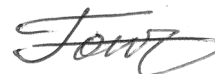


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**ГОНЧАРОВ ЄВГЕН ВІКТОРОВИЧ**



УДК 621.316.9

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ  
НАДПРОВІДНИКОВОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ КОРОТКОГО  
ЗАМИКАННЯ ІНДУКТИВНОГО ТИПУ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі загальної електротехніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Данько Володимир Григорович,**  
Національний технічний університет  
“Харківський політехнічний інститут”,  
завідувач кафедри загальної електротехніки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Сосков Анатолій Георгійович,**  
Харківський національний університет міського  
господарства ім. О.М. Бекетова,  
завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки

кандидат технічних наук, доцент  
**Жорняк Людмила Борисівна,**  
Запорізький національний технічний університет,  
доцент кафедри електричних та електронних апаратів

Захист відбудеться 03 березня 2016 р. о 12<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Багалія, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Багалія, 21.

Автореферат розісланий 31 січня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юр'єва О.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Протягом останніх років проводиться інтенсивна робота з розроблення і впровадження надпровідникового обладнання у електроенергетичну галузь. Надпровідні обмежувачі аварійних струмів можуть використовуватися замість масляних вимикачів, силових плавких вставок, піротехнічних захисних пристроїв, перевершуючи останні з таких технічних параметрів, як швидкість спрацьовування та витрати енергоспоживання.

Впровадження надпровідного обмежувача струму є одним з перспективних способів використання явища надпровідності для ефективного обмеження струмів короткого замикання. Надпровідний обмежувач струму вмикається у частину мережі, і передбачає захист при аварійних режимах. Перевага застосування надпровідних струмообмежувачів полягає у зменшенні ваги, розмірів і вартості електроенергетичного устаткування, можливості використання автоматичних вимикачів з більш низькими характеристиками переривання струму і застосуванні більш ефективних схем роботи електромережі. Активне розроблення обмежувачів струму на основі високотемпературних надпровідних матеріалів проводиться у технічно розвинених країнах Європи, США, Китаї та ін.

Таким чином, науково-практична задача з впровадження таких пристроїв потребує подальшого теоретичного аналізу, розробки економічних конструктивних рішень спрямованих на підвищення енергозбереження, покращення масогабаритних показників, а також зниження до безпечного рівня негативних факторів, що діють на надпровідні елементи є актуальною та визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі загальної електротехніки НТУ "ХПІ" у рамках завдань прикладних держбюджетних НДР МОН України "Теоретично-експериментальні дослідження, спрямовані на використання високотемпературних надпровідникових матеріалів в електроенергетичних пристроях" (ДР №0106U001468) і "Підвищення ефективності роботи обмежувача струму короткого замикання завдяки використанню високотемпературних надпровідників 2-го покоління" (ДР № 0109U002376), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів і відповідальним виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – розробка теоретичних і схемних рішень для підвищення параметрів обмежувача струму короткого замикання за рахунок використання надпровідних елементів другого покоління.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану виробництва надпровідних обмежувачів струму короткого замикання і проблем, які при цьому виникають;
- покращити експлуатаційні параметри надпровідникового обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу за рахунок нового конструктивно-технічного рішення;

– розробити математичну модель електромагнітних перехідних процесів обмежувача струму при короткому замиканні, яка враховує особливості його роботи;

– запропонувати методику розрахунку основних параметрів пристрою відповідно до потрібного рівня обмеження струму короткого замикання;

– провести експериментальні дослідження для перевірки основних теоретичних положень з використанням макету обмежувача струму.

*Об'єктом дослідження* є електромагнітні процеси в надпровідниковому обмежувачі струму короткого замикання індуктивного типу.

*Предмет дослідження* – обмежувач струму короткого замикання, який використовує високотемпературні надпровідники.

**Методи дослідження.** Покращення електромагнітних характеристик та параметрів обмежувачів струму короткого замикання здійснене за рахунок застосуванням високотемпературних надпровідників другого покоління і використанням сучасних електротехнічних матеріалів. Дослідження розподілу магнітного потоку здійснювалось математичним моделюванням методом кінцевих елементів. Еквівалентна магнітна проникність високотемпературної надпровідної обмотки визначена інтегруванням магнітного опору з урахуванням геометрії ділянок проходження магнітного потоку чисельними методами. Методи теорії електричних апаратів використані для розробки математичної моделі на базі вирішення диференційних рівнянь перехідного процесу у електромережі при виникненні короткого замикання.

Методика розрахунку параметрів магнітної системи обмежувача струму короткого замикання базується на коефіцієнті спаду напруги і критичних параметрах надпровідних екрану і обмотки. Експериментальні методи спрямовані на дослідження можливостей надпровідників другого покоління, втрат потужності у осерді обмежувача струму, обмеження струму короткого замикання обмежувачем індуктивного типу.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше розроблена конструктивна схема індуктивного високотемпературного надпровідного обмежувача струму короткого замикання з надпровідними обмоткою та екраном з криогенним охолодженням усієї магнітної системи (патент України № 107531);

– удосконалена методика розрахунку конструктивних параметрів надпровідникового обмежувача струму короткого замикання, пов'язану з коефіцієнтом спаду напруги, що орієнтована на розрахунок базових технічних параметрів магнітної системи з урахуванням критичних параметрів надпровідного екрану і надпровідної обмотки;

– удосконалена методика розрахунку еквівалентної магнітної проникності надпровідної обмотки, що враховує геометричні параметри проводу і засіб його намотки; це дозволяє спростити розрахунок магнітного поля у номінальному режимі, та визначити коефіцієнт спаду напруги;

– отримала подальший розвиток математична модель перехідного процесу

у надпровідниковому обмежувачі струму індуктивного типу при виникненні струму короткого замикання, що враховує втрату надпровідної фази екрану і обмотки.

**Практичне значення отриманих результатів** для електроенергетичної галузі полягає у впровадженні нових технічних рішень спрямованих на економію енергоресурсів, покращення масогабаритних показників, зменшення полів розіювання, підвищення швидкодії та обмеження ударного струму короткого замикання. Про ефективність нових технічних рішень і розробленої методики розрахунку свідчать акти впровадження на підприємствах ТОВ „РЕЙЛ-ТЕХНІК” (м. Львів), ПАТ “ХМЗ” “Світло шахтаря” (м. Харків) і патенти України (№ 107531, № 74741, № 77244, № 48214).

Матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі на електромашинобудівному факультеті НТУ «ХП» у курсі «Прогресивні технології і матеріали», який читається на спеціальності 7.05070201 «Електричні машини і апарати», а також на електроенергетичному факультеті НТУ «ХП» у курсі «Сучасні проблеми, технології та перспективи розвитку енергетики» на спеціальності 8.05070101 «Електричні станції», «Сучасне обладнання електричних станцій, підстанцій та мереж» на спеціальності 8.05070102 «Електричні системи і мережі».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто, серед них: аналітичний огляд науково-технічної літератури з розробок надпровідних обмежувачів струму; розробка конструкції надпровідного високотемпературного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу з повним криогенним охолодженням усієї магнітної системи; розробка методики розрахунку основних параметрів обмежувача струму; визначення еквівалентної магнітної проникності надпровідної обмотки для обмежувача струму; розробка експериментального макету обмежувача струму індуктивного типу; експериментальні дослідження критичних параметрів зразків високотемпературного надпровідника на стенді кафедри фізики металів та напівпровідників НТУ «ХП», струмообмежувальних характеристик і втрат потужності осердя у криогенному середовищі на універсальному стенді кафедри загальної електротехніки НТУ «ХП».

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародному симпозиумі „Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика” (“SIEMA’2006”, “2007”, “2009”, “2013”), (м. Харків, 2006 р., 2007 р., 2009 р., 2013 р.); XV, XVI, XVIII, XIX, XX Міжнародних науково–практичних конференціях „Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (м. Харків 2007 р., 2008 р., 2010 – 2012 рр.); II Міжнародному молодіжному форумі «Интеллектуальные энергосистемы» (м. Томськ, Росія, 2014 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 14 наукових публікаціях, з них: 1 монографія, 4 статті у наукових фахових виданнях

України включених до міжнародних наукометричних баз, 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні (Scopus), 4 патенти України, 4 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатку. Загальний обсяг дисертації становить 138 сторінок; з них 67 рисунків по тексту; 13 таблиць по тексту; 1 таблиця на 1 сторінці; списку використаних джерел з 114 найменувань на 14 сторінках, 1 додатку на 4 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд науково-технічної літератури, що присвячена існуючим конструкціям надпровідних обмежувачів струму короткого замикання, що використовують високотемпературні надпровідники, а також сучасному стану виробництва високотемпературних надпровідних проводів. За конструктивними особливостями виділені дві основні концепції надпровідних обмежувачів струму: резистивну та індуктивну (рис. 1), на яких ґрунтується більшість інших пропонованих конструкцій, що повинні задовольняти тим же вимогам. При виникненні короткого замикання надпровідниковий елемент резистивного обмежувача струму втрачає надпровідність і переходить у нормальний стан, набуває активний опір за рахунок якого забезпечується обмеження аварійного струму. В індуктивному типі обмежувача струму через втрату діаманітних властивостей надпровідним екраном при досягненні критичного значення магнітної індукції зростає індуктивність основної обмотки, за рахунок чого збільшується опір і обмежується струм короткого замикання.

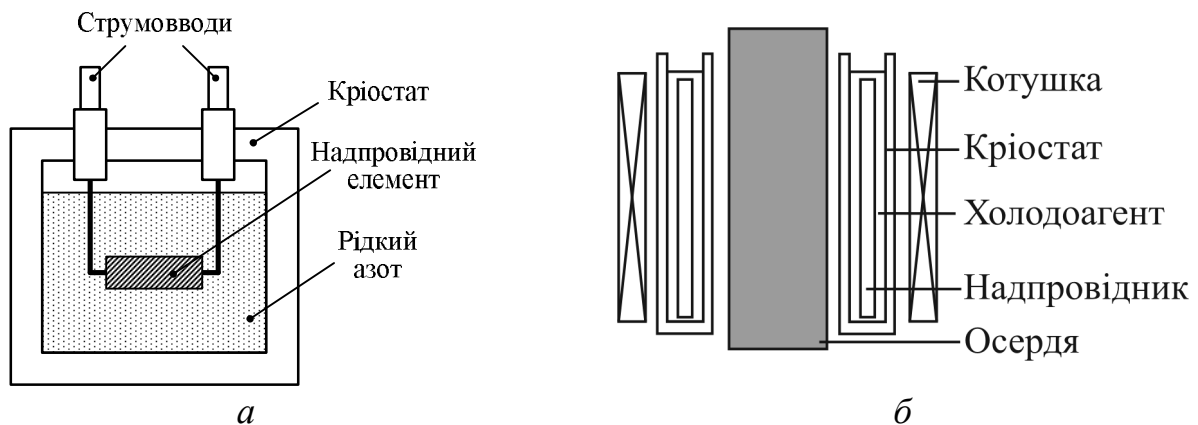


Рисунок 1 – Схематичне зображення резистивного (а) і індуктивно (б) обмежувача струму

Резистивний тип обмежувача струму характеризується небезпекою появи теплових доменів, викликаних неоднорідністю переходу надпровідника в нормальний стан, що може привести до руйнації надпровідних елементів; перенапруженнями і значними тепловиділеннями при короткому замиканні,

значний час відновлення після спрацювання. Одним з основних недоліків індуктивного струмообмежувача є те, що розміри обмотки і магнітного осердя збільшуються пропорційно номінальній напрузі.

Поряд з перевагами використання надпровідних обмежувачів струму постає низка технологічних та конструктивних питань, вирішення яких забезпечить промислове впровадження даного приладу. Тому є потреба проведення теоретичних і експериментально-дослідних робіт для розроблення високотемпературного надпровідного струмообмежувача, прийнятного до виготовлення і використання в діючих мережах електропостачання.

На підставі аналізу стану виробництва надпровідних обмежувачів струму визначений пріоритетний напрямок з дослідження високотемпературної індуктивної конструкції.

У **другому розділі** проведено аналіз розроблених конструктивних варіантів індуктивного обмежувача струму з надпровідним екраном (патент України № 74741). Встановлено, що для подальшого аналізу найбільш економічною є конструкція з високотемпературними надпровідними екраном і обмоткою (патент України № 107531), що разом з осердям розміщені у єдиному кріостаті (рис. 2). Проведено аналіз номінального та аварійного режимів роботи надпровідного обмежувача струму. З аналізу номінального режиму визначено

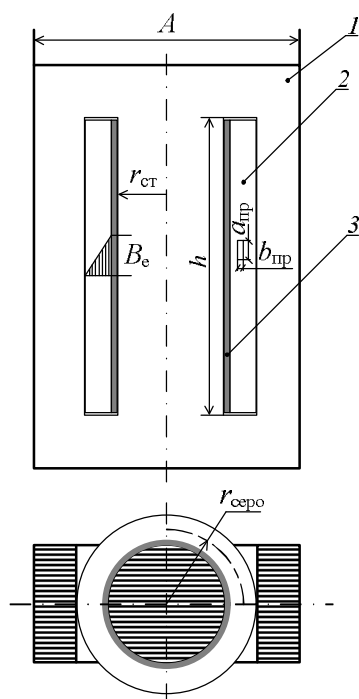


Рисунок 2 – Структурна схема надпровідного обмежувача струму короткого замикання:

1 – осердя; 2 – надпровідна обмотка; 3 – надпровідний екран

коефіцієнт спаду напруги на обмежувачі струму, величина якого не повинна перевищувати 5 % від номінальної напруги електромережі. Визначено розподіл магнітного поля у обмежувачі струму за номінального режиму з врахуванням екранування осердя, і розраховано індуктивність обмотки обмежувача струму і електромагнітний тиск на екран. Для розрахунків і аналізу магнітних полів й визначення магнітної індукції на поверхні екрана розрахована еквівалентна магнітна проникність  $\mu_{r\text{екв}}$  високотемпературної надпровідної обмотки, що враховує відмінності геометричних параметрів проводу і способу виконання намотки. Для рядової намотки надпровідним круглим проводом еквівалентна магнітна проникність має вигляд

$$\mu_{r\text{екв}} = \frac{1}{\frac{(k_{\text{пр}} + 2)^2}{\sqrt{k_{\text{пр}}(k_{\text{пр}} + 4)}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\frac{k_{\text{пр}}}{k_{\text{пр}} + 4}}} - \frac{\pi}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} k_{\text{пр}} \right)},$$

де коефіцієнт  $k_{\text{пр}} = \delta/r_{\text{пр}}$ ;  $\delta$  – повітряний зазор між надпровідними проводами обмотки;  $r_{\text{пр}}$  – радіус надпровідної жили.

Для шахової рядової намотки надпровідним круглим проводом (рис. 3) еквівалентна магнітна проникність записується у наступному вигляді

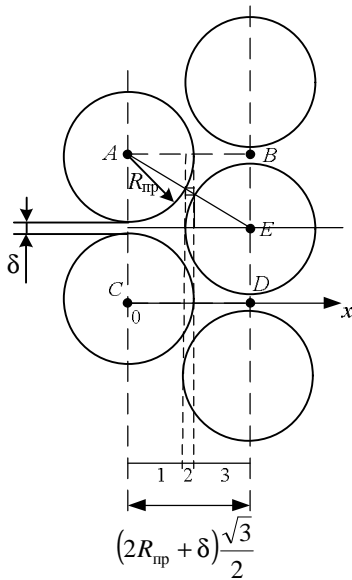


Рисунок 3 – Переріз надпровідної обмотки виконаної у шаховому порядку

$$\mu_{r \text{ екв}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{(\sqrt{3}-1)r_{\text{пр}} + \frac{\sqrt{3}}{2}\delta} \left[ \int_0^{r_{\text{пр}}} \frac{dx}{S_1(x)} + \int_{(\sqrt{3}-1)r_{\text{пр}} + \frac{\sqrt{3}}{2}\delta}^{r_{\text{пр}}} \frac{dx}{S_2(x)} \right],$$

де площа першої ділянки  $S_1(x) = (2r_{\text{пр}} + \delta) - 2\sqrt{r_{\text{пр}}^2 - x^2}$ , площа другої ділянки

$$S_2(x) = (2r_{\text{пр}} + \delta) - 2\sqrt{r_{\text{пр}}^2 - x^2} - 2\sqrt{r_{\text{пр}}^2 - \left[ \sqrt{3} \left( r_{\text{пр}} + \frac{\delta}{2} \right) - x \right]^2}.$$

Для простої рядової намотки надпровідним плівковим проводом еквівалентна магнітна проникність

$$\mu_{r \text{ екв}} = \frac{k_{\text{пр}}}{1 + k_{\text{пр}}},$$

де коефіцієнт  $k_{\text{пр}} = \delta/a_{\text{пр}}$ ;  $\delta$  – подвійна товщина ізоляції;  $a_{\text{пр}}$  – ширина надпровідної стрічки.

При збільшенні повітряного проміжку між надпровідними частинами провідників обмотки високотемпературної надпровідної котушки збільшується відносна еквівалентна магнітна проникність (рис. 4). Таким чином, визначальним параметром для розрахунку еквівалентної розподіленої магнітної проникності надпровідної котушки є крок обмотки.

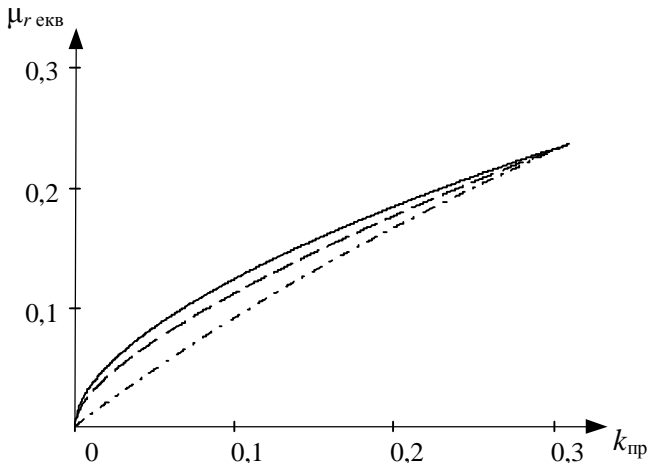


Рисунок 4 – Залежність  $\mu_{r \text{ екв}}$  від коефіцієнта  $k_{\text{пр}}$ :  
— рядова намотка круглий провід; — — шахова рядова намотка круглий провід;  
- · - проста рядова намотка плівковий провід

Якщо обмотка котушки намотана у шаховому порядку, то її розподілена абсолютна магнітна проникність дещо менша у порівнянні з простою рядовою намоткою, але при збільшенні кроку різниця для усіх випадків незначна.

Встановлено, що при збільшенні кроку між проводами надпровідної обмотки її відносна розподілена еквівалентна магнітна проникність зростає практично однаково як для круглого перерізу проводу, так і для плівкового проводу. При перебільшенні критичних параметрів проводу надпровідної обмотки його діамангнітні властивості втрачаються і магнітну проникність можна прийняти рівною магнітній сталій. Використання



отриманих результатів спрощує математичне моделювання і електромагнітні розрахунки. В основу розрахунків покладено коефіцієнт спаду напруги  $k_{oc} = U_{oc}/U_n$ , де  $U_n$  – напруга навантаження;  $U_{oc}$  – спад напруги на обмежувачі струму у номінальному режимі.

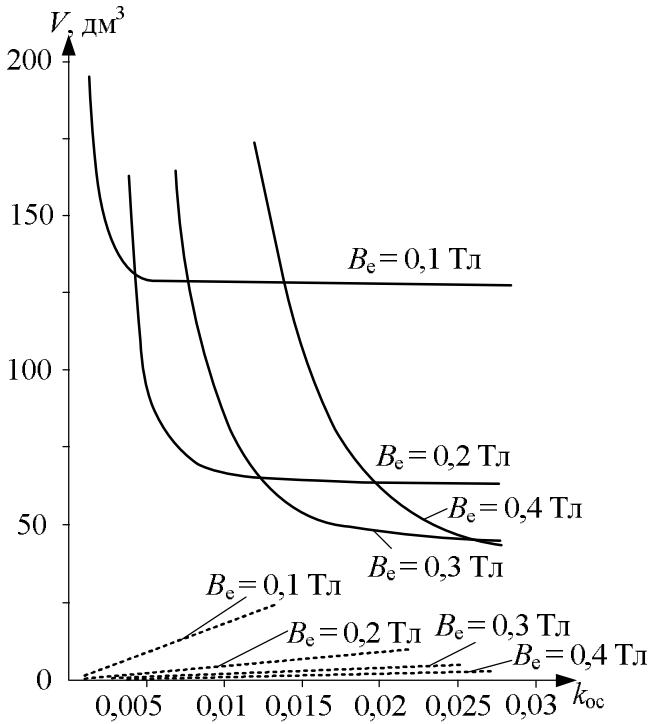


Рисунок 5 – Залежності об'ємів осердя  $V_{oc}$  (—) і надпровідної обмотки  $V_{но}$  (···) від коефіцієнта напруги  $k_{oc}$

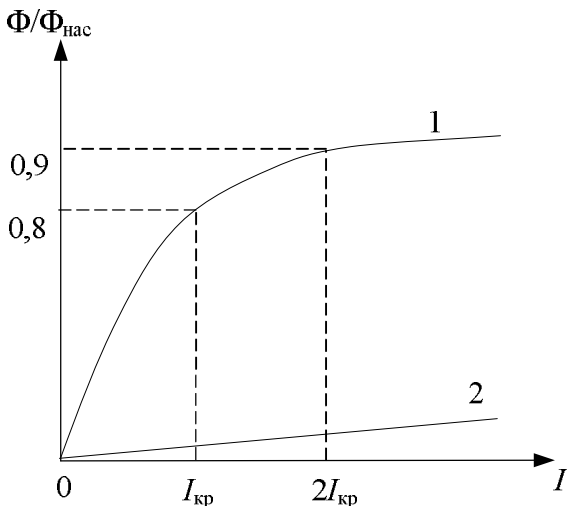


Рисунок 6 – Крива магнітного потоку насичення у металевому стержні обмежувача струму в залежності від струму: 1 – основний магнітний потік; 2 – магнітний потік розсіяння

Істотне зменшення об'єму осердя досягається при магнітній індукції на поверхні екрану  $B_e \geq 0,2$  Тл (рис. 5). Величина магнітної індукції в осерді не повинна перевищувати значення магнітної індукції насичення для обраної марки сталі (рис. 6). Кількість витків є другорядним фактором, який не може суттєво зменшити площу перерізу осердя, на розмір якого більше впливає значення індукції насичення. Крім цього збільшення кількості витків збільшує об'єм високотемпературної надпровідної обмотки, а отже довжину ярем магнітопроводу і криостата з холодоагентом.

Оцінки показують, що за витримуванні умов критичної напруженості матеріалу для надпровідного екрана збільшення струму до критичного у два рази хоча і зменшує суттєво індуктивність, але вона залишається на два порядки більшою порівняно з індуктивністю при надпровідному стані надпровідного екрана. А це означає, що при втраті надпровідності пропорційно збільшується стала часу протікання процесу короткого замикання, а також індуктивний опір, якщо процес відбувається у колі змінного струму.

Обмежений струм короткого замикання може у декілька разів перевищувати номінальний струм електромережі, а напруженість відповідає магнітній індукції  $B_{кз}$  за кривою намагнічування, то можна визначити

площу перерізу стержня магнітопроводу, бо кількість витків в першу чергу повинна відповідати вимозі спрацьовування надпровідного екрану за критичними параметрами.

Для аналізу побудована еквівалентна геометрична модель магнітопроводу відтворює реальний з таким допущенням, що переріз обмежувача струму прямокутний, а розподіл магнітного потоку радіально не змінюється. Чисельний аналіз розподілу магнітного поля обмежувача струму еквівалентної моделі обмежувача струму проведений у математичному пакеті FEMM (рис. 7).

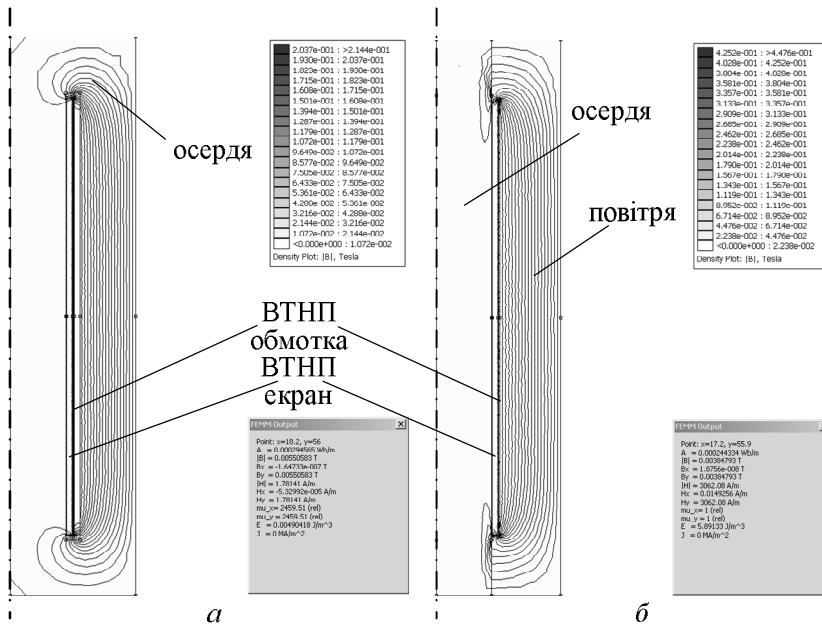


Рисунок 7 – Розрахункова картина розподілу магнітного поля обмежувача струму при номінальному режимі (а) вздовж осі  $x$  (б) вздовж осі  $y$

За меншого зазору магнітна індукція буде менша у стрижнях магнітопроводу, яка створює магнітні втрати у номінальному режимі. Також середнє значення магнітної індукції у приєкранній зоні  $B_e$  досягає необхідного

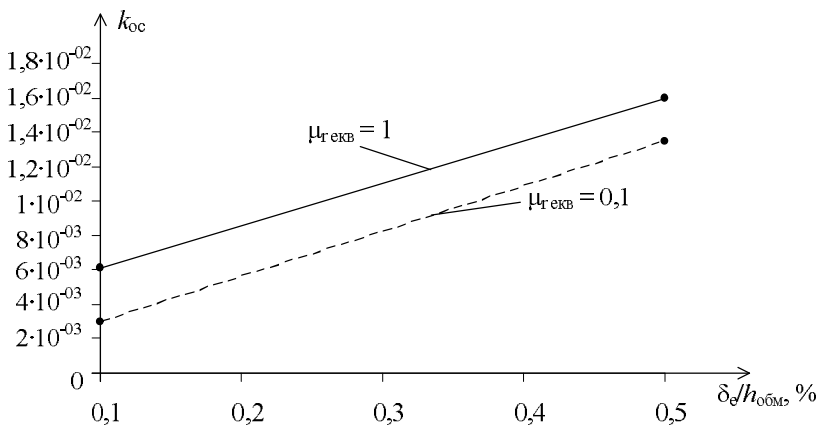


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта  $k_{oc}$  від  $\delta_e$  віднесеного до висоти обмотки

Результати аналізу, що врахували частковий коефіцієнт напруги  $k_{oc}$ , що співвідносить спад напруги на обмежувачі струму з напругою навантаження і величини зазору між екраном та обмоткою, віднесеного до висоти обмотки  $\delta_e/h_{обм}$  підтверджують, що спад напруги на обмежувачі струму знаходиться у межах допустимого і повністю задовольняє вимогам електромережі для номінального режиму роботи (рис. 8).

критичного рівня  $B_{кр}$  при найменших зазорах  $\delta_e$  між екраном і обмоткою. Для обмотки з надпровідного проводу другого покоління індукція буде вище і практично не змінюється зі збільшенням зазору  $\delta_e$  між екраном та обмоткою. Що обумовлено нижчою магнітною проникністю надпровідникової обмотки другого покоління.

Проведена оцінка енергоефективності високотемпературного надпровідного обмежувача струму

короткого замикання з розрахунку магнітних втрат в осерді магнітопровода, зовнішніх теплоприпливів крізь стінки кріостата, гістерезисних втрат в проводах високотемпературної надпровідної обмотки при перемагнічуванні, теплоприпливів по струмоводах підтвердила економічність запропонованої конструкції (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри обмежувача струму у порівнянні з відомими реакторами

Тип обмежувача струму	Втрати потужності $P$ , Вт	$i_{кз}$	$\Delta U_{\%}$	Маса, кг
Індуктивний з високотемпературними надпровідним екраном і надпровідною обмоткою	~ 250	$8 \cdot I_H^{(1)}$	0,12	562 <sup>(2)</sup>
Індуктивний з високотемпературним надпровідним екраном, теплою обмоткою, фірми АВВ	~ 1000	$11 \cdot I_H^{(1)}$	–	1300 <sup>(2)</sup>
Високотемпературний надпровідний резистивний, фірми CURL 10	1450	$12 \cdot I_H^{(1)}$	–	–
РБА-6-400-3	1700	$33,3 \cdot I_H^{(1)}$	0,73	520

<sup>(1)</sup> – кратність значення ударного струму короткого замикання

<sup>(2)</sup> – маса магнітопроводу

Оціночні розрахунки електромагнітних зусиль, що діють на надпровідну обмотку і електромагнітного тиску, що діє на надпровідний екран підтвердили їх відповідність до вимог механічної міцності, а також зниження їх величини у порівнянні з відомими аналогами реакторів.

У **третьому розділі** проведено аналіз розробленої математичної моделі перехідних процесів у електромережі з обмежувачем струму при виникненні короткого замикання, та враховані черговість втрати надпровідної фази екрана або обмотки. В запропонованій концепції обмежувача струму короткого замикання можливі варіанти спрацьовування:

1). При досягненні  $H_{кр}$  на поверхні високотемпературного надпровідного екрану (втрата діамагнітних властивостей екраном) суттєво збільшується індуктивний опір і починається перехідний процес при початкових умовах

$(t = 0) \quad i = i_{кр} (H_{кр})$  зі сталою часу  $\tau = \frac{L}{R_{нп\ обм}}$ . Якщо високотемпературна

надпровідна обмотка зберігає надпровідність ( $R_{нп\ обм} = 0$ ), то усталений струм визначається повним опором обмежувача струму

$$10$$

$$I_y = \frac{U_H}{Z_{OC}}$$

а повний опір практично дорівнює реактивному ( $Z_{OC} \approx X$ ), відповідно, стала часу  $\tau \rightarrow \infty$ , тобто перехідний процес іде від  $I_{кр}$  до  $I_y$  дуже повільно;

2). Екран зберігає надпровідний стан, а струм сягає  $I_{кр}$  для надпровідної обмотки ( $R_{нп\ обм} \gg 0$ ), тоді усталений струм

$$I_y = \frac{U_H}{R_{нп\ обм}},$$

а реактивний опір практично відсутній ( $X \rightarrow 0$ ), відповідно стала часу

$\tau = \frac{L}{R_{нп\ обм}} \rightarrow 0$ , тобто процес миттєво завершується. Це найбільш динамічний процес, з великими інерційними складовими;

3). Значення критичного струму  $I_{кр}$  близьке і для надпровідного екрана, і для надпровідної обмотки, тому надпровідність втрачаються одночасно. Це дає найменший усталений струм

$$I_y = \frac{U_H}{\sqrt{R^2 + X^2}},$$

а активний опір обмотки набуває певного значення ( $R \gg 0$ ) і стала часу  $\tau \rightarrow 0$ , але перехідний процес триває більш повільно, ніж для другого випадку.

Зміна струму на першому етапі короткого замикання

$$i_{к1} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi_{OC1}) + \left[ I_{нм} \sin(\psi_u - \varphi_H) - \frac{U_{нм}}{Z_{OC1}} \sin(\psi_u - \varphi_{OC1}) \right] e^{-\frac{R_{OC1} t}{L_{OC1}}}, \quad (1)$$

де  $\psi_u$  – початкова фаза короткого замикання;  $\varphi_H$  – фазний кут навантаження;  $\omega$  – кутова частота;  $R_{OC1}$  – активний опір надпровідної обмотки на першому етапі;  $L_{OC1}$  – індуктивність обмежувача струму на першому етапі;  $Z_{OC1}$  – повний опір обмежувача струму на першому етапі;  $\varphi_{OC1}$  – фазний кут обмежувача струму на першому етапі.

Зміна струму на другому етапі короткого замикання

$$i_{к2} = \frac{U_{нм}}{Z_{OC2}} \sin(\omega t + \omega t_{к1} + \psi_u - \varphi_{OC2}) + \left[ k_{Ie} I_{нм} - \frac{U_{нм}}{Z_{OC2}} \sin(\omega t_{к1} + \psi_u - \varphi_{OC2}) \right] e^{-\frac{R_{OC2} t}{L_{OC2}}}, \quad (2)$$

де  $R_{OC2}$  – активний опір надпровідної обмотки на другому етапі;  $L_{OC2}$  – індуктивність обмежувача струму на другому етапі;  $Z_{OC2}$  – повний опір обмежувача струму на другому етапі;  $\varphi_{OC2}$  – фазний кут обмежувача струму на

другому етапі;  $k_{Ie} = 2,5-3$  – коефіцієнт перевищення струму при втраті надпровідності обмоткою або екраном.

Зміна струму на третьому етапі короткого замикання

$$i_{k3} = \frac{U_{nm}}{Z_{OC3}} \sin(\omega t + \omega(t_{k1} + t_{k2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) + \left[ k_{I_{np}} I_{nm} - \frac{U_{nm}}{Z_{OC3}} \sin(\omega(t_{k1} + t_{k2}) + \psi_u - \varphi_{OC3}) \right] e^{-\frac{R_{OC3} t}{L_{OC3}}}, \quad (3)$$

де  $R_{OC3}$  – активний опір надпровідної обмотки на третьому етапі;  $L_{OC3}$  – індуктивність обмежувача струму на третьому етапі;  $Z_{OC3}$  – повний опір обмежувача струму на третьому етапі;  $\varphi_{OC3}$  – фазний кут обмежувача струму на третьому етапі;  $k_{I_{np}} = 4-5$  – коефіцієнт перевищення струму при втраті надпровідності екраном і обмоткою.

Таким чином, математична модель електромагнітного перехідного процесу у аварійному режимі електричного кола з надпровідним обмежувачем струму описується системою залежностей (1–3), які враховують зміну параметрів електричного кола у залежності від черговості втрати надпровідності екраном і обмоткою.

Повністю перехідний процес складається з трьох етапів (1–3). На рис. 9 подані результати для першого варіанту перехідного процесу, коли на другому етапі втрачається надпровідність екрана при двох початкових фазах короткого замикання  $\psi_u = 0$ ;  $\psi_u = \pi/2$ .

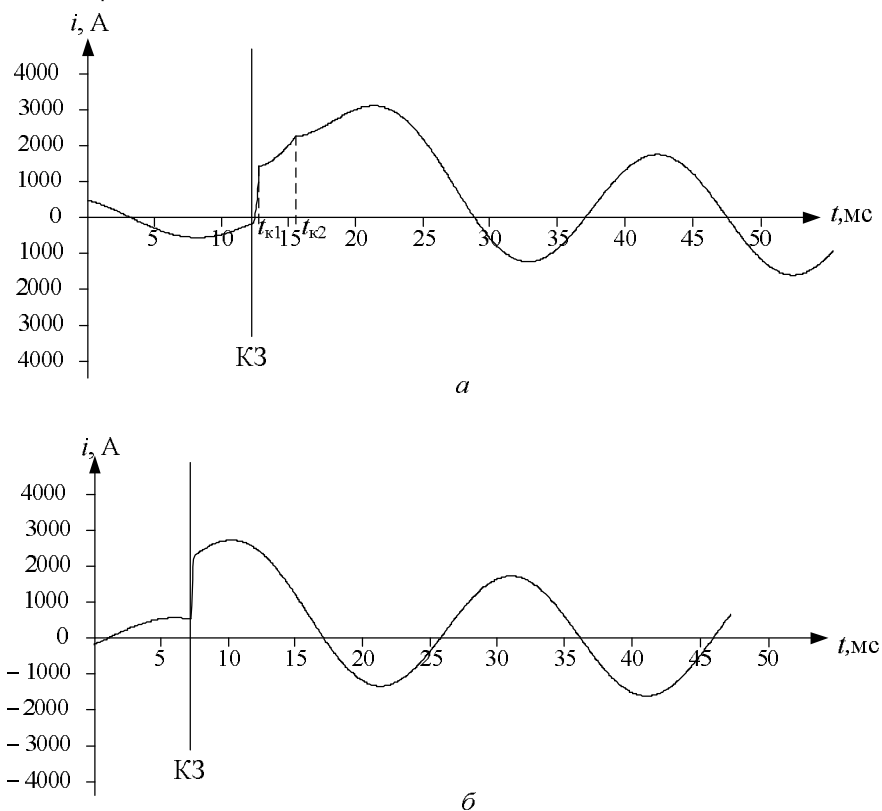
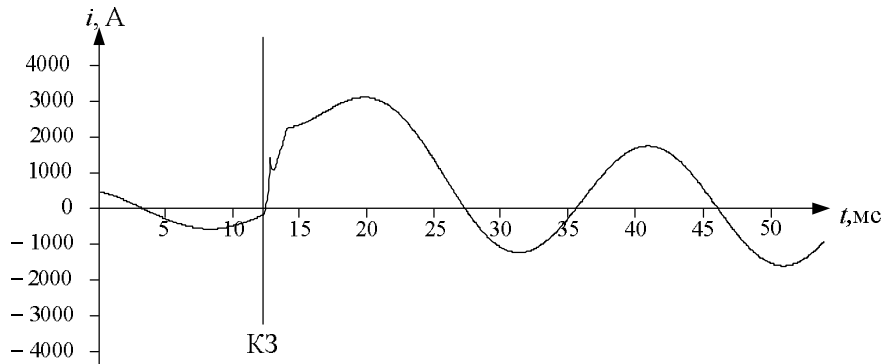


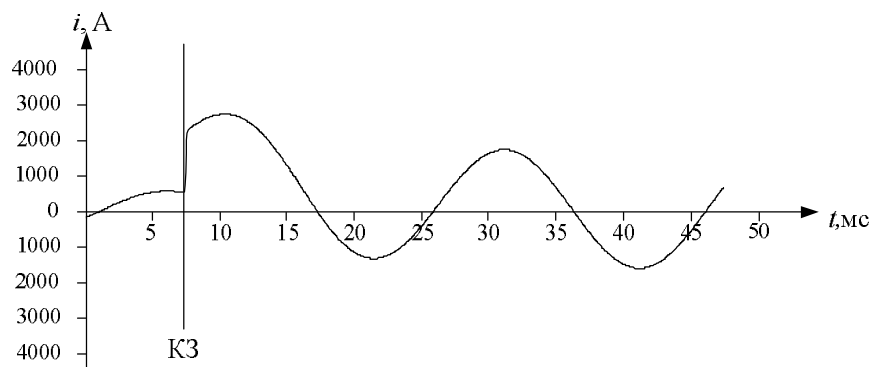
Рисунок 9 – Перехідний процес (перший варіант):

а) – при  $\psi_u = 0$ ; б) – при  $\psi_u = \pi/2$

На рис. 10 подані результати для другого варіанту перехідного процесу, коли на другому етапі втрачається надпровідність обмотки при двох початкових фазах короткого замикання  $\psi_u = 0$ ;  $\psi_u = \pi/2$ .



а



б

Рисунок 10 – Перехідний процес (другий варіант):

а) – при  $\psi_u = 0$ ; б) – при  $\psi_u = \pi/2$

Тривалість часу перехідного процесу  $t_{кр}$  у більшій мірі залежить від моменту виникнення короткого замикання  $\psi_u$ . На першому та другому етапі перехідного процесу тривалість часу  $t_{к1}$ ,  $t_{к2}$  зменшується в залежності від початкової фази короткого замикання, найменший час при  $\psi_u = \pi/2$ . Тривалість третього етапу перехідного процесу залежить від активного опору високотемпературного надпровідного проводу обмотки  $R_{OC}$  при втраті надпровідності. При достатній величині  $R_{OC}$  третій етап перехідного процесу може відбуватися дуже швидко, а струм при цьому буде менший за номінальний.

Таким чином, при певних критичних параметрах надпровідних обмотки і екрана обмежувача струму усталений струм короткого замикання  $i_{кз}$  не набагато перевищить критичний струм  $i_{кр}$  за високої швидкодії надпровідного екрану. Наростання струму короткого замикання до критичного значення  $i_{к1}$ , при якому відбувається спрацювання надпровідного обмежувача струму здійснюється досить швидко  $t_{к1} \ll \tau$ , особливо при початковій фазі короткого замикання  $\psi_u = \pi/2$ . Критичний час першого і другого етапу разом при початковій фазі короткого замикання  $\psi_u = \pi/2$  для другого варіанта спрацювання складають менше 1 мс, на відміну від першого варіанта, що важливо для використання апаратів захисту.

Надпровідна обмотка забезпечує введення до електричного кола активного опору, що сприяє зменшенню струму і сталої часу на третьому етапі першого варіанту перехідного процесу, після втрати надпровідності екраном, що полегшує спрацювання апаратури захисту і відключення аварійного струму. Побудована математична модель перехідного процесу (1–3) відображає особливості зміни надпровідного стану на нормальний для екрану і обмотки при набутті критичного значення струмом.

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження, які були спрямовані на: підтвердження параметрів реального високотемпературного надпровідника сумісного з обмежувачем струму; підтвердження можливості розташування в єдиному кріостаті надпровідного екрану, надпровідної обмотки і осердя завдяки дуже малим питомим втратам в останньому; підтвердження на імітаційній моделі відповідності роботи обмежувача струму в аварійному режимі теоретичним положенням.

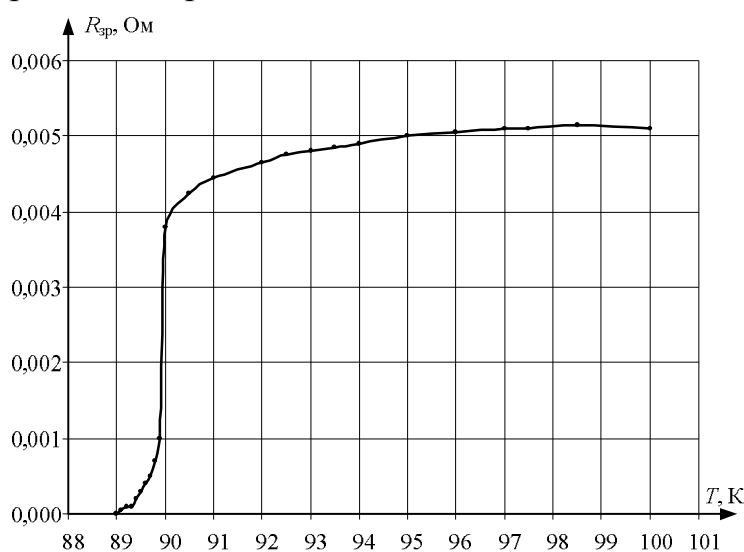


Рисунок 11 – Графік зміни опору високотемпературного надпровідного елемента від температури

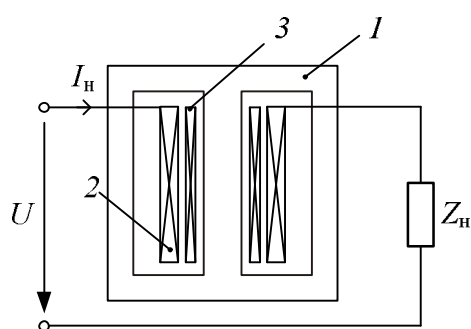


Рисунок 12 – Схема трансформаторного обмежувача струму:

1 – магнітопровід; 2 – обмотка високої напруги; 3 – обмотка низької напруги

Для чисельного і експериментального аналізу у якості імітаційного макету взято обмежувач струму трансформаторного типу (патент України

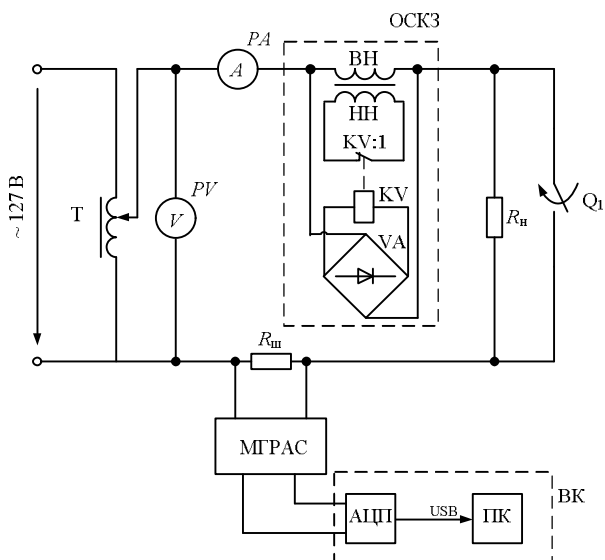
Досліджено зміну стану високотемпературного надпровідного елемента з використанням чотиризондового метода при вимірюванні електричного опору у інтервалі температур 300–80 К. Втрата надпровідності відбувається миттєво при досягненні критичної температури (що еквівалентно дії критичного струму, або критичній магнітній індукції), тобто ітрієва кераміка придатна для використання у якості надпровідного екрану в надпровідному обмежувачі струму короткого замикання (рис. 11).

Для відтворення дійсних умов роботи осердя високотемпературного надпровідного обмежувача струму кріорезистивна обмотка разом з осердям розміщена всередині кріостата і захолоджена рідким азотом до температури  $\sim 77$  К. Отримані експериментальні результати визначили питомі втрати потужності осердя 0,5 мВт/кг, що підтверджує попередні розрахунки.

Для чисельного і експериментального аналізу у якості імітаційного макету взято обмежувач струму трансформаторного типу (патент України

№ 77244), що відтворює фізичну модель обмежувача струму індуктивного типу (рис. 12).

Математичну модель роботи індуктивного трансформаторного обмежувача струму для імітаційного макету описується рівняннями з начальними нульовими умовами:



$$\begin{cases} u = (R_1 + R_n) i_1 + (L_1 + L_n) \frac{d i_1}{dt} + w_1 S_{oc} \frac{dB}{dt}; \\ 0 = R_2 i_2 + w_2 S_{oc} \frac{dB}{dt}; \\ i_1 w_1 + i_2 w_2 = H(B) \cdot l_{сер} + \frac{S_{oc}}{R_e} \frac{dB}{dt}. \end{cases}$$

де  $R_1$  – активний опір первинного кола;  $L_1$  – індуктивність первинного кола;  $R_2$  – активний опір вторинної обмотки;  $R_n$  – активний опір навантаження первинного кола;  $L_n$  – індуктивність навантаження первинного кола;  $B$  – магнітна індукція;  $w_1$  – кількість витків первинної обмотки;  $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки;  $S_{oc}$  – площа перерізу осердя;  $l_{сер}$  – довжина середньої лінії осердя;  $R_e$  – еквівалентний опір.

Експериментальні дослідження проводились на макеті з схемою увімкнення у електричне коло (рис. 13).

Вимірювання кривої струму (рис. 14, а) під час спрацювання обмежувача струму здійснюється з шунта  $R_{ш}$  за допомогою вимірювального комплексу ВК, що містить аналого-цифровий перетворювач АЦП, з'єднаний з модулем гальванічної розв'язки аналогового сигналу МГРАС, і персональний комп'ютер ПК, який записує сигнал з АЦП через кабель USB. Аналітична крива струму (рис. 14, б) розрахована у математичному пакеті Maple.

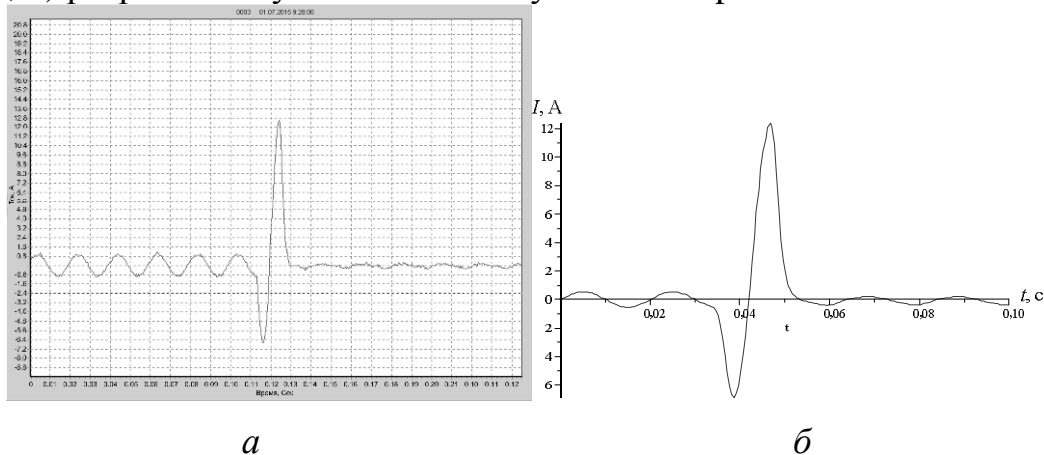


Рисунок 14 – Крива струму у колі під час виникнення струм короткого замикання отримана експериментально (а) і аналітично (б)



Крива струму (рис. 15) по залежностях (1–3) відповідає випадку перехідного процесу, коли після першого етапу відразу відбувається третій етап з втратою надпровідності екрану і обмотки. Тривалість першого етапу більша, що обумовлено інерційністю спрацювання реле і величиною струму уставки, який перевищує початкові умови критичного струму.

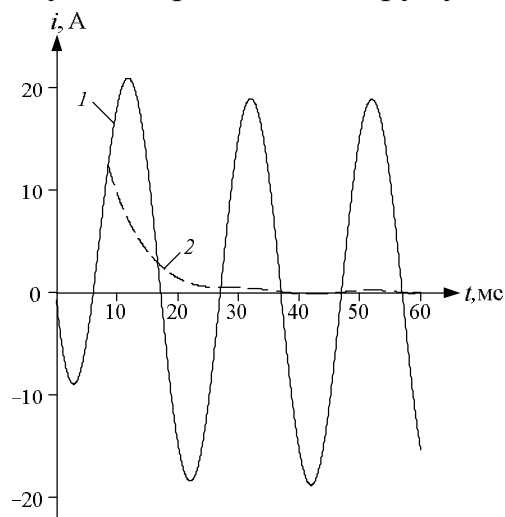


Рисунок 15 – Крива струму при виникненні короткого замикання:  
1 – очікуваний струм короткого замикання; 2 – обмежений струм

Експериментально підтверджено, що втрати потужності у номінальному режимі у осерді обмежувача струму будуть невеликі, що відповідає попереднім теоретичним розрахункам.

Запропонована математична модель перехідного процесу описує аварійний режим роботи індуктивного обмежувача струму. Експериментальний макет трансформаторного обмежувача струму імітує спрацювання індуктивного обмежувача струму.

У додатках наведено акти впровадження технічних рішень і розробленої методики розрахунку на підприємствах ТОВ „РЕЙЛ-ТЕХНІК” (м. Львів), ПАТ “ХМЗ” “Світло шахтаря” (м. Харків), в навчальний процес кафедр електричних апаратів і електричних станцій НТУ “ХП”, а також при виконанні держбюджетних тем.

## ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу з покращення експлуатаційних параметрів високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу завдяки орієнтації на надпровідну стрічку другого покоління, та розміщення усією конструкції у єдиному кріостаті. Доведено, що сучасні розробки надпровідникових обмежувачів струму короткого замикання доцільно будувати на використанні новітніх високотемпературних надпровідних проводів другого покоління з покращеними характеристиками. Резистивний обмежувач струму, характеризується надмірними тепловиділеннями і перегрівом надпровідних елементів під час обмеження струму. Відомі обмежувачі струму індуктивного типу мають великі розміри, ускладнені конструкції, зокрема обмежувач струму з підмагнічуванням осердя або з мостовою схемою, що знижує надійність їх

спрацювання і має велику собівартість.

2. Запропонований індуктивний обмежувач струму з високотемпературною надпровідною обмоткою другого покоління і магнітної системи, що повністю розміщена у єдиному кріостаті, забезпечить підвищення експлуатаційних показників порівняно з відомими аналогами. У порівнянні з найближчим аналогом – індуктивним обмежувачем струму фірми АВВ (Швейцарія) енергозбереження підвищено на 75 %, масогабаритний показник магнітопроводу покращений на 56 %, показник обмеження ударного струму короткого замикання підвищено на 27 %. У порівнянні з надпровідним резистивним обмежувачем струму CURL 10 (Німеччина) енергозбереження підвищено на 82 %, показник обмеження ударного струму короткого замикання – на 33 %. У порівнянні з традиційним реактором показник енергозбереження покращено на 85 %, показник обмеження ударного струму короткого замикання покращено на 75 %, показник спаду напруги на обмежувачі у номінальному режимі зменшено на 0,6 %.

3. Враховуючи конструктивні особливості і можливості надпровідників другого покоління удосконалена математична модель перехідного процесу у електричному колі під час виникнення короткого замикання і обмеження струму індуктивним обмежувачем, яка враховує змінюваність параметрів електричного кола у залежності від черговості втрати надпровідних властивостей екраном та обмоткою, що зв'язано з їх критичними параметрами.

4. Запропонована методика розрахунку для вибору основних параметрів магнітної системи повністю надпровідного обмежувача струму короткого замикання побудована на врахуванні коефіцієнту спаду напруги  $k_{oc}$ , дозволяє здійснити вибір параметрів у відповідності вимогам електромережі та критичних параметрів надпровідника.

5. На основі експериментального імітаційного макету індуктивного обмежувача струму проведені дослідження струмообмежувальних характеристик, які корелюються з математичною моделлю його перехідного процесу, і підтверджують ефективність запропоновано технічного рішення. Проведені дослідження високотемпературних надпровідних елементів другого покоління і експериментальне визначення втрат потужності у осерді при криогенному охолодженні обґрунтовують доцільність розміщення усієї магнітної системи обмежувача струму у єдиному кріостаті.

6. Позитивні результати промислового освоєння нових методик розрахунку на підприємствах ТОВ „РЕЙЛ-ТЕХНІК” (м. Львів), ПАТ “ХМЗ” “Світло шахтаря” (м. Харків) довели економічну доцільність запропонованих рішень.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гончаров Є.В. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні: монографія / В.Г. Данько, І.С. Полянська, Є.В. Гончаров; за ред. В. Г. Данько. – Харків: НТМТ, 2011. – 248 с.

*Здобувачем проведено аналіз сучасного стану розробки і виробництва надпровідних обмежувачів струму короткого замикання.*

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

*Здобувачем розроблена еквівалентна модель для розрахунку розподілу магнітного поля обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу.*

3. Гончаров Є.В. Аналіз впливу магнітної проникності ВТНП котушки на магнітне поле / Гончаров Є.В. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 4/11 (40). – С. 50 – 53.

4. Гончаров Є.В. Еквівалентна магнітна проникність надпровідникової обмотки / Гончаров Є.В. // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2010. – № 1. – С.11 – 13.

5. Goncharov E.V. Calculating the parameters of an inductive short-circuit current limiter with a superconducting shield / Dan’ko V.G., Goncharov E.V. // Russian Electrical Engineering. New York, USA – 2013. – Vol. 84, № 9. – P. 478 – 481.

*Здобувачем розроблена методика розрахунку геометричних і електричних параметрів надпровідникового обмежувача струму короткого замикання.*

6. Гончаров Є.В. Особливості роботи надпровідного обмежувача струму при раптовому КЗ / Данько В.Г., Гончаров Є.В.// Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 6. – С. 30 – 33.

*Здобувачем визначено особливості роботи надпровідного обмежувача струму потужністю 2,4 МВ·А з урахуванням різних режимів спрацювання.*

7. Пат. 48214 Україна МПК H02H 9/00. Електромагнітний обмежувач струму короткого замикання з високотемпературною надпровідниковою обмоткою / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – № u 200909564; заявл. 18.09.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.

8. Пат. 74741 Україна, МПК H02H 9/00. Надпровідний обмежувач струму короткого замикання з екраном / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – № u 201204751; заявл. 17.04.12; опубл. 12.11.12, Бюл. № 21.

9. Пат. 77244 Україна, МПК H02H 9/00. Пристрій обмеження струму короткого замикання трансформаторного типу / Данько В.Г., Гончаров Є.В.;

власник патенту Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – № u 201207728; заявл. 25.06.12; опубл. 11.02.13, Бюл. № 3.

10. Пат. 107531 Україна, МПК H02H 9/00. Високотемпературний надпровідний обмежувач струму короткого замикання з повністю кріогенним охолодженням / Данько В.Г., Гончаров Є.В.; власник патенту Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – № а 201312286; заявл. 21.10.13; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1.

11. Гончаров Є.В. Обмежувач струму короткого замикання з надпровідним екраном / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XVIII міжн. наук.-практичної конф., 12 – 14 травня 2010 р., Харків : у 4 ч. / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2010. – Ч. 2. – С. 159.

*Здобувачем проведено аналіз індуктивності обмотки для номінального і аварійного режимів.*

12. Гончаров Є.В. Надпровідний обмежувач струму короткого замикання трансформаторного типу / Данько В.Г., Гончаров Є.В.// Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XIX міжн. наук.-практичної конф., 01 – 03 червня 2011 р., Харків : у 4 ч. / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2011. – Ч. 2. – С. 146.

*Здобувачем проведено аналіз конструкції обмежувача струму трансформаторного типу.*

13. Гончаров Є.В. Індуктивний надпровідний обмежувач струму короткого замикання / Данько В.Г., Гончаров Є.В. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XX міжн. наук.-практичної конф., 15 – 17 травня 2012 р., Харків : у 4 ч. / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2012. – Ч. 2. – С. 158.

*Здобувачем проведено аналіз конструкції обмежувача струму з надпровідною обмоткою.*

14. Goncharov E.V. Features of transient process of the short-circuit current limiter / Dan'ko V.G., Goncharov E.V. // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. науч. – техн. конф., Т.1., (г. Томск, 10-14 ноября. 2014 г.) – Мин-во образования и науки РФ, ТПУ. 2014., – Т.1. – С. 498 – 502.

*Здобувачем досліджено перехідний процес надпровідного обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу.*

**Гончаров Є.В. Підвищення експлуатаційних показників надпровідникового обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2016 р.

Дисертацію присвячено теоретичним та експериментальним дослідженням, спрямованим на підвищення експлуатаційних показників високотемпературного надпровідникового обмежувача струму короткого замикання індуктивного типу. Розроблено конструкцію високотемпературного надпровідникового обмежувача струму індуктивного типу з надпровідним, екраном, надпровідною обмоткою і осердям, які розміщені у загальному криостаті, що забезпечує енергозбереження до 85 %. Розроблено методику розрахунку основних параметрів магнітної системи обмежувача струму, побудовану на враховуванні коефіцієнту спаду напруги. Розроблено математичні моделі перехідного процесу: надпровідникового обмежувача струму індуктивного типу, експериментального макета обмежувача струму індуктивного типу, які дозволяють провести повний аналіз струмообмежувальних характеристик з визначенням необхідних критичних параметрів. Експериментально досліджено, що втрати потужності у номінальному режимі в осерді надпровідного обмежувача струму індуктивного типу незначні, що відповідає попереднім теоретичним розрахункам і підтверджує доцільність та економічність запропонованого технічного рішення. Проведені експериментальні дослідження підтвердили теоретичні положення і розроблені математичні моделі.

*Ключові слова:* струмообмежувальний реактор, електричні апарати, методи проектування, ресурсозбереження, надпровідник, надпровідний екран, обмежувач струму короткого замикання.

**Гончаров Е.В. Повышение эксплуатационных показателей сверхпроводникового ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2016 г.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, направленным на повышение эксплуатационных показателей высокотемпературного сверхпроводникового ограничителя тока короткого замыкания индуктивного типа. Разработана конструкция высокотемпературного сверхпроводникового ограничителя тока индуктивного типа со сверхпроводящим экраном, сверхпроводящей обмоткой и сердечником, которые размещены в общем криостате, что обеспечивает энергосбережение до

85 %. Разработана методика расчета основных параметров магнитной системы ограничителя тока, основанная на учете коэффициента падения напряжения. Разработана математическая модель переходного процесса сверхпроводникового ограничителя тока индуктивного типа при возникновении короткого замыкания, которая учитывает переход сверхпроводящих элементов в нормальное состояние. Разработана математическая модель работы экспериментального макета ограничителя тока индуктивного типа в электрической цепи при возникновении тока короткого замыкания. Предложенные математические модели позволяют провести анализ токоограничивающих характеристик с определением необходимых критических параметров сверхпроводникового ограничителя тока. Экспериментально исследовано, что потери мощности в номинальном режиме в сердечнике сверхпроводящего ограничителя тока индуктивного типа незначительны, что соответствует предыдущим теоретическим расчетам и подтверждает целесообразность и экономичность предложенного технического решения. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические положения и разработанные математические модели.

Ключевые слова: токоограничивающий реактор, электрические аппараты, методы проектирования, ресурсосбережение, сверхпроводник, сверхпроводящий экран, ограничитель тока короткого замыкания.

#### **Goncharov E.V. Improving Operational Performance of Superconducting Fault Current Limiter of the Inductive Type.**

The dissertation for competition of the scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.09.01 – electrical machines and apparatus. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2016.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental research aimed to improving operational performance high-temperature superconducting fault current limiter in-inductive type. The developed design of high-temperature superconductive fault current limiter of inductive type with superconducting screen, superconducting coil and the core, which are placed in the general cryostat that provides energy savings up to 85%. The method of calculation of basic parameters of the magnetic system of current limiter, which takes into account the coefficient of the voltage drop. The proposed mathematical models allow us to analyze the current-limiting characteristics with definition of the critical parameters required superconducting current limiter. An experimental investigation was that the power loss in the nominal mode in the core of the superconducting current limiter of inductive type are negligible that is consistent with previous theoretical calculations and confirmed the feasibility and cost-effectiveness of the proposed technical solution. The experimental results confirmed the theoretical position and developed mathematical models.

Keywords: current limiting reactor, electrical apparatus, design methods, resource conservation, superconductor, superconducting screen, short circuit current limiter.