ві	2009-2010
Japan/ Kasugai/ CASER-2	DC±10/2	200	одножильний, біполярний	Ві	2010-
Korea/ Gochang/ DAPAS	154/3,75	100	3 фази в окремих кріостатах	У	2010
SA/ Long Island/ LIPA-2	138/2,4	<600	3 фази в окремих кріостатах	У	2011-

Разом з тим, використання рідкого азоту у ВТНП трансформаторах дозволить, окрім основної функції холодоагенту, отримати надійну, високоефективну ізоляцію, яка відрізняється від звичайної традиційної

ізоляції такими параметрами, як екологічна чистота, не старіння, пожежо-вибухобезпека. При цьому потужність, що витрачається на охолодження НПТ, знижується в 20 разів у порівнянні з потужністю, що витрачається на охолодження звичайних силових трансформаторів [1].

Різновид конструкцій НПТ та їх окремих елементів значно ширший порівняно з аналогічними варіантами традиційних силових трансформаторів. Магнітопровід трансформатора може мати як «холодне» виконання (занурений у рідкий азот разом з обмотками), так і «тепле» виконання (працює при кімнатній температурі). Холодне виконання, з одного боку, сприяє спрощенню конструкції кріостата та зменшенню розмірів магнітна система, з іншого боку, вносить додаткові теплові притоки, збільшуючи енерговитрати на охолодження. Зниження теплових притоків можна досягти використанням як матеріал магнітопроводу аморфних сталей, мають дуже низькі тепловиділення (0,2 Вт/кг при 1,4 Т і 100 К), або звичайної холоднокатаної електротехнічної сталі з покращеними характеристиками. Тепле виконання магнітопроводу призводить до більш складної конструкції кріостата, що виконується у вигляді порожнистого циліндра, що збільшує розмір магнітної системи, але разом з тим зменшує теплові притоки в холодну частину. При цьому як матеріал магнітопроводу можна використовувати порівняльно дешеву тонколистову рулонну електротехнічну сталь.

Обмотки трансформатора можуть бути концентричними або чергуються і намотані як провідниками першого покоління, так і провідниками другого покоління. Надпровідники мають дві основні особливості: незначні малі втрати при відносно великій щільності струму і «перемикаючий режим» – перехід від нульового опору до високого опору, коли струм перевищить критичний струм. І, як відомо, надпровідний стан існує тільки нижче за певну температуру. Зазвичай робоча температура для зручності приймається рівною температурі киплячого азоту, тобто. 77 К.

Робочий струм ВТНП провідника повинен мати значні відповідні області надпровідності та нижче критичного струму. Максимально допустиме

підвищення струму визначається здатністю навантаження охолоджуючого пристрої. Для струму, що значно перевищує критичне значення, втрати збільшуються на порядки. Цей режим є режимом обмеження аварійного струму – короткочасним перехідним режимом. Енергія, виділена у провіднику в перехідному режимі, буде поглинена при випаровуванні частини охолоджуючої рідини [6].

На рисунку 1.9 наведено схематичний пристрій трансформатора з теплим магнітопроводом.

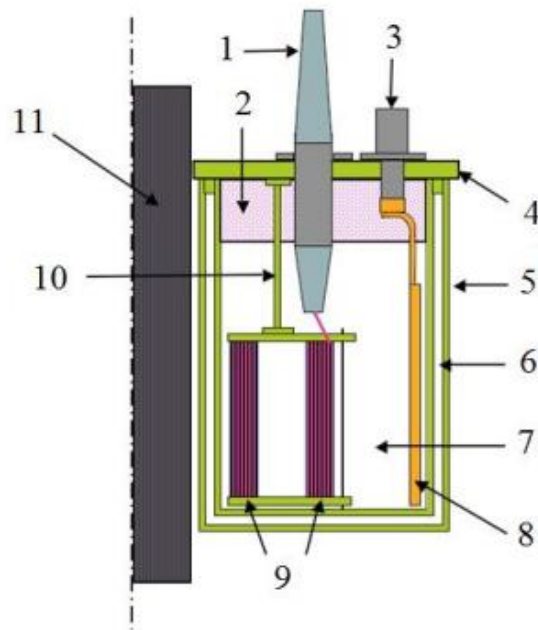


Рисунок 1.9 – Схематичний пристрій ВТНП трансформатора: 1 – струмовід первинної обмотки; 2 – газова подушка; 3 – криокуллер; 4 – кришка; 5 - крио стат; 6 – вакуум; 7 – рідкий азот; 8 – охолоджувальна оболонка; 9 – обмотки; 10 - підтримуюча трубка; 11 - магнітопровід

У світі активно ведуться дослідження щодо розробки НПТ. Так фірма Siemens прагне використовувати можливість виготовлення компактного НПТ, що має невелику вагу і не має масла для застосування на локомотивах. Так як звичайні тягові трансформатори мають високі втрати, застосування НПТ виявляється вигідним вже за невеликої потужності.

Інші фірми, такі як Waukesha Electric приваблює велика перевантажувальна здатність без старіння і невеликі розміри. Фірма АВВ

своєю метою ставить створення пристрою, що поєднує здатність обмеження аварійних струмів, наявність зменшеного реактивного опору та низьких втрат. Розробка НПТ з струмообмежувальною функцією також ведуться в Японії [7-9], Німеччини [10] та Нової Зеландії [6]. За деякими даними, силовий трансформатор з ВТНП обмотками потужністю 100 МВА матиме масу 60 т замість 130 т і менші втрати (більш ніж у 3 рази).

Крім високої ефективності та інших характеристик, найважливішою слід вважати низьку вартість термоізоляції і надійність охолоджувальної системи [9]. Як ізоляція обмоток використовується так званий каптон (поліімідна плівка), що володіє хорошими ізоляційними характеристиками та теплопровідністю при малій товщині плівки. Система охолодження НПТ може бути виконана як із примусовою циркуляцією рідкого азоту, так і з природною циркуляцією.

У таблиці 1.2 наведено основні існуючі та реалізовані проекти з НПТ з ВТНП обмотками.

Таблиця 1.2 – Існуючі та проєктовані НПТ [11]

країна/проект	Можливе використання	U, кВ	Число фаз	S, МВА	T, К	Провід	Дата
Німеччина / Siemens	ж/д	5,5/1,1	1ф	0,1	77	Bi2223	1996-2001
Японія /Kyushu Univ.	ПС	6,6/3,3	1ф	0,5	77	Bi2223	-1996
Швейцарія /ABB	ПС	18,7/0,42	3ф	0,63	77	Bi2223	-1997
Японія./ Fukuoka Consortium	ПС	22/6,9	1ф	1	77	Bi2223	-1998
США/SPI	ПС	13,8/6,9	1ф	1	25	Bi2223	-1998
Японія / Super-ACE	ПС	66/6,9	1ф	2	66	Bi2223	-2003
П.Корея/DAPAS	ПС	22,9/6,6	1ф	1	65	Bi2223	-2004
Японія /RTRI	ПС	25/1,2/0,4	1ф	4	66	Bi2223	-2005

Китай/TBEA	ПС	10,5/0,4	3ф	0,63	77	Bi2223	-2005
Німеччина / Siemens	ПС	25/1,4	1ф	1	66	Bi2223	-2006
Японія / University of Nagoya	ПС	22/6,6	1ф	2	77	YBCO	-2009
Нова Зеландія /TRST	ПС	11/0,4	3ф	1	70	YBCO Roebel cable	2010- 2013
США/Smart Grid Demo.	ПС	69/12,47	3ф	28	70	YBCO	2011-
Китай/Baiyin	ПС	10,5/0,4	3ф	0,63	77	YBCO	2011-

У [1] наведено класифікацію НПТ енергетичного призначення (рисунок 1.10). НПТ конструктивно можуть бути виконані з пульсуючим або обертовим магнітним полем, з поперечним або поздовжнім намотуванням надпровідних витків обмоток. НПТ з пульсуючим магнітним полем можуть бути виконані як з нелокалізованим (у просторі) магнітним полем, так і з локалізованим магнітним полем збудження та розсіювання. У НПТ традиційного виконання з пульсуючим магнітним полем з концентричними і чергуються первинної і вторинної обмотками як провідниковий матеріал обмоток використовується низькотемпературний і високотемпературний багатожильний надпровідний провід (БЖНПП) круглого і прямокутного січення. Первинна обмотка таких трансформаторів поєднує в собі функції силової обмотки та обмотки збудження (намагнічування) основного магнітного поля НПТ. Намагнічуюча складова первинного струму в ній є причиною створення сильного некомпенсованого магнітного поля збудження в зоні силових НП обмоток, що знижує струмонесучу здатність цих обмоток і одночасно збільшує втрати у них.

Застосуванням секціонування НП обмоток трансформатора не може бути досягнуто повної компенсації магнітних полів у зв'язку з наявністю в секціях первинної обмотки НПТ некомпенсованих ампервитків збудження.

Внаслідок цього кожна секція НПТ знаходиться в сильному зовнішньому магнітному полі (у полі ампервитків збудження). Для усунення цього недоліку в НПТ з магнітним полем, що пульсує і обертається, виникає необхідність

використання окремої обмотки збудження, в якій протікає реактивний струм збудження, що створює потужне магнітне поле. Окрема обмотка збудження конструктивно розташована близько до магнітопроводу НПТ і віддалена від силових первинної та вторинної обмоток, які не знаходяться в сильному магнітному полі збудження, тому що в первинній обмотці НПТ струм збудження не протікає. Використання окремої обмотки збудження дозволяє локалізувати магнітне поле в зоні її функціонування. У цьому магнітне поле різко падає поза обмотки збудження, тобто. в області розташування секцій силових НП обмоток трансформатора. Відсутність струму збудження безпосередньо в силових обмотках дозволяє створити первинні і вторинні ампервитки обмоток, що повністю компенсують один одного, і зменшити магнітне поле навколо цих обмоток, що призведе до зменшення втрат, збільшення токонесучої здатності та потужності НПТ. У НПТ з окремою обмоткою збудження, остання виконується автономно на необхідне магнітне поле збудження, її розміри та число витків можуть відрізнятись від тих самих параметрів первинної силової обмотки.

На відміну від силових обмоток, обмотка збудження може бути виготовлена з іншого НП матеріалу, виконана кріорезистивною або зі звичайного провідникового матеріалу і функціонувати в теплій зоні (300 К) разом з феромагнітним або неферомагнітним магнітопроводом трансформатора. Залежно від схеми з'єднання окремої обмотки збудження, НПТ з локалізованим магнітним полем можуть бути розділені на НПТ незалежного, паралельного та змішаного збудження. У НПТ незалежного збудження окрема обмотка збудження живиться від незалежного джерела реактивної потужності. У НПТ паралельного збудження окрема обмотка збудження безпосередньо з'єднана паралельно з первинною силовою обмоткою або має з нею автотрансформаторний зв'язок. НПТ змішаного збудження має дві окремі обмотки збудження, які паралельно і послідовно з'єднані безпосередньо з первинною силовою обмоткою. У цьому випадку окремі обмотки збудження можуть мати з первинною обмоткою

трансформаторний зв'язок. У НПТ з пульсуючим і обертовим магнітним полем локалізація магнітного поля розсіювання силових обмоток досягається щільним намотуванням витків (коефіцієнт заповнення обмоток $K_{з.об.} = 1$) локалізованим багатожильним надпровідним проводом (ЛБЖНПП) або нещільним намотуванням.

ЛБЖНПП мають максимальну струмонесучу здатність при мінімальних втратах і витраті над провідникового матеріалу. Особливістю такого проводу є те, що кожна НП жила в ньому знаходиться у власному магнітному полі, створюваному струмом самої жили та локалізованому в її околиці.

Взаємне вплив зовнішніх магнітних полів, створюваних струмами інших НП жил, у ЛБЖНПП зведено до мінімуму. Тому струмонесуча здатність кожної НП жили проводу визначається власним магнітним полем та її власними параметрами. Оптимальною формою ЛБЖНПП слід вважати циліндричну форму дроту. НПТ із щільними силовими обмотками, як провідникового матеріалу витків яких можуть бути використані ЛБЖНПП, найбільш повно задовольняють основні вимоги, що пред'являються до надпровідного електроенергетичного обладнання нового покоління, значно покращають енерго- та ресурсозберігаючі показники НПТ традиційного виконання [1].

Нещільні силові обмотки НПТ з МБНПП виконуються з кроком намотування витків, що визначається з умови максимального ослаблення магнітного зв'язку між витками. Кожен виток обмотки в такому НПТ знаходиться у власному, локалізованому в його околиці, магнітному полі, створюваному струмом, що протікає через нього. Відсутність зовнішнього магнітного поля, створюваного рештою витків СП обмотки трансформатора, різко збільшує струмонесучу здатність витка і всієї обмотки, істотно зменшує втрати в них.

НПТ з нещільно виконаними силовими обмотками з МБНПП також мають переваги перед НПТ традиційного виконання, але поступаються за

тими економічними показниками перспективним НПТ із щільними обмотками з БЖНПП ЛБЖНПП.

НПТ з магнітним полем, що обертається, виконуються з локалізованим магнітним полем збудження і розсіювання. Такі НПТ можуть бути використані для перетворення величини рівня напруги, частоти числа фаз. Локалізоване магнітне поле в них, за аналогією з НПТ з пульсуючим магнітним полем, досягається застосуванням окремої обмотки збудження, щільних силових обмоток з ЛБЖНПП або нещільних силових обмоток з БЖНПП. Магнітне поле збудження, що обертається, може бути створене не тільки за допомогою трифазного змінного струму, але і постійним електричним струмом при просторовому перемиканні елементів НП обмотки на основі безконтактного напівпровідникового перемикача [1].

Надпровідні обмотки НПТ з магнітним полем, що обертається, конструктивно виконуються за аналогією із замкнутими обмотками електричних машин. Замкнена розподілена НП обмотка трансформатора складається з після з'єднаних секцій, витки яких розташовуються на циліндричній поверхні залізного магнітопроводу в пазах. Кожна секція такої обмотки з'єднується з відповідним напівпровідниковим перемикачем керованих напівпровідникових комутаторів (КПК).

НПТ з магнітним полем, що обертається, можуть бути виконані багато обмотковими. При цьому КПК можуть бути приєднані окремо до первинних або вторинних обмоток, а також до обох обмоток НПТ. До НПТ з магнітним полем, що обертається, відноситься НПТ постійного струму, призначенням якого є перетворення постійної напруги однієї величини (більшої або меншої) за допомогою КПК.

Застосування безконтактних, регульованих НПТ постійного струму відкриває широкі перспективи для використання в електроенергетичних системах постійного струму.

На основі НПТ з магнітним полем, що обертається, можуть бути виконані випрямлячі для перетворення, за допомогою напівпровідникових перемикачів,

що входять до КПК, змінної m -фазної напруги (зазвичай $m = 3$) в постійну регульовану напругу. Призначенням інверторів на основі НПТ з магнітним полем, що обертається, є перетворення постійної напруги в змінну m -фазну напругу, здійснене також напівпровідниковими перемикачами, що входять до КПК [1].

Трифазні перетворювачі частоти на основі НПТ з магнітним полем, що обертається, призначені для перетворення трифазної напруги однієї частоти в напругу іншої частоти [1]. Як і у випадку з трансформаторами постійного струму, випрямлячами та інверторами, таке перетворення здійснюється за допомогою напівпровідникових перемикачів, що входять до трьох фазний КПК. НПТ з пульсуючим магнітним полем виконуються з магнітопроводом стрижневої, броньової або тороїдальної конструкції, із залізом або без нього. У разі виконання магнітопроводу без заліза, у НПТ з пульсуючим магнітним полем виникає необхідність застосування окремої обмотки збудження для створення основного магнітного поля трансформатора.

1.4. Кріогенна техніка для охолодження над провідникових пристроїв

Коефіцієнт корисної дії кріогенних установок незмінно покращується протягом багатьох років. Проте, ККД кріоустановок для ВТНП пристроїв, про кріокулерів, зазвичай, становить менше 20 % ККД циклу Карно дорівнює

$$\eta_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (1.1)$$

де T_1 -температура навколишнього середовища (300К);

T_2 - робоча температура (77К).

В ідеальному випадку, коли ККД кріокулера дорівнює 100%, - С -34,5%. Як правило, ККД кріокулерів не перевищує 20%, отже, загальний ККД системи охолодження дорівнює $\eta \approx 7\%$.

Кріокулери, що працюють у температурному діапазоні від 4 до 80 К, діляться на 2 групи:

- рекуперативні (стаціонарна течія), прикладами є установки, що використовують цикли Джоуля – Томпсона, Брайтона, Клода;
- регенеративні (пульсуючий перебіг), прикладами є установки з циклами Стірлінга, Гіффорда-МакМагона, пульсаційні труби.

Останні мають найбільший інтерес з точки зору застосування в силових електротехнічних пристроях.

На даний момент надзвичайно перспективними є роботи зі створення пульсаційних труб, що працюють за циклом Стірлінга, що дозволить досягти більш високого ККД, ніж для кріокулерів, що працюють за циклом Гіффорда-МакМагона. У США та Японії проектується пульсаційні труби з холодопродуктивністю при 77 К у 5 кВт і навіть у 20 кВт [12].

Компанія Stirling Cryogenics пропонує широкий модельний ряд кріокулерів з механічним приводом, що працюють за циклом Стірлінга, ККД яких більш ніж в 1,5 рази вище, ніж у кріокулерів, що працюють за циклом Гіффорда-МакМагона. Відмінною особливістю кріокулерів Stirling Cryogenics є їх модульна конструкція, якщо кріокулер типу LPC-1RL складається з одного модуля з холодопродуктивністю в 1 кВт при температурі 77 К, то кріокулер LPC-8RL включає вісім таких модулів, і його холодовиробник ність при 77 К досягає 8 кВт. За рахунок модульності досягається зручність у монтажі та технічному обслуговуванні [12]. Компанія Stirling Cryogenics розробила кілька сімейств кріокулерів з різними робочими температурами та схемами охолодження, що дозволяє знайти оптимальне кріогенне рішення для охолодження практично будь-якого ВТНП електротехнічного пристрою. Сімейство кріокулерів LPC FF призначене для створення систем циркуляційного охолодження, в яких рідкий азот з температурою 65-77 До під тиском прокачується через кріостат, що охолоджується. Крім кріокулера до складу системи циркуляційного охолодження входять буферний бак,

газифікатор та криогенний насос для створення надлишкового тиску (рис. 1.10). Криокулери LPC FF успішно використовуються для охолодження кількох ВТНП кабелів [12].



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд системи циркуляційного охолодження Stirling LPC 2 FF (1700 Вт за 77 К)

Криокулери серій LPC RL та LPC T RL використовуються для реконденсації азоту та неону. Криокулери LPC T RL виконані у двоступінчастому виконанні, за рахунок чого досягається робоча температура в діапазоні 26-36 К (для серії LPC RL робоча температура становить 65-77 К). Конструктивно обидві серії криокулерів досить близькі, з охолоджуваним криостатом вони з'єднуються через криогенний трубопровід великого перерізу, по якому газ, що випарувався, надходить в реконденсатор криокулера, а скраплений газ самопливом стікає назад в криостат. Криокулери серії LPC RL широко використовуються для охолодження ВТНП кообмежувачів та інших ВТНП пристроїв з робочою температурою 65-77 К [23].

Остання розробка Stirling Cryogenics – криокулери серії GPC призначені для охолодження до температури 20-30 К шляхом примусової циркуляції теплообмінного газу (гелій). Криокулери серії GPC мають двоступінчасте виконання, кожен із ступенів закінчується теплообмінником для охолодження теплообмінного газу, циркуляція якого за двома замкнутими контурами.

здійснюється за допомогою криогенних насосів. Температура теплообмінного газу в першому контурі становить 80 К, а в другому – 20-30 К. Криокулери серії GPC призначені для охолодження надпровідникових електричних машин та трансформаторів.

У таблиці 1.3 наведено основні характеристики криокулерів різних виробників, для криокулерів двоступінчастого виконання зазначено два значення. Для криокулерів Stirling Cryogenics вказані характеристики мало потужної і найпотужнішої моделі в серії (параметри в дужках).

Таблиця 1.3 - Характеристики криокулерів

Марка криокулера	Робоча температура	Холодопродуктивність	Споживана потужність
Cryomech AL600	80 К	620 Вт	15,5 кВт
Q-drive 2S362K	77 К	1000 Вт	21 кВт
Stirling cryogenics LPC-1FF(LPC-8FF)	77 К	750 Вт (7400 Вт)	12 кВт (98 кВт)
Stirling cryogenics LPC-1RL(LPC-8RL)	77 К	1000 Вт (8000 Вт)	11 кВт (88 кВт)

Потужність криокулера визначається сумарними теплопритоками в криостат і тепловиділеннями в самому криостаті через втрати на гістерезис і вихрові струми. Зменшення теплопритоків в криостат досягається за рахунок удосконалення теплової ізоляції, що є комбінацією теплових екранів і вакуумування. Оптимізація теплопритоку в криостат через опорні та підтримуючі частини досягається за рахунок зменшення їх перерізу та використання матеріалів з невеликою теплопровідністю.

Теплопритоки через струмівводи становлять значну частину від сумарних теплопритоків, тому струмівводи зазвичай виготовляються з бронзи, що має меншу теплопровідність порівняно з міддю.

Висновки по першому розділу

1. Відкриття ВТНП вперше з моменту відкриття явища надпровідності створило серйозні перспективи для широкомасштабного використання надпровідності у великій енергетиці.

2. Найбільш підходящим НП проводом для використання в трансформаторах на даний момент є ВТНП провод другого покоління на основі ітрієвої кераміки, який володіє максимальною щільністю струму і відносно стійкий в сильних електромагнітних полях.

3. У різних наукових центрах активно ведуться дослідження з використання ВТНП в електроенергетиці. Випробувані прототипи показали свою спроможність з технічної точки зору та дозволили уточнити характеристики проводів, які мають бути досягнуті для трансформаторів, що мають економічні, технічні та екологічні переваги.

4. Проте, досліджень, присвячених впливу НРТ на ЕЕС, зокрема на електромагнітні та електромеханічні перехідні процеси, було проведено мало або не проведено взагалі

РОЗДІЛ 2

СКЛАДАННЯ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ РОБОТИ НАДПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА ВЕКТОРНОЇ ДІАГРАМИ ЇЇ РОБОТИ

Втрати активної потужності в обмотках над провідникового трансформатора мають менше значення, ніж у трансформаторі традиційного виконання. Необхідно розглянути втрати, що виникають у НПТ, механізми їх виникнення, і провести порівняння з втратами в традиційному трансформаторі.

При використанні ВТНП проводів в обмотках НПТ змінюються їх габарити. Як наслідок змінюється енергія магнітного поля розсіювання, укладена в обмотках, що своєю чергою позначається на реактивний опір транс-форматора. Необхідно оцінити зміну реактивного опору НПТ щодо традиційного трансформатора з мідними обмотками.

Для оцінки впливу НПТ на нормальні режими роботи необхідно оцінити вплив НПТ на рівень напруги, на перетікання потужностей, величину втрат і т.д. Також необхідно розглянути зміну масогабаритних показників трансформатора у разі використання НПТ.

2.1. Параметри схеми заміщення над провідникового трансформатора

Трансформатори мають значні опори та впливають на втрати енергії в мережі, на відхилення напруги у споживачів і тому повинні враховуватися під час розрахунків та аналізів роботи електричних мереж.

Засобом, що полегшує дослідження електромагнітних процесів в електротехнічних пристроях, є схема заміщення, яка відбиває фізичні процеси, які у пристрої. На рисунку 2.1 наведена Г-подібна схема заміщення трансформатора, що найчастіше використовується в практичних розрахунках ustalених режимів ЕЕС.

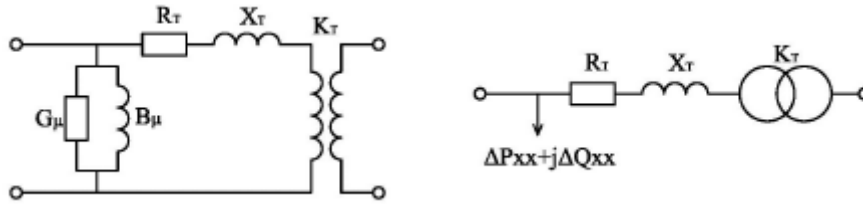


Рисунок 2.1 – Г-подібна схема заміщення трансформатора

На схемі заміщення активний опір R_T відображає тепловиділення при протіканні струму по проводах обмоток трансформатора, X_T - індуктивний опір розсіювання, що залежить від геометричних параметрів обмоток, активна провідність G_μ відображає втрати активної потужності в магнітній системі трансформатора намагнічує потужності трансформатора. Уточнимо параметри схеми заміщення надпровідного трансформатора.

Надпровідники мають нульовий активний опір у надпровідному стані, тому активний опір у схемі заміщення над провідникового трансформатора дорівнює нулеві $R_T = 0$.

Як було показано в п. 1.2 товщина ВТНП стрічки другого покоління мають малою товщиною (близько 1 мм) при великій щільності струму, на 2 порядку перевищує щільність струму в звичайному мідному дроті. Це призводить до того, що при намотуванні витків обмотка НПТ стає вужчою в порівнянні з обмотуванням традиційного трансформатора [13]. Тобто обмотка НПТ займає менший обсяг. Визначимо зменшення індуктивного опору НПТ щодо індуктивного опору звичайного трансформатора у припущенні рівності числа витків обмоток, поперечного перерізу стрижня магнітопроводу та висоти витка обмотки.

На рисунку 2.2 наведено схематичний вигляд обмотки низької напруги (НН), високої напруги (ВН) та діаграма розподілу індукції поля розсіювання.

Індуктивний опір розсіювання визначається виразом [25]

$$X_{T.M} = \frac{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_1}{h} \cdot \left(D_{12} \delta_{12} + \frac{b_1 D_1 + b_2 D_2}{3} \right). \quad (2.1)$$

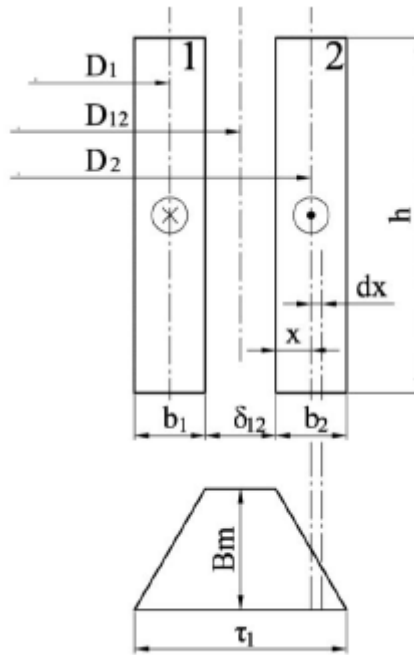


Рисунок 2.2 – До розрахунку індуктивного опору трансформатора

де f – частота; w – число витків; ρ_1 – коефіцієнт Роговського; D_{12} – діаметр середньої лінії між первинною та вторинною обмотками; δ_{12} – проміжок між первинною та вторинною обмотками; D_1 – середній діаметр первинної обмотки; D_2 – середній діаметр вторинної обмотки; b_1 – ширина первинної обмотки; b_2 – ширина вторинної обмотки; h – висота обмотки.

Для НІТ індуктивний опір визначиться

$$X_{T.НІТ} = \frac{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_{1НІТ}}{h} \cdot \left(D_{12НІТ} \delta_{12} + \frac{b_{1НІТ} D_{1НІТ} + b_{2НІТ} D_{2НІТ}}{3} \right). \quad (2.2)$$

У припущенні рівності струму, що протікає по витку обмотки і припущення того, що використовується провід з прямокутним перетином

$$I = j_{np.m} \cdot S_{np.m} = j_{np.nn} \cdot S_{np.nn} = j_m \cdot a_{np.m} \cdot b_{np.m} = j_{nn} \cdot a_{np.nn} \cdot b_{np.nn},$$

де J_m та J_{nn} – щільність струму в мідному та надпровідному проводах відповідно;

$a_{np.m}$ і $a_{np.nn}$ – висота відповідно мідного та надпровідного проводів;

$b_{np.m}$ і $b_{np.nn}$ – ширина відповідно мідного та надпровідного проводів.

Припускаючи, що $a_{np.m} = a_{np.СП}$ можна записати

$$\frac{j_{nn}}{J_m} = k = \frac{b_{np.m}}{b_{np.nn}}, \quad (2.3)$$

де k – показник збільшення щільності струму.

Тоді

$$\begin{aligned} \frac{X_{T.M}}{X_{T.НП}} &= \frac{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_1 h}{2\pi f \mu_0 \pi w^2 \rho_{1НП} h} \cdot \left(\frac{3D_{12M} \delta_{12} + b_{1M} D_{1M} + b_{2M} D_{2M}}{3D_{12НП} \delta_{12} + b_{1НП} D_{1НП} + b_{2НП} D_{2НП}} \right) = \\ &= \frac{\rho_1}{\rho_{1НП}} \cdot \left(\frac{3D_{12M} \delta_{12} + b_{np.m} \cdot n_{шар.u1} D_{1M} + b_{np.m} \cdot n_{шар.u2} D_{2M}}{3D_{12НП} \delta_{12} + b_{np.nn} \cdot n_{шар.u1} D_{1НП} + b_{np.nn} \cdot n_{шар.u2} D_{2НП}} \right) = \\ &= \frac{\rho_1}{\rho_{1НП}} \cdot \left(\frac{3D_{12M} \delta_{12} + b_{np.nn} \cdot k \cdot n_{шар.u1} D_{1M} + b_{np.nn} \cdot k \cdot n_{шар.u2} D_{2M}}{3D_{12НП} \delta_{12} + b_{np.nn} \cdot n_{шар.u1} D_{1НП} + b_{np.nn} \cdot n_{шар.u2} D_{2НП}} \right). \end{aligned}$$

тут $n_{шар.u1} = n_{шар.u2}$ число шарів по ширині відповідно в первинній і вторинній обмотках.

В силу того, що $D_{12M} \approx D_{1M} \approx D_{2M} \approx D_{12НП} \approx D_{1НП} \approx D_{2НП}$ можна записати

$$\frac{X_{T.M}}{X_{T.НП}} = \frac{\rho_1}{\rho_{1НП}} \cdot \left(\frac{3\delta_{12} + b_{np.nn} \cdot k \cdot n_{шар.u1} + b_{np.nn} \cdot k \cdot n_{шар.u2}}{3\delta_{12} + b_{np.nn} \cdot n_{шар.u1} + b_{np.nn} \cdot n_{шар.u2}} \right) \approx k. \quad (2.4)$$

Таким чином, індуктивний опір НПТ зменшується пропорційно збільшенню щільності струму. Як відомо, чим вище номінальна напруга і більше потужність трансформатора, тим вище напруга короткого замикання: потужні трансформатори з напругою 110-500 кВ - в межах 10-15% [26]. У НПТ цей параметр при чисельному рішенні дорівнює 3-6% для відповідних потужностей традиційних трансформаторів. З одного боку, зменшення індуктивного опору призводить до збільшення рівнів струмів короткого замикання, які необхідно знижувати. Але з іншого, величину струму КЗ, що протікає через НПТ, можна знизити використанням функції обмеження струму КЗ, за рахунок «перемикаючого режиму» надпровідника, обумовленого різко

нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ) ВТСП проводу. Дане питання досліджується нижче.

Параметри поперечної гілки схеми заміщення НПТ мають дещо менше значення в силу загального зменшення габаритів трансформатора, і залежить зокрема від варіанту виконання криостата (рисунок 2.3).

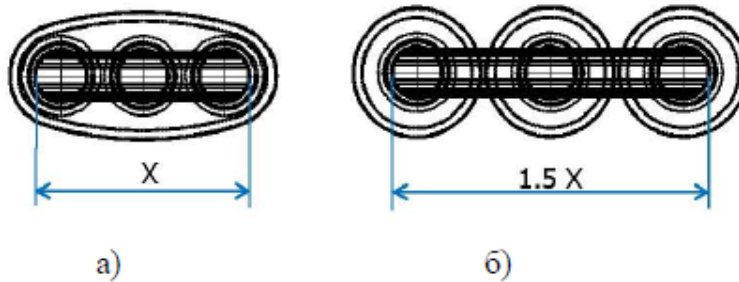


Рисунок 2.3 – Варіанти виконання криостатів

Використання окремих криостатів кожної фази призводить до збільшення розмірів магнітної системи, і, як наслідок, до збільшення втрат у сталі. Загальний криостат на всі три фази зменшує розмір магнітної системи, зменшуючи при цьому втрати сталі.

Варто зазначити, що останнім часом як матеріал магнітопроводу стали використовувати аморфну електротехнічну сталь, що володіє істотно меншими втратами.

2.2. 2.2. Векторна діаграма над провідникового трансформатора та вплив на рівень напруги.

Для більш детального опису електромагнітних процесів в трансформаторі, наведемо Т-подібна схема заміщення трансформатора, яка зображена на рисунку 2.4.

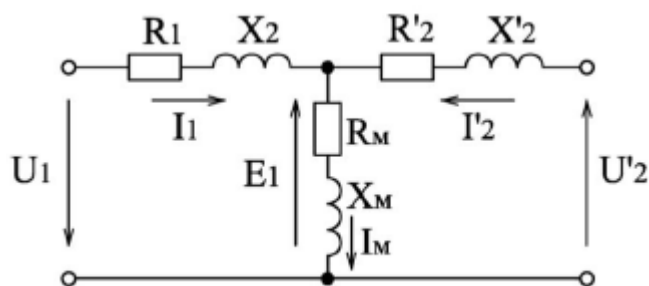


Рисунок 2.4 – Т-подібна схема заміщення трансформатора

На підставі схеми заміщення можна записати рівняння трансформатора, що являють собою баланс напруги і електрорушійних сил (ЕРС), які діють у кожній обмотці [14].

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + (R_M + jX_M)(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + (-\dot{E}_1), \\ -\dot{U}'_2 &= (R'_2 + jX'_2)\dot{I}'_2 + (R_M + jX_M)(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = -\dot{E}_1 + (R'_2 + jX'_2)\dot{I}'_2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Рівняння трансформатора можуть бути вирішені аналітичним або графічним методом. Графічний метод рішення ґрунтується на побудові векторних діаграм. Він є наочнішим і часто використовується для якісного аналізу різних режимів роботи трансформатора.

З метою надання векторної діаграми практичного призначення, в силових трансформаторах, що працюють в режимах близьких до номінального навантаження, нехтують струмом I_M , тобто. вважають, що $I_1 = -I_2$. При такому припущенні схема заміщення трансформатора набуває вигляду, наведеного на рисунку 2.5 [15].

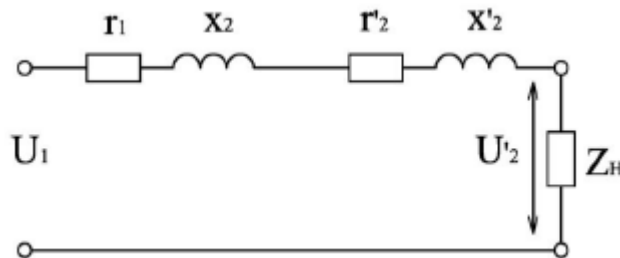


Рисунок 2.5 – Спрощена схема заміщення трансформатора

Схема є найпростішим ланцюгом, що складається з послідовно з'єднаних опорів: $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$, $Z_{\text{н}}$. Напруга на виводах трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta\dot{U}, \quad (2.6)$$

де ΔU – падіння напруги на трансформаторі.

Відповідно до спрощеної схеми заміщення на рисунку 2.6 побудовано спрощені векторні діаграми при активно-індуктивному навантаженні.

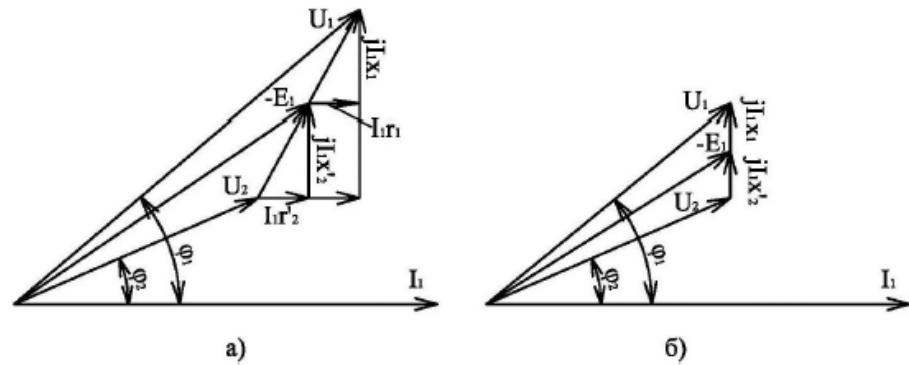


Рисунок 2.6 – Спрощені векторні діаграми звичайного трансформатора(а) та НПТ(б)

З діаграм видно, що у випадку з надпровідниковим трансформатором падіння напруги має менше значення через відсутність активного опору та меншого значення індуктивного опору, що позитивно позначається на рівні напруги.

Залежність напруги на вторинній обмотці трансформатора від струму навантаження $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ і $\cos \varphi_2 = \text{const}$ називається зовнішньою характеристикою. З (2.6) випливає, що зі зміною струму у вторинній обмотці (струму навантаження I_2) напруга на вторинній обмотці змінюється. Значення напруги на вторинній обмотці визначається переважно не падінням напруги, а втратою напруги в обмотках. Втрата напруги є арифметична різниця між первинною і наведеною вторинною напругою і визначається за виразом

$$U_2 = U_1 - \Delta U_2 = U_1 - I_1 (R_T \cos(\varphi_2) + X_T \sin(\varphi_2)). \quad (2.7)$$

На рисунку 2.7 показані зовнішні характеристики для звичайного трансформатора та НПТ з $U_{\text{кз.м}} = 10,5\%$ та $U_{\text{кз.нп}} = 5\%$ відповідно при $\cos \varphi = 0,8$.

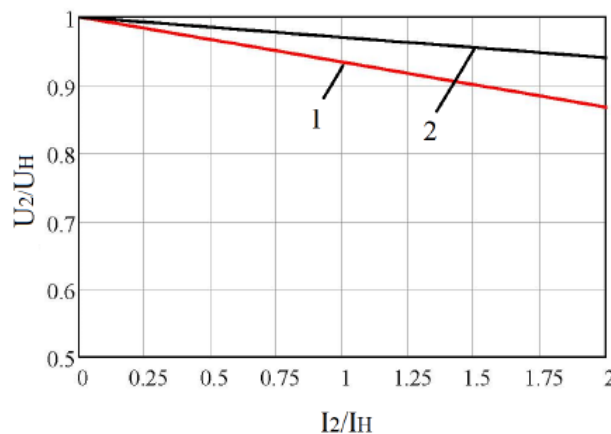


Рисунок 2.7 – Зовнішні характеристики звичайного трансформатора (1)
та НПТ(2)

На величину падіння напруги також впливає характер навантаження (активно-індуктивний, активно-ємнісний). На рисунку 2.8 наведено залежність зміни напруги трансформатора потужністю 40 МВА від характеру навантаження.

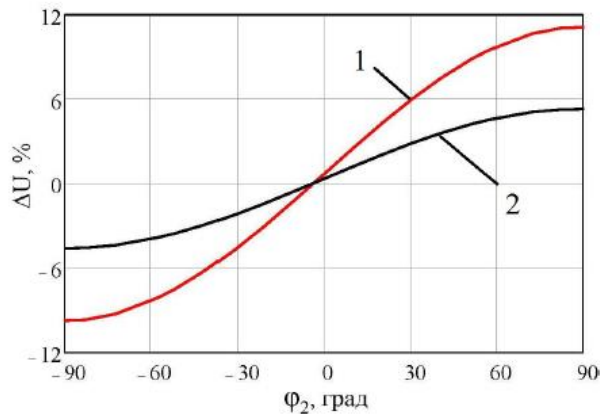


Рисунок 2.8 – Зміна напруги залежно від характеру навантаження для звичайного трансформатора(1) та для НПТ(2)

Таким чином, НПТ позитивно впливає на рівень напруги, викликаючи менше падіння напруги. Або інакше кажучи у випадку з НПТ змінюється коефіцієнт трансформації трансформатора (зменшується). Ця обставина дозволяє або відмовитися від використання пристрою регулювання під навантаженням (РПН) або використовувати пристрій РПН із меншою кількістю відгалужень.

При зміні коефіцієнта трансформації одного трансформатора змінюються як первинне, і вторинне напруги. Зазвичай первинна напруга змінюється трохи, т.к. його зміна пов'язана лише зі зміною потоку реактивної потужності трансформатора. Якщо коефіцієнт трансформації підвищує трансформатора змінюється отже випуск реактивної потужності в мережу зростає, то напруга вищому боці збільшується незначно. Зміна потоку реактивної потужності тільки в одному трансформаторі не може суттєво змінити напругу в основній мережі. Напруга на вторинному боці помітно зміниться відповідно до зміни коефіцієнтом трансформації. Масова зміна коефіцієнта трансформації може

суттєво змінити рівень напруги в основній мережі. Одночасна масова і однакова зміна коефіцієнта трансформації у всіх підвищувальних і понижуючих трансформаторів призводить до лише незначної зміни вторинних напруг при істотній зміні первинної напруги в мережі. При масовому впровадженні трансформаторів із зміненим коефіцієнтом трансформації необхідно виходити з підтримки на вторинному боці оптимальної напруги.

Висновки по другому розділу

1. Надпровідникові трансформатори, в силу конструктивних особливостей, пов'язаних з архітектурою НП проводів, мають менші індуктивні опори. Як наслідок, ця обставина викликає менше падіння і втрату напруги на трансформаторі.

2. Активний опір НРТ дорівнює нулю, однак, необхідні витрати потужності на підтримання низької температури, або іншими словами, на відведення тепла з криогенної області температур область кімнатної температури.

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІЧНІ ЕФЕКТИ ВІД ВИКОРИСТАННЯ НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

3.1. Втрати енергії в над провідниковому трансформаторі

При протіканні змінного струму по високо температурному провіднику в останньому виникають різні втрати. Існують теорії та інженерні формули для опису цих втрат, наприклад [16] та [17]. Також існує методика, описана в [18], для проводів круглого перерізу. Всі ці теорії поєднує те, що втрати залежать від напрямку і величини змінного магнітного поля і від струму, що протікає. Розглянемо основні складові втрат у НПТ із обмотками на основі ВТНП проводів другого покоління.

Змінне магнітне поле спричиняє втрати у ВТНП проводах. Залежно від джерела магнітного поля втрати можуть бути розділені на втрати від власного поля і втрати від зовнішнього поля. Втрати від власного поля викликаються власним магнітним полем струму, що протікає, а втрати від зовнішнього поля викликаються полями розсіювання обмоток.

Як формула для обчислення втрат від власного поля може бути використана формула, наведена в [19]

$$\Delta P_{НПТ}(I_t) = \frac{I_c \mu_0 f}{\pi} \cdot \left(\left(1 - \frac{I_t}{I_c}\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{I_t}{I_c}\right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c}\right)^2 - \left(\frac{I_t}{I_c}\right)^2 \right), \quad (3.1)$$

де $\Delta P_{НПТ}$ – втрати від особистого поля; I_t – транспортний струм; I_c – критичний струм; μ_0 – магнітна проникність пустоти; f – частота.

Транспортний струм I_t – максимальний струм в кожному провіднику. Для первинної обмотки маємо

$$I_t = I_{ВН\max} / n_{ВН},$$

де $I_{ВН\max}$ – максимальний струм в первинній обмотці; $n_{ВН}$ – число проводів в витку.

Варто зазначити, що вираз (2.1) наведено для одиничного проводу. У витку, набраному з паралельних проводів, змінюється розподіл магнітного

поля всередині витка і реальні втрати відрізняються від втрат, обчислених за формулою (2.1). Повні втрати від власного поля

$$\Delta P_{НП} = 3(n_{шар.ВН} \cdot k \cdot \Delta P_{НП}(I_{ВН}) + n_{шар.НН} \cdot k \cdot \Delta P_{НП}(I_{ВН})) , \quad (3.2)$$

де $n_{шар.ВН}$ і $n_{шар.НН}$ – число шарів відповідно в первинній і вторинній обмотках; k – коефіцієнт, який враховує збільшення втрат при паралельній намотці проводів.

В [19] показано зміна втрат в залежності від конструкції, числа паралельних проводів, так для 25 паралельних проводів втрати збільшуються в 50 раз. На рисунку 3.1 наведено залежність коефіцієнта збільшення втрат від кількості паралельних проводів.

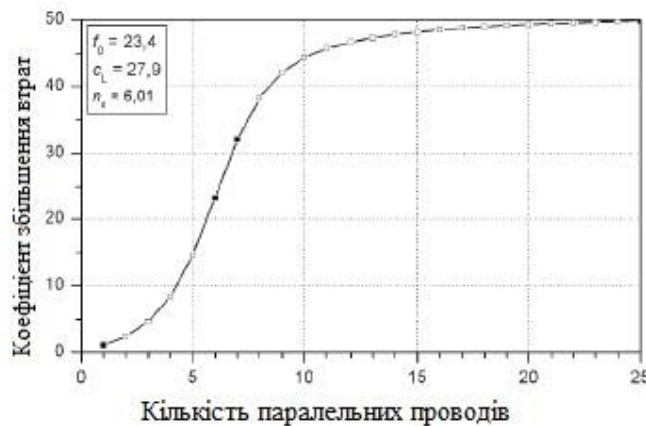


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнт збільшення втрат від кількості проводів, намотаних паралельно [19]

Змінне магнітне поле викликає втрати від зовнішнього поля у ВТНП проводах. Внаслідок великої анізотропії, магнітне поле, перпендикулярне поверхні ВТНП стрічки (див. рисунок 3.3) призводить до значно більших втрат, ніж втрати, створювані паралельним полем, і мають превалюючий характер.

Втрати на гістерезис від зовнішнього поля, створені перпендикулярною складовою, визначаються виразом [20] (на одиницю довжини)

$$\Delta P_{ВП.r}(B_r(r,z)) = \frac{f\pi b^2 (B_r(r,z))^2}{\mu_0} \cdot \left(\frac{B_r(r,z)}{B_C} \right), \quad (3.3)$$

$$g(x) = \frac{1}{x} \pi \left(\frac{2}{x} \ln(\cosh(x)) - \tanh(x) \right),$$

тут b – ширина зразка; $B_C = \mu_0 I_C / (\pi b)$ – критичне поле.

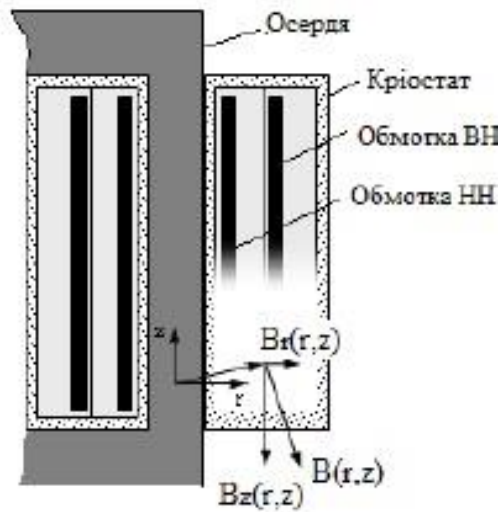


Рисунок 3.3 – До визначення складових магнітного поля

Для визначення втрат на гістерезис в надпровідниках в подовжньому полі використовується вираз [20]

$$\Delta P_{ВП.z}(B_z(r,z)) = \begin{cases} \frac{2ftb(B_z(r,z))^3}{3\mu_0 B_p}, & (B_z(r,z)) \leq B_p \\ \frac{2ftb(3B_z(r,z) - 2B_p)}{3\mu_0 B_p}, & (B_z(r,z)) > B_p, \end{cases} \quad (3.4)$$

де $B_C = \mu_0 j_c t$, тут t – товщина ВТНП стрічки.

Втрати на вихрові струми, наведені у нормальних шарах ВТНП проводи, обчислюються за виразом [21]

$$\Delta P_{ВП.Вихр}(B_r(r,z)) = \frac{\pi^2 (f B_r(r,z))^2 b^3 d_s}{6 \rho_s}. \quad (3.5)$$

Вихрові втрати, викликані поздовжньою складовою поля можна знехтувати через форму проводів.

Загальні втрати від зовнішнього магнітного поля як сума втрат у кожному витку обмотки

$$\Delta P_{ВП} = \sum_i \sum_j [l_B(r_i, z_j) (\Delta P_{ВП,r}(B_r(r_i, z_j)) + \Delta P_{ВП,z}(B_z(r_i, z_j)) + \Delta P_{ВП,Вихр}(B_r(r_i, z_j)))]$$

де l_B – довжина витка.

Теплові притоки в кріостат трансформатора через вводи розраховуються відповідно до виразу

$$Q_{Ввод} = \frac{I^2}{A_{Ввод}} \int_0^L \rho_{Ввод}(x) dx + A_{Ввод} \lambda_{Ввод}(T) \frac{dT}{dx}, \quad (3.6)$$

де I – струм, який протікає по вводам;

L – довжина вводу;

$\rho_{Ввод}$ – питомий опір вводу;

$A_{Ввод}$ – площа поперечного перерізу;

$\lambda_{Ввод}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу вводу;

T – температура.

Слід зазначити, що через стінки кріостата також відбуваються теплопритоки. Відповідно до [19] теплопритоки для кріостата, виконаного зі склопластику, становлять близько 2 Вт/м².

Сумарні втрати у НПТ

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{СТ} + \frac{(\Delta P_{ВП}(I) + \Delta P_{НП}(I) + \Delta P_{Ввод}(I) + \Delta P_{Крікулер})}{\eta_{Крікулер}}, \quad (3.7)$$

де $\eta_{Крікулер}$ – ККД крікулера.

Розрахунок втрат у НПТ є досить важким завданням і з метою спрощення доцільно задаватися деякою простою функцією. Так у [21] наведено висловлювання для відшукування втрат у НПТ щодо втрат у звичайному трансформаторі.

Втрати в традиційному трансформаторі при номінальному навантаженні 1 в.о.

$$\Delta P(P) = 0,91P^2 + 0,09, \quad (3.8)$$

тут P - навантаження, яке перетікає через трансформатор;

0,09 – втрати холостого ходу.

Для НПТ відносно втрат в традиційному трансформаторі [21]

$$\Delta P(P) = 0,149P^3 - 0,091P^2 + 0,012P + 0,08, \quad (3.9)$$

тут P - навантаження, яке перетікає через трансформатор;

0,08 – втрати холостого ходу.

На рисунку 3.4 показані залежності втрат у звичайному та надпровідниковому трансформаторах, отримані за (3.8) та (3.9).

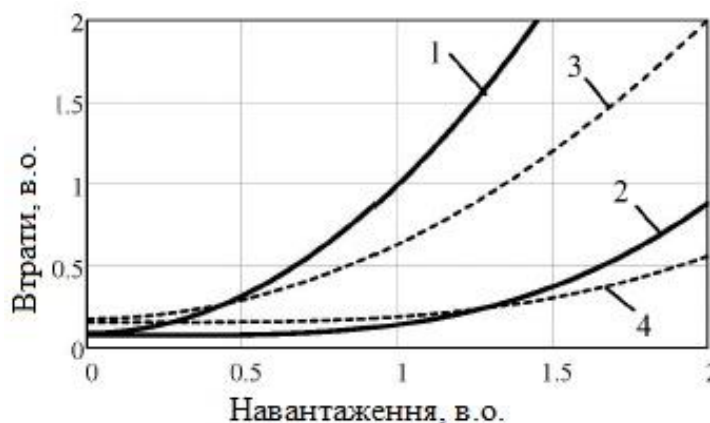


Рисунок 3.4 – Втрати у звичайному та НП трансформаторах: 1 – звичайний трансформатор; 2 – НПТ; 3 – два звичайні трансформатори; 4 – два НПТ

Навантаження, при якому доцільно відключати один із трансформаторів визначається умовою рівності втрат потужності при k та $k-1$ трансформаторах.

Втрати для $k-1$ трансформаторів

$$\Delta P_T = (k-1)\Delta P_{XX} + \frac{1}{k-1} \frac{\Delta P_K S^2}{S_{НОМ}^2}.$$

Границя інтервалів знаходиться як точка перетину кривих для k і $k-1$ трансформаторів. Гранична потужність [22]

$$S_K = S_{НОМ} \sqrt{\frac{\Delta P_{XX} k(k-1)}{\Delta P_K}}$$

Очевидно, що якщо у разі використання звичайних трансформаторів економічно вигідніше використання 2-х трансформаторів при коефіцієнті завантаження 0,5-0,6 в.о, то у разі використання НПТ економічно вигідніше використання 2-х трансформаторів при більшому значення коефіцієнта завантаження. Причому втрати в одному НПТ можуть бути меншими, ніж втрати у двох звичайних трансформаторах (при коефіцієнті завантаження ≥ 1).

3.2. Можливості паралельної роботи НПТ із звичайним трансформатором

Для паралельної роботи двох трансформаторів потрібна рівність напруги короткого замикання, первинних та вторинних напруги, тотожність груп з'єднань обмоток. Як було показано вище НПТ має менший імпеданс. Досягти рівності напруги короткого замикання НПТ і традиційного трансформатора можна було б створенням додаткового каналу розсіювання. Однак, цей захід призводить до зниження величини критичного струму, через збільшення поля розсіювання, що, отже, робить нецільовим використання даного заходу [40]. Більш того, необхідно максимально зменшувати поле розсіювання для підвищення економічного ефекту від використання НП проводів як обмотувальний матеріал. Таким чином, паралельна робота НПТ та традиційного трансформатора стає неможливою. У зв'язку з цим найбільш доцільним є спосіб роботи, при якому в нормальному режимі включений СПТ, а звичайний трансформатор вимкнено (рисунок 3.5).

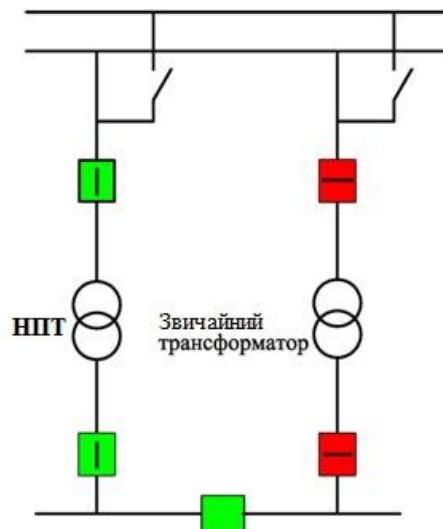


Рисунок 3.5 – Паралельна робота НПТ та звичайного трансформатора

Увімкнення звичайного трансформатора здійснюється у разі виникнення проблем, пов'язаних із поверненням НПТ після усунення короткого замикання або інших проблем. Очевидно, що встановлення НПТ на підстанції з двома трансформаторами є доцільним при заміні старого трансформатора, який виробив експлуатаційний термін служби або при заміні пошкодженого трансформатора.

3.3. Порівняльний аналіз габаритних показників трансформаторів

Питома одинична потужність трансформатора обмежується масою, розмірами, умовами транспортування. Так, для великих трансформаторів з напругою ВН 500 кВ доводиться виготовляти однофазні трансформатори з метою транспортабельності трансформатора.

НПТ дозволяють по-іншому подивитись цю проблему, т.к. використання надпровідників дозволяє знизити масогабаритні показники трансформатора. Проведемо порівняння габаритних показників НПТ та звичайного трансформатора з позиції ЕРС витка трансформатора, т.к. Цей параметр безпосередньо впливає на обсяг використовуваних матеріалів у трансформаторі. Порівняння проведемо активних елементів трансформатора, тобто для магнітопроводу та обмоток.

ЕРС витка трансформатора визначається наступним виразом [41]

$$u_B = 4,44 f B_C P_C , \quad (3.10)$$

де f - частота;

B_C – індукція в стрижні;

P_C - площа поперечного перетину стрижня.

Звідки площа поперечного перерізу стрижня

$$P_C = \frac{u_B}{4,44 \cdot f B_C} . \quad (3.11)$$

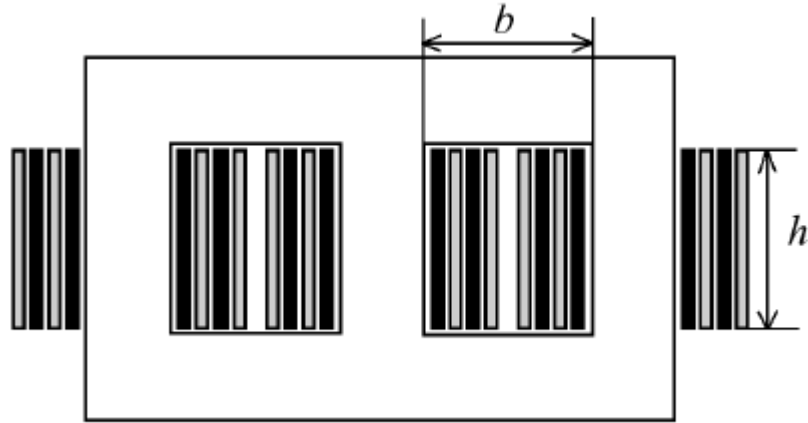


Рисунок 3.6 – До розрахунку габаритів активної частини трансформатора
Об'єм магнітопроводу, припущення рівності поперечного перерізу стрижня і ярма дорівнює

$$V_{CT} = P_C \cdot \left(3h + 4b + 6\sqrt{\frac{4P_C}{\pi}} \right). \quad (3.12)$$

Визначимо площу поперечного перерізу витка

$$P_B = \frac{I}{j}, \quad (3.13)$$

де I – номінальний струм;

j – щільність струму.

Тоді об'єм обмоток визначиться як:

$$V_{OB} = 3 \cdot \left(\frac{I_1 N_1}{j} \cdot 2\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{4P_C}{\pi} + \frac{a_1 b}{10}} \right) + \frac{I_2 N_2}{j} \cdot 2\pi \cdot \left(\sqrt{\frac{4P_C}{\pi} + \frac{a_2 b}{10}} \right) \right). \quad (3.13)$$

де N – число витків;

a_1 та a_2 - коефіцієнти, що показують віддаленість від краю вікна магнітопроводу до центру відповідно первинної та вторинної обмоток.

Коефіцієнти a_1 та a_2 для кожного трансформатора мають своє значення та розраховувалися окремо для кожного випадку.

Для трансформатора потужністю 40 МВА орієнтовний діаметр стрижня становить $d = 0,6$ м, і при індукції в стрижні 1,5 Тл ЕРС витка дорівнює $u_B = 94$

В. Для трансформатора потужністю 80 МВА $d = 0,6$ м, $u_B = 130$ В. Для трансформатора потужністю 125 МВА $d = 0,6$ м, $u_B = 130$ В.

Загальний об'єм активної частини трансформатора буде складати

$$V_T = V_{OB} + V_{CT}.$$

На рисунках 3.7 та 3.8 наведено залежності об'єму активних частин НПТ та звичайного трансформаторів від ЕРС витка. Залежно наведено для трьох потужностей 40 МВА, 80 МВА, 125 МВА зі співвідношенням напруги 115/11 кВ.

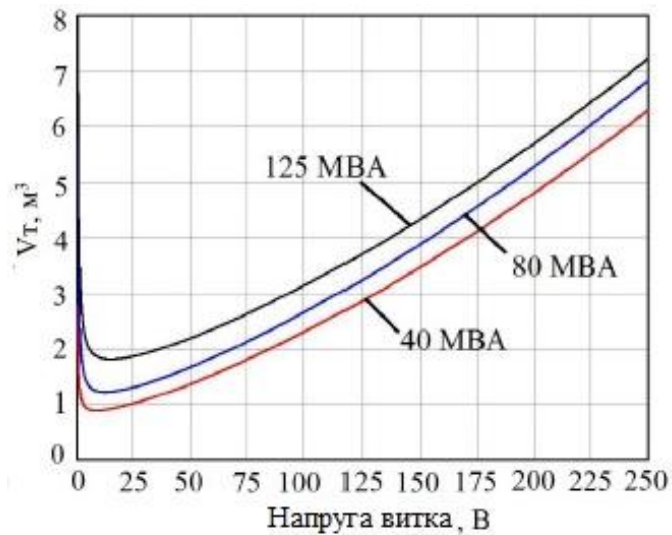


Рисунок 3.7 – Залежність об'єму НПТ від ЕРС витка

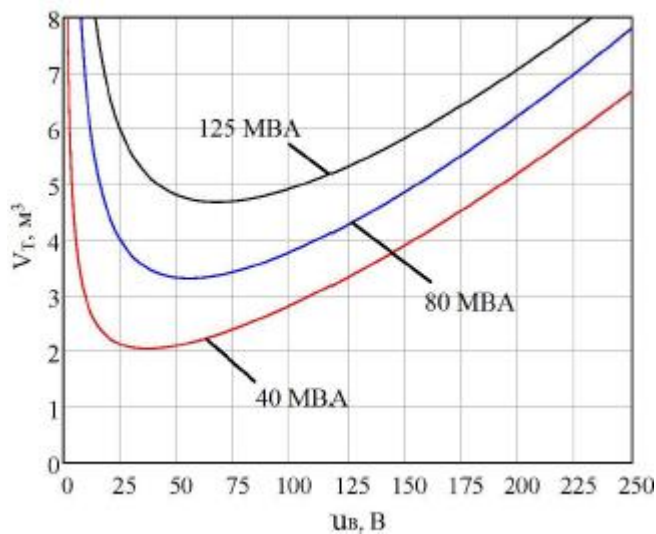


Рисунок 3.9 – Залежність об'єму звичайного трансформатора від ЕРС витка.

З рисунків видно, що у разі використання НП обмоток об'єм активної частини трансформатора зменшується на одну третину. У додатку до цього необхідно зазначити, що у випадку з НПТ зменшується об'єм охолоджуючої рідини внаслідок того, що рідкий азот занурені тільки обмотки, а магнітопровід функціонує при кімнатній температурі. Отже, маса НПТ знижується приблизно вдвічі.

Також з рисунків видно, що НПТ можливо оптимізувати з позиції найменшої витрати НП матеріалів, що дозволяє знизити ціну НПТ.

Висновки по третьому розділу

В даному розділі показано, що:

1. Втрати в одному НПТ можуть бути меншими, ніж втрати у двох звичайних трансформаторах.
2. Виконано оцінку масогабаритних показників НПТ, які знижуються приблизно вдвічі.
3. Заміна великої кількості звичайних трансформаторів на НПТ може призвести до відчутного збільшення реактивної потужності в мережі, а отже, до підвищення напруги в електричній мережі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основні результати кваліфікаційної роботи полягають у наступному:

1. Показано позитивний вплив надпровідникових трансформаторів на робочі режими ЕЕС, зниження втрат електроенергії супроводжується підвищенням рівня напруги, а також збільшенням межі потужності, що передається. Поздовжні та поперчені параметри схеми заміщення надпровідникових трансформаторів зменшуються. Активний опір дорівнює нулю, індуктивний опір знижується пропорційно до збільшення щільності струму. Зменшення параметрів поперечної гілки визначається конструктивним виконанням криостата(ів) трансформатора. Масогабаритні показники надпровідних трансформаторів знижуються вдвічі порівняно зі звичайними масляними трансформаторами.

2. Надпровідникові трансформатори значно підвищують динамічну стійкість ЕЕС, якщо активний опір під час перехідного процесу забезпечує таку характеристику потужності в аварійному режимі, коли остання близька до доаварійної. Поява активного опору великої величини небажана як з позиції збереження стійкості, і з позиції успішного повернення надпровідникового трансформатора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лутідзе Ш.І., Джафаров Е.А. Надпровідні трансформатори. - М: Научтехлігіздат, 2002. - 206 с.
2. Батенін В.М. Надпровідникова електроенергетика/В.М. Батенін, В.В. Жовтов, С.С. Іванов, С.І. Копилов, С.В. Самойленков // Вісті академії наук. Енергетика. - 2011. - №5. - С. 79-87.
3. Ковальов Л.К. Зарубіжні та російські розробки в галузі створення надпровідникових електричних машин та пристроїв / Л.К. Ковальов, К.Л. Ковалев, І.П. Колчанова, В.М. Полтавець // Вісті академії наук. Енергетика. - 2012. -№6. - С. 3-26.
4. Волков Е.П. Перехідні процеси в обмежувальному пристрої на основі ВТСП проводів другого покоління / Е.П. Волков, Л.С. Флейшман, В.А. Мальгін, А.В. Мальгінов // Вісті академії наук. Енергетика. – 2009. – №2. - С. 64-76.
5. Єлагін П.В. Надпровідникові кабелі – реальні контури майбутньої енергетики / П.В. Єлагін // Новини електротехніки [Електронний ресурс]. - 2005. - № 4 (34). - Режим доступу: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/34/14.php>.
6. Glasson N. Development of 1 MVA 3-phase superconducting transformer using YBCO Roebel cable /N. Glasson, M. Staines, R. Buckley. M. Pannu, S. Kalsi // IEEE/CSC&ECAS European superconductivity news forum. – 2011. – № 15.
7. Kotari M. Development of 2 MVA class superconducting current limiting transformer with YBCO coated conductors // M. Kotari. H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo, H. Okubo // IEEE/CSC&ECAS European superconductivity news forum. –2010.– № 11.
8. Kurupakorn C. Development of high temperature superconducting fault current limiting transformer with Bi2212 bulk coil // C. Kurupakorn, N. Hayakawa, N. Kashima, S. Nagaya, M. Noe, K.-P. Juengst, H. Okubo // IEEE Transaction on applied superconductivity. – 2004. –vol.14, no 2. – pp. 900-903.

9. Iwakuma M. Development of REBCO superconducting transformer with current limiting function / M. Iwakuma, A. Tomioka, T. Otonari et.al. // IEEE Transaction on applied superconductivity. – 2011. –vol.21, no 3. – pp. 1405-1408.
10. Berger A. Test results of 60 kVA current limiting transformer with full recovery under load / A. Berger, M. Noe, A Kudymow // IEEE Transaction on applied superconductivity. – 2011. –vol.21, no 3. – pp. 1384-1387.
11. Надпровідники в електроенергетиці [Електронний ресурс] // М, 2011. - Режим доступу: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/index.php>.
12. Щербаков В.І., Лобинцев В.В. Криогенне обладнання для надпровідникових електротехнічних пристроїв // Інформаційний бюлетень "Надпровідники для електроенергетики". - М: НДЦ Курчатовський університет, 2008. - Т.5, №1. - С. 7-11.
13. Nitta T. Some considerations on superconducting transformers from a design point of view / T. Nitta, K. Misawa, H. Nomura // IEEE Transactions on magnets. – July 1996. – vol. 32, no 4. – pp. 2381-2384.
14. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
15. Костенко М.П., Пиотровский Л.М., Электрические машины. В 2-х ч. Ч.1–Машины постоянного тока. Трансформаторы. –Л. Энергия, 1972. – 544 с.
16. Carr W. J. Ac loss from the combined action of transport current and applied field // IEEE Transactions on Magnetics. - Jan 1979. - vol. 15.- pp. 240-243.
17. Kawabata S. Standardization of the pickup coil method for ac loss measurement of three-component superconducting wires / S. Kawabata, H. Tsuzura, Y. Fukuda, K. Funaki, K. Osamura // Physica C: Superconductivity. – 2003. – vol. 392-396, no. Part 2. – pp. 1129 – 1133.
18. Лутидзе Ш.И., Джафаров Э.А. Потери в сверхпроводящем трансформаторе // Приборы и системы управления. – 1999. – №10. – С. 30-32.
19. Berger A. Comparison of the efficiency of superconducting and conventional transformers / A. Berger, S. Cherevatskiy, M. Noe, T. Leibfried // Journal of Physics: Conference Series 234 (2010).

20. Brandt E., Indenbom M. Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field // *Physical Review B*. – 1993. – vol. 48, no. 17. – pp. 12893- 12906.
21. Namjoshi K. Biringer P. Low-Frequency Eddy-Current Loss Estimation in Long Conductors by Using the Moment of Inertia of Cross Sections // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1988. – vol. 24 no. 5. – pp. 2181-2185.
22. Sykulski J.K., Stoll R.L. The design, construction and operation of high temperature superconducting transformers practical considerations // *CIGRE 2000*. – 12- 203.