

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Васьківський Олег Юрійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз можливості підвищення ефективності роботи електропостачальних систем за рахунок використання силових трансформаторів з надпровідниковими обмотками
(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

Васьківський О. Ю.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Васьківський О. Ю. Аналіз можливості підвищення ефективності роботи електропостачальних систем за рахунок використання силових трансформаторів з надпровідниковими обмотками. 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

Vaskivskiy O. Yu. Analysis of the possibility of increasing the efficiency of power supply systems due to the use of power transformers with superconducting windings. 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. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У МЕРЕЖАХ З НАД ПРОВІДНИКОВИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ | 7 |
| 1.1. Перехід у нормальний стан та повернення у надпровідний стан ВТНП проводів другого покоління. | 7 |
| 1.2. Математична модель електромагнітних перехідних процесів у ланцюгах, що містять надпровідникові трансформатори. | 19 |
| 1.3. Визначення можливості обмеження струмів короткого замикання | 23 |
| 1.4. Порівняльний аналіз випадків використання НПТ та звичайного трансформатора з розщепленою обмоткою. | 29 |
| Висновки по розділу 1 | 31 |
| РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ | 32 |
| 2.1. Вплив над провідникових трансформаторів на статичну стійкість | 32 |
| 2.2. Вплив над провідникових трансформаторів на динамічну стійкість елементів мережі | 36 |
| 2.3. Чисельний розрахунок параметрів електромеханічних перехідних процесів за наявності у мережі над провідникового трансформатора | 38 |
| Висновки по розділу 2 | 46 |
| РОЗДІЛ 3. ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ | 48 |
| 3.1. Формування вимог до експлуатації над провідникових трансформаторів | 49 |
| 3.2. Оцінка комерційної ефективності застосування над провідникових трансформаторів | 52 |
| Висновки по розділу 3 | 55 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 56 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 57 |

ВСТУП

Актуальність теми. Традиційні силові трансформатори мають досить високий коефіцієнт корисної дії, проте збільшення вартості електричної енергії внаслідок збільшення вартості палива стимулює інтенсивні пошуки шляхів зниження втрат, у тому числі й у силових трансформаторах. Надпровідність (НП) – властивість деяких матеріалів мати нульовий опір електричного струму. Відкриття явища надпровідності пов'язане з дослідженням електричного опору металів за низьких температур – поблизу абсолютного нуля (1...10 К).

З моменту відкриття надпровідності в 1911 році до першого пристрою, що вирішує завдання електроенергетики, минуло багато часу. Цей час було використано для подолання технологічних труднощів застосування низькотемпературних надпровідників, ключовим з яких було утримання обладнання для зрідження гелію. Незважаючи на величезні витрати, перші електротехнічні пристрої таки з'явилися. І, якщо говорити про трансформатори з низькотемпературними обмотками над провідників (НТНП), то досить згадати хоча б такі.

З моменту відкриття явища високотемпературної надпровідності (ВТНП) у 1986 році, зокрема, відкриття надпровідності у керамічних сполук ітрію або вісмуту, незабаром стало зрозуміло, що великомасштабні застосування надпровідників для потреб електроенергетики можливі лише з використанням ВТНП. Головним аргументом на користь останнього твердження є той факт, що середовище охолодження – рідкий азот для ВТНП, є дешевим і простим у отриманні та зберіганні продуктом у порівнянні з рідким гелієм – середовищем охолодження для НТНП (відмінність у ціні за 1 кг може досягати 500 разів) [2]. Рідкий азот набагато дешевше і доступніший за гелій, він володіє високими діелектричними характеристиками і за своїми електроізоляційними властивостями близький до трансформаторного масла. З цього моменту у різних країнах світу розпочалися практичні роботи зі створення електротехнічних об'єктів на основі високотемпературної

надпровідності (ВТНП). У 1997 році був створений перший ВТНП-трансформатор розрахований на напругу 18,7/0,4 кВ потужністю 630 кВ·А виробництва компанії АВВ, за участю американської компанії АСС та французької електроенергетичної системи Electricite de France (EDF). До кінця цього ж року в енергетичну мережу м. Женеви було введено вищезгаданий трансформатор. Принцип влаштування ВТНП трансформатора описаний [1,3]. Обмотки таких трансформаторів занурені в рідкий азот, що служить одночасно і ізоляцією, і середовищем, що охолоджує.

Основною метою кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз можливості підвищення ефективності роботи електропостачальних систем за рахунок переваг від застосування надпровідникових трансформаторів.

Для досягнення основної мети дослідження поставлено такі завдання:

- розробка математичної моделі електромагнітних перехідних процесів за наявності в електричній мережі надпровідникових трансформаторів;
- оцінка впливу надпровідникових трансформаторів на електромеханічні перехідні процеси;
- оцінка економічної ефективності та доцільності застосування надпровідникових трансформаторів в ЕЕС.

Об'єктом дослідження є електромагнітні перехідні процеси в електропостачальній системі за рахунок використання надпровідникових трансформаторів.

Предметом дослідження є вплив надпровідникових трансформаторів на електромеханічні перехідні процеси в енергетичних системах.

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань на основі математичної моделі електромагнітних перехідних процесів у ланцюгах, що містять надпровідникові трансформатори, та методах математичного аналізу та ін.

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

- розроблено алгоритм та його програмну реалізацію для розрахунку процесів переходу в нормальний стан та повернення до надпровідного стану ВТНП провідів другого покоління;
- надано економічну оцінку доцільності використання надпровідникових трансформаторів в ЕЕС з урахуванням сучасних та прогнозованих цін на ВТНП матеріали.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Гончаренко Ю. П., Васьківський О. Ю. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛАНЦЮГАХ, ЩО МІСТЯТЬ НАД ПРОВІДНИКОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ.

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.

Гончаренко Ю. П., Васьківський О. Ю. ВПЛИВ НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

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.

Васьківський О. Ю. ОЦІНКА КОМЕРЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

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

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У МЕРЕЖАХ З НАД ПРОВІДНИКОВИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Використання ВТНП проводів як проводів для обмоток трансформатора накладає особливості на роботу трансформатора, як в нормальних режимах, так і в аварійних. Структура ВТНП проводу впливає на електромагнітні перехідні процеси через «перемикаючого режиму» (режим переходу з НП стану в нормальний стан). Перемикаючий режим значно впливає на режими роботи ЕЕС.

Для оцінки наслідків застосування НРТ необхідно оцінити електродинамічний і тепловий вплив струму короткого замикання в довільний момент часу. Для вирішення поставленої задачі потрібно створити математичну модель НРТ, що дозволяє розраховувати електромагнітний перехідний процес, і здатну адекватно моделювати пристрій, враховуючи його параметри в нормальному та аварійному режимах і, що описує динаміку змін цих параметрів у ході процесу переходу в нормальне (резистивний) стан і повернення в НП стан. Також є потреба у визначенні можливості обмеження струмів короткого замикання при використанні ВТНП проводів другого покоління в НРТ. Необхідно провести аналіз факторів, що впливають на параметри переходу НП проводів у нормальний стан при КЗ, та факторів, що впливають на параметри повернення після усунення КЗ.

1.1. Перехід у нормальний стан та повернення у надпровідний стан ВТНП проводів другого покоління

Високотемпературні над провідники є неідеальними надпровідниками другого роду, тобто. перехід із надпровідного стану в нормальний стан відбувається не відразу, а є проміжний змішаний стан, при якому магнітне поле ще не повністю проникає в тіло над провідника. Змішаний стан існує в межах від першого критичного струму $I_{к1}$ до другого критичного струму $I_{к2}$. У

цьому стані струм протікає як по надпровідному шару, так і по ненадпровідних шарах. ВТНП провід можна представити схемою заміщення наведеною на рисунку 1.1.

У всіх трьох режимах активний опір ВТНП проводу визначається еквівалентним опором НП шару та ненадпровідних шарів

$$R_e(I, T) = \frac{R_{но}(T) \cdot R_{он}(T)}{R_{но}(T) + R_{он}(T)}, \quad (1.1)$$

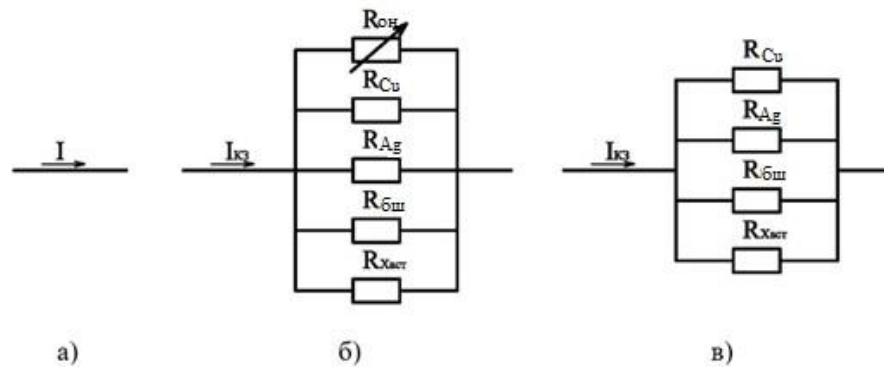


Рисунок 1.1 – Схема заміщення ВТНП проводу для НП стану (а), для змішаного стану (б) та для нормального стану (в)

де $R_{но}$ - опір ненадпровідних шарів;

$R_{он}$ – опір НП шару;

I - струм, який протікає по провіднику;

T - температура проводу.

Величина опору НП шару може бути знайдена з ВАХ ВТНП матеріалу

$$R_{он}(I, T) = \frac{10^{-6}}{I} \cdot \left(\frac{I}{I_k(T)} \right)^N, \quad (1.2)$$

де N - показник ступеня вольт-амперної характеристики ВТНП проводу, що визначає якість надпровідника;

$$I_k(T) = -\frac{I_{к0}}{0,1848} \cdot \ln\left(\frac{T}{77}\right). \quad (1.3)$$

де $I_k(T)$ - критичний струм ВТНП проводу при температурі T (при температурах понад 90 К $I_k(T)$ дорівнює нулю.);

$I_{к0}$ – критичний струм у власному полі при 77 К.

На рисунку 1.2 ВАХ представлено постійного струму.

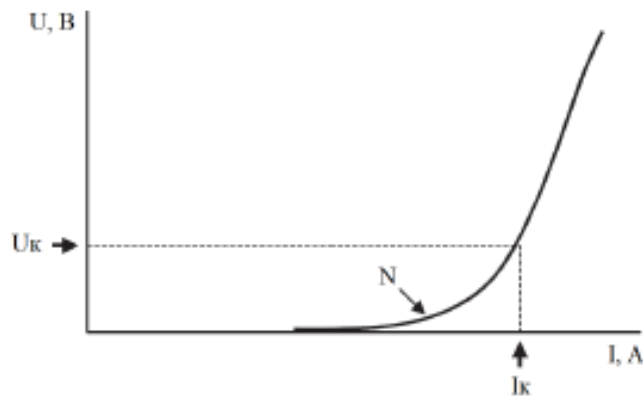


Рисунок 1.2 – Вольт-амперна характеристика ВТНП

Вважається, що ВТНП перейшов у нормальний стан, якщо на проводі довжиною 1 см з'являється напруга 1 мкВ.

Тоді активний опір ненадпровідних шарів визначається як

$$R_{но} = \frac{1}{1/R_{буи}(T) + 1/R_{Ag}(T) + 1/R_M(T) + 1/R_{хаст}(T)}, \quad (1.4)$$

де $R_{буи}$ - опір буферних шарів;

R_{Ag} - опір шару срібла;

R_M - опір мідного шару;

$R_{хаст}$ – опір хастелоя.

На рисунку 1.3 показані температурні залежності активних опорів вище представлених металів.

Найважливішим параметром є час повернення після усунення короткого замикання. Для визначення умови повернення в надпровідний стан під час без струмової паузи або під навантаженням необхідно визначити кількість тепла, що виділилася під час КЗ

$$Q(I, T) = \int_0^t I^2 R(T) dt. \quad (1.5)$$

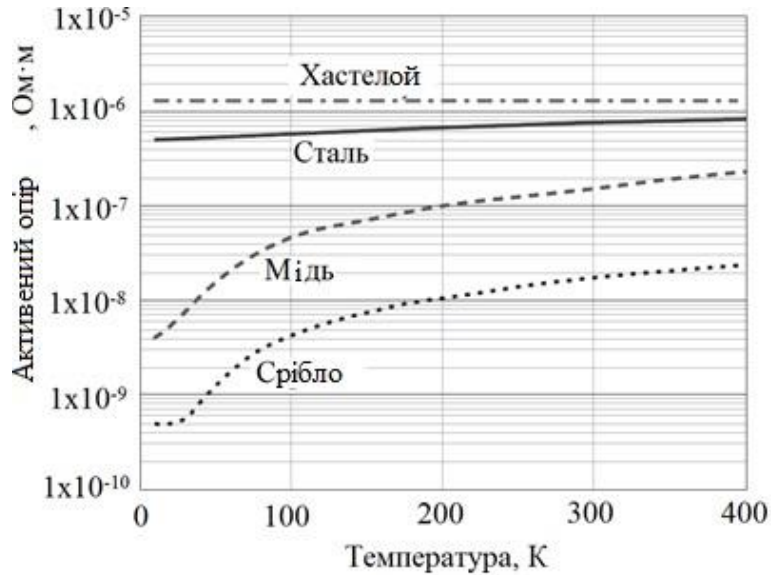


Рисунок 1.3 – Залежність опорів металів від температури
Збільшення температури дроту внаслідок тепловиділення визначається виразом [7]

$$C \frac{dT(I, T)}{dt} = Q(I, T) - Aq(T) \quad (1.6)$$

де C - повна теплоємність провода;

A - площа поверхні охолодження;

q - щільність теплового потоку, відводимого в рідкий азот з поверхні обмотки.

$$C = V_{\text{втпп}} c_{\text{втпп}}(T) + V_{\text{хаст}} c_{\text{хаст}}(T) + V_{\text{Ag}} c_{\text{Ag}}(T) + V_{\text{бш}} c_{\text{бш}}(T) + V_{\text{м}} c_{\text{м}}(T), \quad (1.7)$$

де $V_{\text{втпп}}$ $c_{\text{втпп}}$ - об'єм і питома об'ємна теплоємність ВТНП;

$V_{\text{хаст}}$ $c_{\text{хаст}}$ - об'єм і питома об'ємна теплоємність хастоля;

$V_{\text{бш}}$ $c_{\text{бш}}$ - об'єм і питома об'ємна теплоємність буферного шару;

V_{Ag} c_{Ag} - об'єм і питома об'ємна теплоємність срібла;

$V_{\text{м}}$ $c_{\text{м}}$ - об'єм і питома об'ємна теплоємність міді.

На рисунку 3.4. наведено залежність питомої теплоємності від температури для різних металів.

На рисунку 1.5 наведено залежність щільності теплового потоку рідкого азоту від різниці температури між охолоджуваною поверхнею (провід) і рідким азотом.

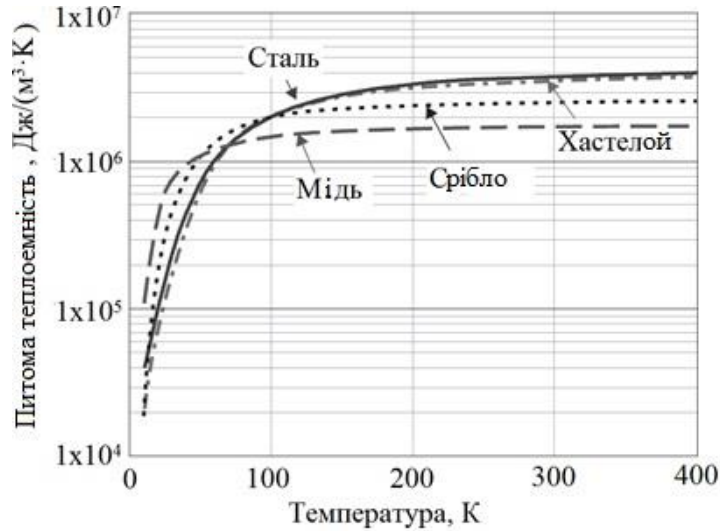


Рисунок 1.4 – Залежність питомої теплоємності металів від температури

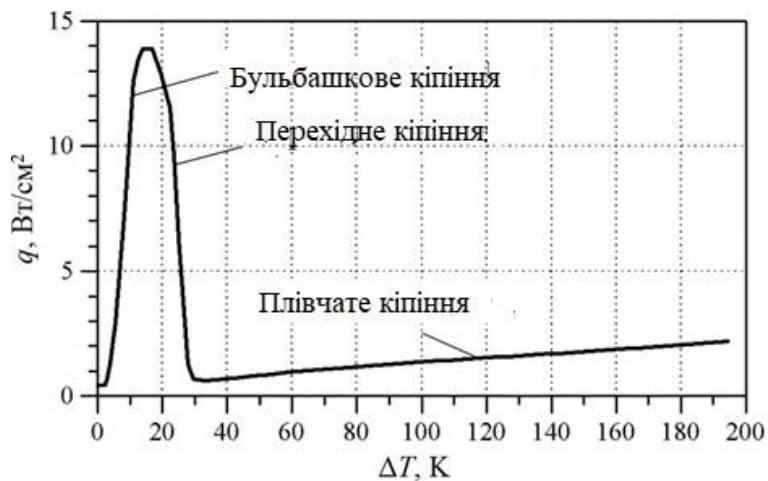


Рисунок 1.5 – Щільність теплового потоку в залежності від різниці температури між охолоджуваною поверхнею та охолоджувальною рідиною

З рисунка 1.5 видно, що найбільш ефективне охолодження має місце в діапазоні різниці температур від 4 до 30 К у режимах бульбашкового та перехідного кипіння.

Рівняння (1.1), (1.2) та рівняння, що описує зміну струму, повинні вирішуватись спільно. У результаті отримуємо нестационарне рівняння теплопровідності, яке описує зміну температури струмообмежуючої частини обмотки в залежності від струму, що протікає по ланцюгу, та часу

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) = T_0 + \frac{Q(I, T) - Aq(T)}{C(T)}, \quad (1.8)$$

де T_0 - початкова температура (77К).

На основі вищевикладеного у програмно-обчислювальному комплексі (ПВК) MATLAB реалізовано програму (див. додаток А) для розрахунку процесів переходу в нормальний стан та повернення в НП стан ВТНП проводу другого покоління. Спрощену блок-схему програми наведено на малюнку 1.6.

У програмі розраховується величина активного опору, падіння напруги на ВТНП проводі тощо. Передбачається, що спочатку по дроту протікає робочий струм, у момент часу 0,1 с відбувається КЗ тривалістю 0,1 с. Розрахунки були проведені для ВТНП проводів виробництва фірми SuperPower SCS12050 та SF12050.

Таблиця 1.1 – Параметри ВТНП проводів другого покоління

| Тип про- воду | Шири- на/товщина смуги, мм | I_k , А | Товщина шару Ag, мм | Товщина підлож- ки, мм | Товщина стабіліза- тора, мм | R_{HO} при 77 К, Ом/м |
|------------------|----------------------------------|-----------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| SF12050 | 12/0,1 | 250 | 0,002 | 0,05 | 0,009~ | 0,0736 |
| SCS12050 | 12/0,1 | 300 | 0,002 | 0,05 | 0,04 | 0,0061 |

На рисунках 1.7 та 1.8 показано температуру та опір проводів при виникненні КЗ та після його усунення. Момент часу 0,1 с відповідає початку КЗ, 0,2 с – його усунення. На рисунку 1.8 показано активний опір дроту з довжиною, що дорівнює довжині проводу, що використовується у вторинній обмотці трансформатора потужністю 40 МВА.

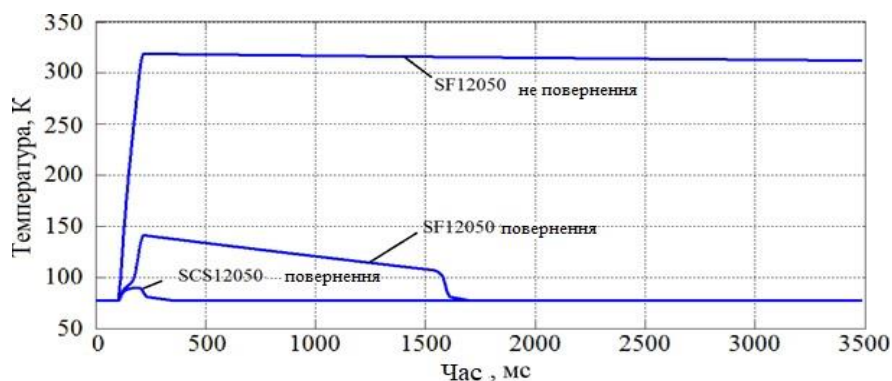


Рисунок 1.7 – Температура ВТНП проводів за різних умов

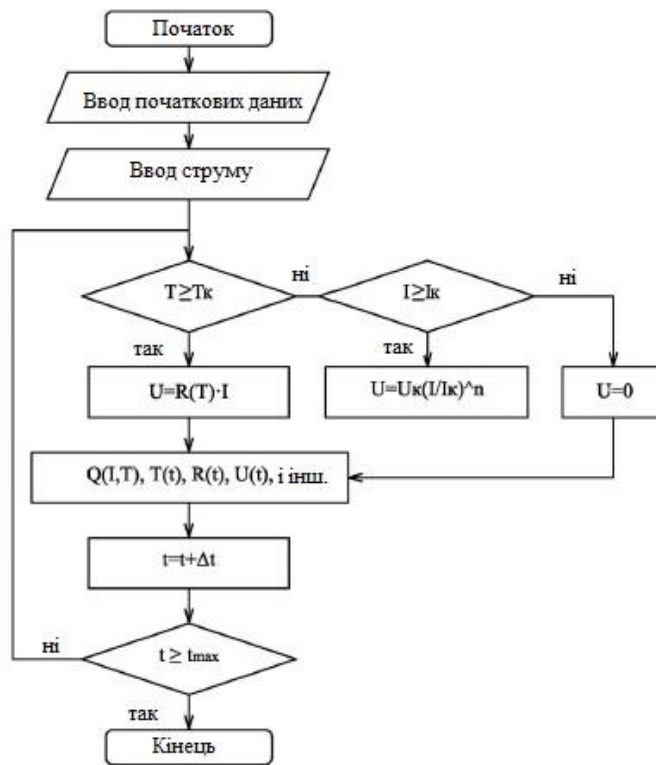


Рисунок 1.6 – Блок-схема програми для розрахунку процесів переходу в нормальний стан та повернення до НП стану ВТНП стрічки другого покоління

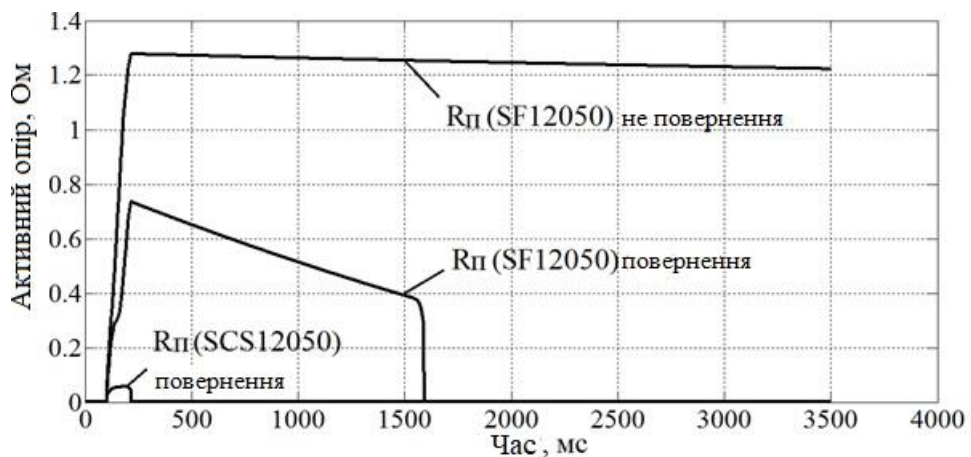


Рисунок 1.8 – Активний опір дроту під час та після усунення КЗ

У початковий момент переходу із НП стану в нормальний стан ударний струм КЗ обмежується опором ненадпровідних шарів, що відповідають температурі 77 К. Надалі протягом КЗ провід розігрівається, відповідно до температури збільшується активний опір.

Після усунення КЗ обмотка починає охолоджуватися. Однак, через велику різницю температур між обмоткою і рідким азотом щільність теплового потоку, що відповідає плівковому кипінню (див. рисунок 1.5), невелика і охолодження дроту займає деякий час. На рисунку 1.8 різке зниження опору в момент часу 1,6 с відповідає переходу від плівкового кипіння до перехідного кипіння і далі до бульбашкового кипіння. У режимі бульбашкового кипіння відведення тепла від нагрітої обмотки максимальне, і НП шар проводу швидко охолоджується до критичної температури. Для швидкого повернення трансформатора в НП стан може знадобитися примусова циркуляція рідкого азоту, що сприятиме зриву бульбашкової плівки в режимі плівкового кипіння.

Як порівняння результатів отриманих у ПК MATLAB на рисунку 1.9 показані результати експериментів, наведених у [8].

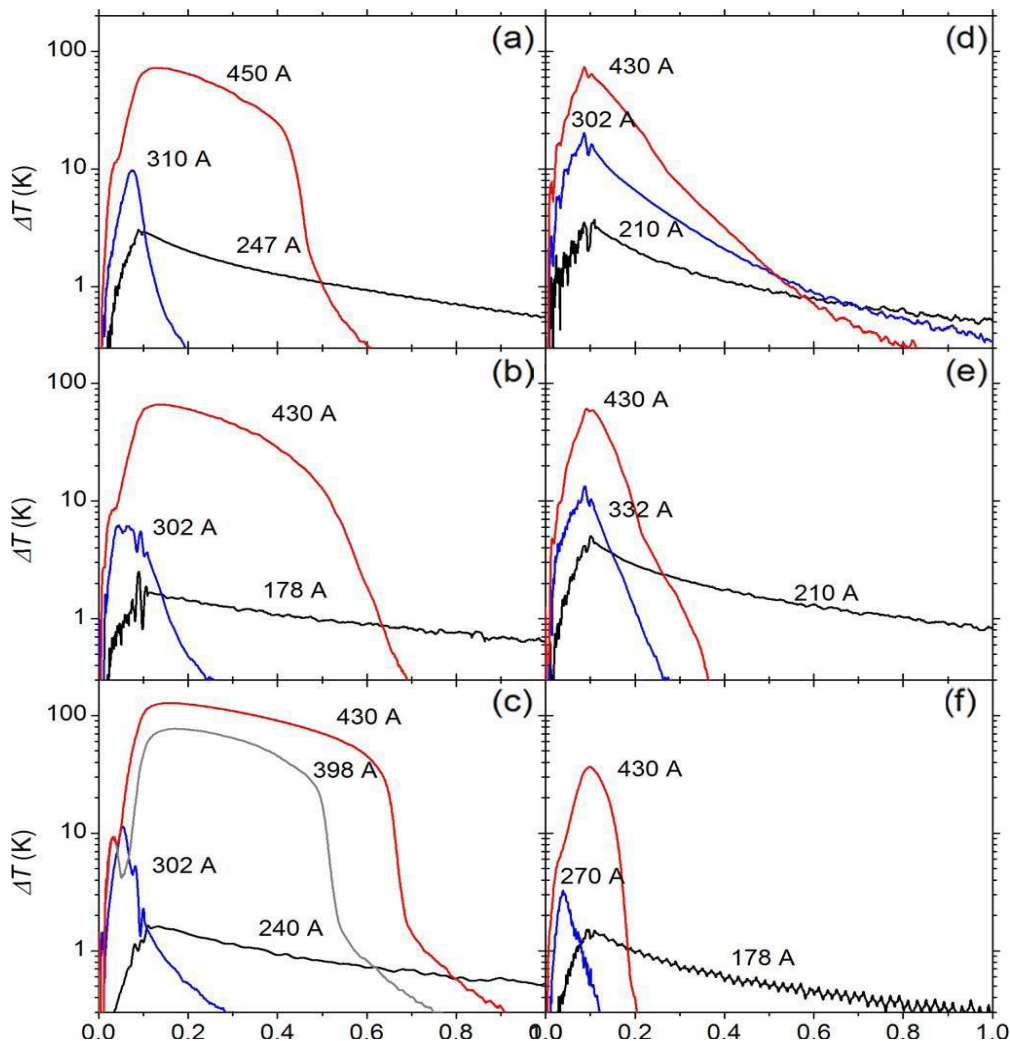


Рисунок 1.9 – Зростання температури при КЗ за різних умов [8]

На рисунку 1.9 (а) – ВТНП стрічка SCS4050 без ізоляції, (b) – та сама стрічка, піддана лазерній абляції, для збільшення шорсткості зразка, (c) – відполірована стрічка, (d) – стрічка, ізольована каптоном (поліімідна плівка) товщиною 25 мкм із гвинтовою намоткою, (e) – стрічка, ізольована каптоном (поліімідна плівка) товщиною 25 мкм із поздовжнім намотуванням, (f) – стрічка, вкрита лаком товщиною 75 мкм.

Примітно, що час охолодження стрічок ізольованих каптоном і лаком менший, ніж в інших випадках. Пояснюється це тим, що й поверхня має меншу шорсткість, тобто. велику площу поверхні охолодження.

У ПБК MATLAB також розраховувалися параметри переходу проводу у припущенні, що провід, що розраховується, використовується в НПТ потужністю 40 МВА. Передбачалося, що КЗ відбувається на приєднанні, що відходить, і усувається через 0,1 с без відключення трансформатора. При розрахунках було визначено, що повернення проводу до надпровідного стану після усунення КЗ залежить від співвідношень величин струму КЗ та навантажувального струму після усунення КЗ. Тобто співвідношення робочого струму та струму КЗ з урахуванням обмеження повинно бути таким, щоб тепло, що виділилося під час КЗ, не перевищило деякого критичного значення, понад яке для повернення в НП стан необхідно відключити трансформатор (рисунок 1.10).

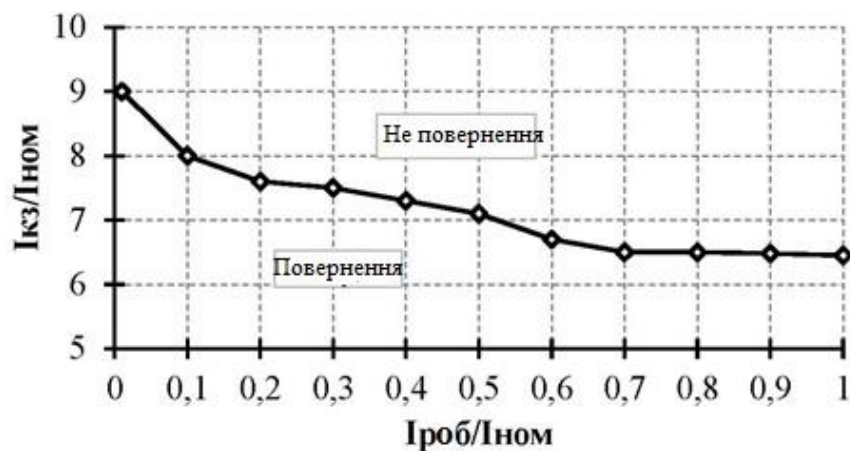


Рисунок 1.10 – Критерій повернення обмотки до НП стан після усунення КЗ

1.2. Математична модель електромагнітних перехідних процесів у ланцюгах, що містять надпровідникові трансформатори.

Як було показано у [5,6], параметри схеми заміщення НПТ мають відмінні значення від параметрів схеми заміщення звичайного трансформатора, що позначається на електромагнітних перехідних процесах. Разом про те, при виникненні КЗ, тобто. при перевищенні струму критичного значення надпровідник переходить із НП стану в нормальний.

Рівняння електричного кола, представленого рисунку 1.11, у разі виникнення КЗ описується диференціальним рівнянням

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = (L_C + L_T) \frac{di(t)}{dt} + i(t)(R_C + R_T(T)), \quad (1.9)$$

де R_C і L_C – активний опір та індуктивність системи;

R_T і L_T - активний опір та індуктивність трансформатор;

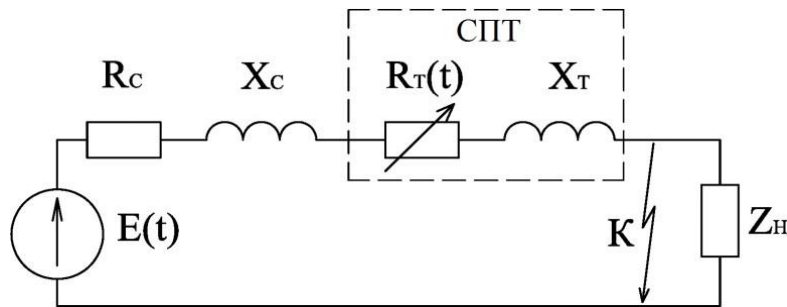


Рисунок 1.11 – Схема заміщення для розрахунку перехідного процесу

Рішення рівняння (1.9) має такий вигляд [9]

$$i(t) = \frac{U_m}{Z_\kappa} \sin(\omega t + \alpha + \varphi_\kappa) + \left[\frac{U_m}{Z_n} \cdot \sin(\alpha - \varphi) - \frac{U_m}{Z_\kappa} \cdot \sin(\alpha - \varphi_\kappa) \right] e^{\frac{-t\omega(R_C + R_T(T))}{X_\kappa}}, \quad (1.10)$$

тут Z_κ - повний опір короткозамкнутої ділянки.

З усього вищевикладеного впливає загальна математична модель обмеження струму КЗ за допомогою трансформатора з ВТНП обмотками, заснована на розв'язанні нестационарного рівняння теплопровідності (1.8) та диференціального рівняння змін струму короткого замикання (1.9).

$$\left\{ \begin{array}{ll} R_T = 0 & I \leq I_{\kappa} - \text{НП стан опору дорівнює нулю}; \\ R_T = \frac{R_{но}(T) \cdot R_{он}(T)}{R_{но}(T) + R_{он}(T)} & I_{\kappa} \leq I \leq I_{мо} - \text{перехід в нормальний стан}; \\ R_T = R_{но}(T) & I \geq I_{мо} - \text{струмообмежуючі дії}; \\ R_T = f(T) & I = 0 - \text{повернення в НП стан після відключення КЗ}. \end{array} \right. \quad (1.11)$$

З метою спрощення подання активного опору під час КЗ слід задавати його деякою елементарною функцією, наприклад, експоненційною

$$R_T = R_{т.кз} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (1.12)$$

де $R_{т.кз}$ - активний опір трансформатора на момент усунення КЗ;

τ_1 - постійна часу.

Значення τ_1 в основному залежить від величини струму КЗ, поперечного перерізу проводу і знаходиться в діапазоні 0,05 - 0,1с.

З метою спрощення активний опір під час процесу повернення також можна задавати експоненційною функцією

$$R_T = R_{т.кз} \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (1.13)$$

$R_{т.кз}$ - активний опір на момент відключення короткого замикання;

τ_2 - постійна часу.

Постійна часу τ_2 залежить від режиму кипіння рідкого азоту, величини післяаварійного струму і лежить у діапазоні 1-2 с для випадку повернення НП обмотки до НП стану.

У рівнянні (1.9) при підстановці (1.12) і (1.13) виходить нелінійне диференціальне рівняння, рішення якого неможливо виразити за допомогою елементарних функцій, як, наприклад, [9]. У цьому зв'язку це рівняння доцільно інтегрувати чисельно, використовуючи програмно-обчислювальні комплекси. Необхідно підкреслити, що під час повернення при досягненні дротом (обмоткою) критичної температури відбувається стрибкоподібне

зменшення опору. Задавати активний опір у цей час доцільно- лінійною функцією.

На рисунку 1.12 наведено криві струмів КЗ у разі використання звичайного мідного проводу та для випадку використання ВТНП проводу. Розрахунок струмів проводився у програмному комплексі АТР ЕМТР.

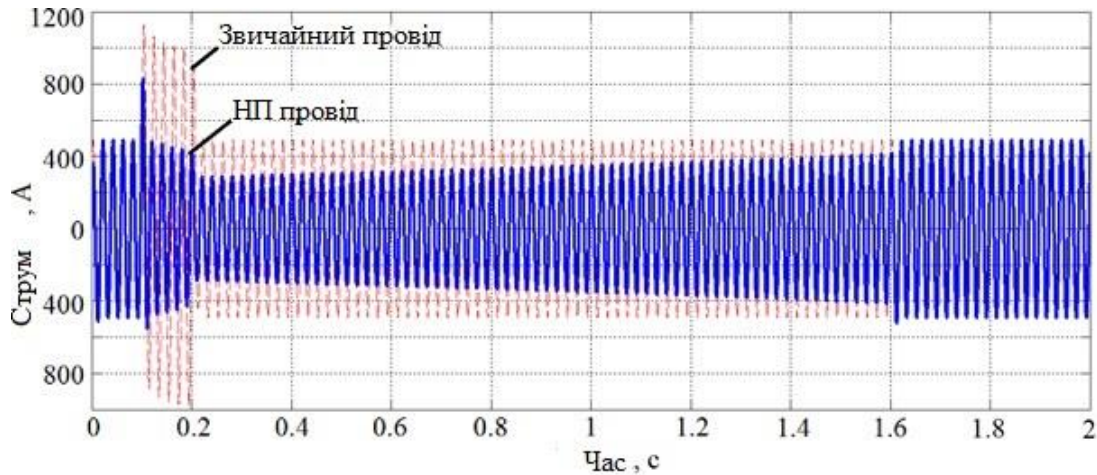


Рисунок 1.12 – Криві струмів КЗ для звичайного та ВТНП проводів

Таким чином, струм КЗ обмежується під час використання ВТНП проводів. Використовуючи значення струмів КЗ з обмеженням і без обмеження, введемо поняття коефіцієнта обмеження струму короткого замикання.

$$k_{обм} = \frac{i_{обм}}{i_{без\ обм}} . \quad (1.14)$$

У початковий момент КЗ, як було зазначено вище, ударний струм КЗ обмежується еквівалентним активним опором обмотки, що відповідає початковій температурі (77К), потім опір внаслідок зростання температури зростає. Як наслідок аперіодична складова струму КЗ у випадку з надпровідним проводом загасає швидше порівняно з випадком звичайного проводу, крім цього, періодична складова струму КЗ обмежується зростаючим опором. Однак, після усунення КЗ опір, що залишився, обмежує струм навантаження. На рисунку 1.12 час повернення триває з 0,2 з до 1,6 з. У момент повернення обмотки (проводу) в НП стан відбувається сплеск струму, пов'язаний зі зміною параметрів мережі - стрибкоподібним усуненням

активного опору. Величина сплеску залежить як від параметрів мережі, і від часу (моменту) повернення.

Для порівняння наводяться осцилограми, отримані експериментально в [4] та [10].

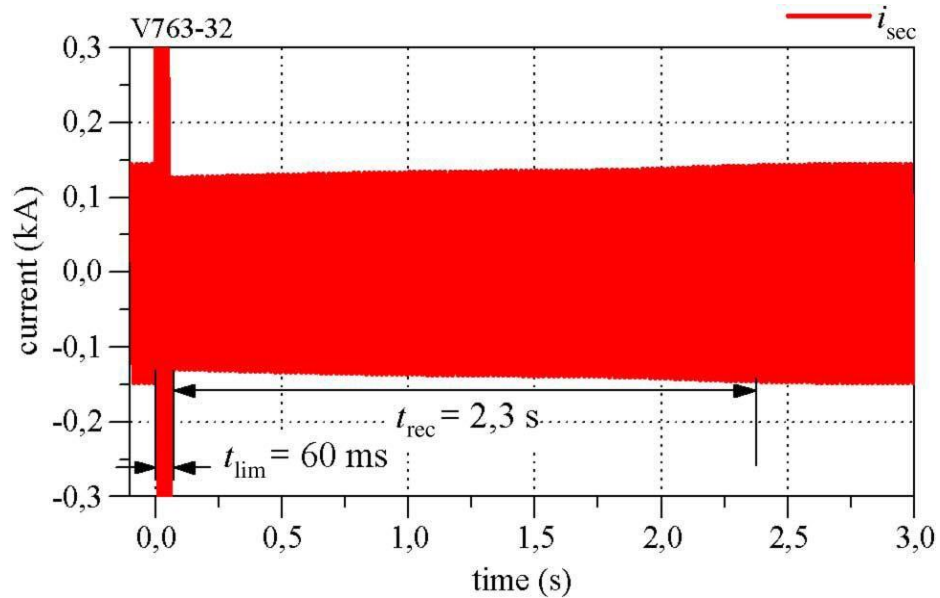


Рисунок 1.13 – Тимчасова залежність струму при поверненні під навантаженням [4]

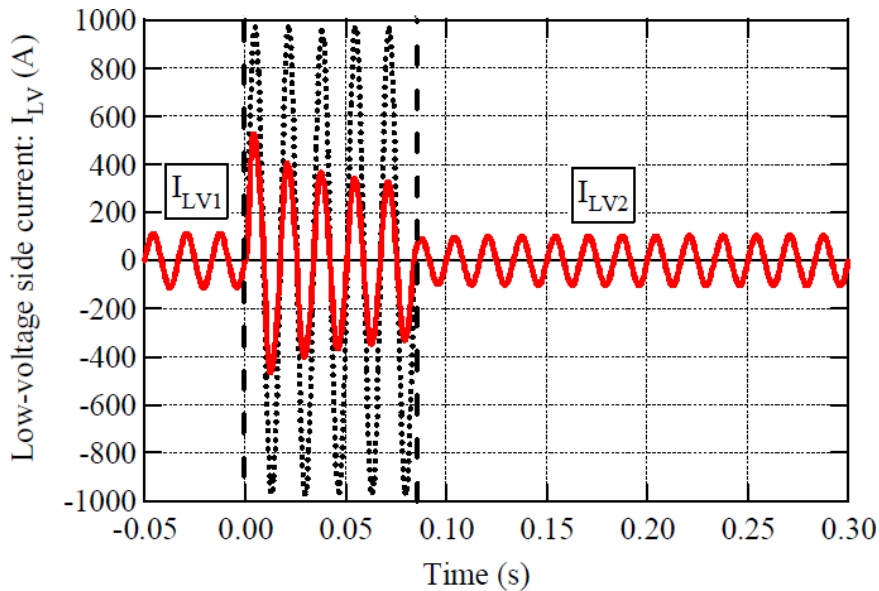


Рисунок 1.14 – Криві струмів при струмообмеженні та у процесі повернення [10]

З рисунків 1.13 та 1.14 видно, що запропонована математична модель добре збігається з результатами експериментів, проведених у [4] та [10].

1.3. Визначення можливості обмеження струмів короткого замикання

Справжній струм короткого замикання трансформатора в експлуатації перевершує струм КЗ, визначений за параметрами досвіду КЗ, приблизно на 37% через насичення магнітопроводу трансформатора [11]. В умовах зниження реактивного опору активний опір НПТ в аварійному режимі має забезпечувати необхідний рівень обмеження струму КЗ. Для визначення параметрів НПТ, що виявляються при КЗ, необхідно спроектувати основні розміри активної частини трансформатора. Як приклад, проводиться приблизний розрахунок НПТ потужністю 40 МВА зі співвідношенням напруг 115/11 кВ. Використовується ВТНП провід другого покоління виробництва фірми Super-Power SCS12050 з критичним струмом $I_k = 300$ А у власному полі та при 77 К. З урахуванням того, що I_k знижується при використанні на змінному струмі робочий критичний струм $I_{k, \text{роб}} = 300 \cdot 0,5 = 150$ А.

Фазний струм сторони ВН

$$I_{ВН_{ном}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{40000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 201 \text{ А.}$$

Фазний струм сторони НН

$$I_{НН_{ном}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{40000}{\frac{\sqrt{3} \cdot 11}{\sqrt{3}}} = 1212 \text{ А.}$$

Задамося індукцією в стрижні, що дорівнює $B_c = 1,6$ Т. Діаметр стрижня для трансформатора потужністю 40 МВА дорівнює $d = 0,6$ м. Коефіцієнт заповнення площі кола з $d = 0,6$ площею ступінчастої форми $k_{кр} = 0,92$. Тоді активний переріз стрижня

$$P_c = \frac{k_{кр} \cdot \pi d^2}{4} = \frac{0,92 \cdot \pi \cdot 0,6^2}{4} = 0,259 \text{ м}^2.$$

Напряга витка

$$U_g = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 0,259 = 92 \text{ В.}$$

Число витків обмотки НН

$$W_{HH} = \frac{U_{\Phi_{HH}}}{U_g} = \frac{11000}{92} = 119,56 \approx 120.$$

Число витків обмотки ВН

$$W_{BH} = \frac{U_{\Phi_{BH}}}{U_g} = \frac{115000 / \sqrt{3}}{92} = 721,68 \approx 722.$$

Робоча щільність струму у ВТНП проводі $j = 125 \text{ А/мм}^2$. Точний переріз витка обмотки ВН

$$P_{BH} = \frac{I_{\Phi_{BH}}}{j} = \frac{201}{125} = 1,6 \text{ мм}^2.$$

Орієнтовний перетин витка обмотки НН

$$P_{HH} = \frac{I_{\Phi_{HH}}}{j} = \frac{1212}{125} = 9,7 \text{ мм}^2.$$

Таким чином, в обмотці ВН намотується 2 проводи паралелі, в обмотці ПН 10 проводів паралелі.

Висота одного витка обмотки ВН з урахуванням ізоляції становить $h_{BH} = 14 \text{ мм}$. Округлимо число витків в обмотці ВН до 720 і припустимо, що кількість шарів $n_{ШАР_{BH}} = 10$. Тоді в одному шарі $W_{ШАР_{BH}} = 72$ витка і висота обмотки складає

$$h_{BH} = W_{ШАР_{BH}} \cdot h_{BH} = 72 \cdot 14 = 1008 \text{ мм}.$$

Обмотка НН на $W_{ШАР_{HH}} = 2$ має по 60 витков. Висота витка обмотки $h_{HH} = 14 \text{ мм}$, тоді висота обмотки НН

$$h_{HH} = W_{ШАР_{HH}} \cdot h_{HH} = 60 \cdot 14 = 840 \text{ мм}.$$

Товщина обмотки ВН

$$b_{BH} = t_{\text{витка.вн}} \cdot n_{ШАР_{BH}} = 2 \cdot 10 = 20 \text{ мм},$$

де $t_{\text{витка.вн}} = n_{\text{парал.вн}} \cdot t_{\text{пров}} = 2 \cdot 1 = 2$ - товщина витка.

Товщина обмотки НН

$$b_{HH} = t_{\text{витка.нн}} \cdot n_{ШАР_{HH}} = 10 \cdot 2 = 20 \text{ мм},$$

де $t_{\text{витка.нн}} = n_{\text{парал.нн}} \cdot t_{\text{пров}} = 10 \cdot 1 = 10$ - товщина витка.

Припустимо, що товщина кріостата становить 60 мм. Середня довжина витка обмотки НН

$$L_{\text{ср.нн}} = 2\pi (R_c + t_{\text{кріо}} + b_{\text{нн}} / 2) = 2\pi (0,3 + 0,06 + 0,01) = 2,323 \text{ м}$$

де R_c - радіус стрижня; $t_{кріо}$ - товщина кріостата.

Середня довжина витка обмотки ВН

$$\begin{aligned} L_{ср.вн} &= 2\pi(R_c + t_{кріо} + t_{об.нн} + \delta + b_{вн} / 2) = \\ &= 2\pi(0,3 + 0,06 + 0,004 + 0,03 + 0,01) = 2,537 \text{ м,} \end{aligned}$$

де $\delta = 0,03$ - головний ізоляційний проміжок.

Довжина всіх витків обмотки ВН

$$L_{об.вн} = L_{ср.вн} W_{ВН} = 2,537 \cdot 720 = 1826,64 \text{ м.}$$

Довжина всіх витків обмотки НН

$$L_{об.нн} = L_{ср.нн} W_{НН} = 2,323 \times 120 = 278,76 \text{ м}$$

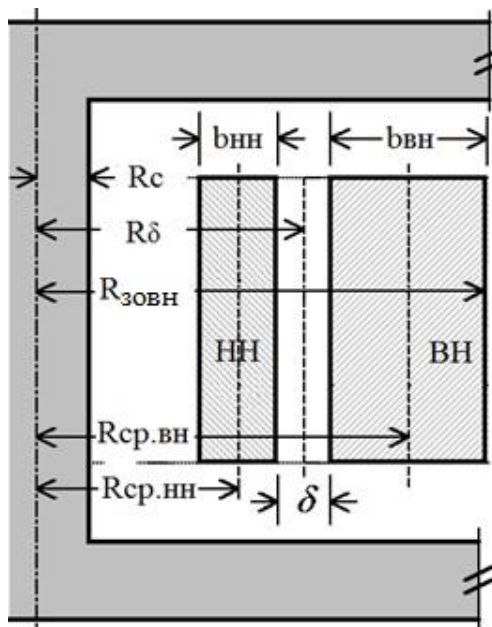


Рисунок 1.15 – До розрахунку індуктивного опору

Еквівалентний активний опір не надпровідних шарів при температурі 77 К $R_{но} = 0,0065$ Ом/м, тоді активний опір не надпровідних шарів обмотки ВН

$$R_{ВН} = L_{об.вн} R_{нс} / n_{парал.вн} = 1826,64 \times 0,0065 / 2 = 5,93 \text{ Ом.}$$

Активний опір обмотки НН

$$R_{НН} = L_{об.нн} R_{но} / n_{парал.нн} = 278,76 \cdot 0,0065 / 10 = 0,181 \text{ Ом.}$$

Активний опір трансформатора у початковий момент КЗ

$$u_a = \frac{I_{ном}(R_{ВН} + R'_{НН})100}{U_{\phi}} = \frac{201 \cdot 12,52 \cdot 100}{115000 / \sqrt{3}} = 3,7\%.$$

Активна складова напруги КЗ у початковий момент КЗ

$$u_p = \frac{100 \cdot S_{ном}}{U_{ном}^2} \frac{(2\pi)^2 \mu_0 f W^2}{h + 0,32(R_{внеш} - R_c)} \left(\frac{b_{нн}}{3} \left(R_{ср.нн} + \frac{b_{нн}}{4} \right) + \frac{b_{вн}}{3} \left(R_{ср.вн} - \frac{b_{вн}}{4} \right) + \delta R_\delta \right) =$$

$$= \frac{100 \cdot 40}{115^2} \frac{(2\pi)^2 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 720^2}{1,008 + 0,32(0,414 - 0,3)} \times$$

$$\times \left(\frac{0,02}{3} \left(0,37 + \frac{0,02}{4} \right) + \frac{0,02}{3} \left(0,404 + \frac{0,02}{4} \right) + 0,03 \cdot 0,385 \right) = 6,2\%.$$

Напруга короткого замикання у початковий момент КЗ

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_p^2} = \sqrt{3,7^2 + 6,2^2} = 7,2\%.$$

У таблиці 1.2 наведено параметри ВТНП проводів другого покоління та параметри НПТ для кожного варіанта ВТНП проводу. Провід SF12050, SCS12050 SCS4050 виробляється фірмою SuperPower, дроти 344С, 344S – фірмою American Superconductor. Наразі ці фірми є лідерами у виробництві ВТНП другого покоління.

Таблиця 1.2 – Параметри НПТ за різних параметрів НП проводу [12,13]

| | | | | | |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Тип проводу | SF12050 | SCS12050 | SCS4050 | 344С | 344S |
| Ширина/товщина, мм | 12/0,1 | 12/0,1 | 4/0,1 | 4,4/0,2 | 4,3/0,3 |
| Критичний струм, А | 250 | 300 | 90 | 75 | 80 |
| Товщина шару Ag, мм | 0,002 мм | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 |
| Товщина підложки, мм | 0,05 мм | 0,05 | 0,05 | 0,075 | 0,075 |
| Товщина стабілізатора, мм | 0,009 | 0,04 | 0,04 | 0,12(Cu) | 0,22(Fe) |
| $R_{нс}$, Ом/м | 0,0736 | 0,00605 | 0,0181 | 0,0057 | 0,266 |
| Число витків ВН/НН | 760/126 | 720/120 | 760/126 | 760/126 | 760/126 |
| Довжина кабеля в обмотці ВН/НН, м | 1876,7/ 287,3 | 1790,64/ 272,7 | 1883,8/ 287,7 | 1948,3/ 291,3 | 1988,9/ 294,5 |
| Число жил в кабелі ВН/НН | 4/24 | 2/10 | 12/68 | 14/80 | 12/76 |
| R обмотці ВН/НН | 34/0,89 | 5,81/0,177 | 2,84/0,07 | 0,8/0,02 | 44/1,03 |
| $u_{кз}$ в НП стані, % | 4,32 | 6,2 | 5,35 | 6,12 | 6,96 |
| $u_{кз}$ в норм. стані, % | 20,78 | 7,2 | 5,61 | 6,13 | 25,7 |
| Z_T в норм. стані, Ом | 68,7 | 15,3 | 18,5 | 20,3 | 85 |
| Струм КЗ, А | 966,1 | 4334 | 3574 | 3270 | 780 |

На величину струмообмежуючого опору більшою мірою товщина

мідного шару, яка безпосередньо впливає на час повернення НПТ після обмеження струму КЗ.

Загалом процес розрахунку НПТ можна представити блок-схемою, поданою на рисунку 1.16.

Величину необхідного активного опору пропонується підбирати шляхом часткового задіяння обмотки в обмеженні струму КЗ. Цього можна досягти використанням різних проводів з різними параметрами, при яких струмообмежувальна частина має достатній опір для обмеження струму КЗ, а нетокообмежувальна частина має незначний опір.

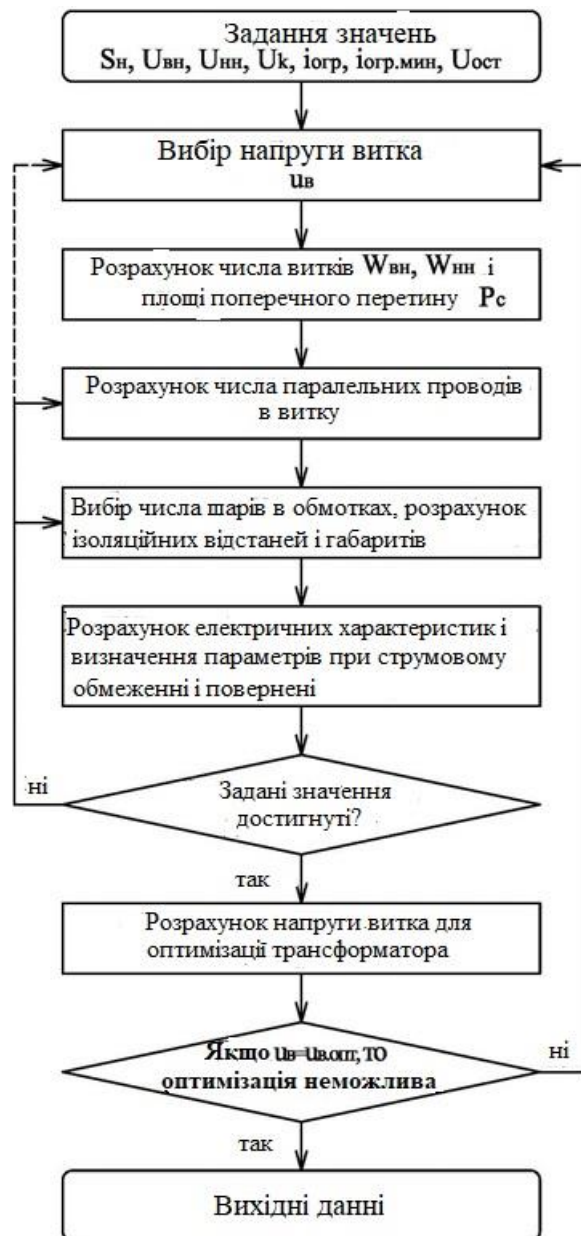


Рисунок 1.16 – Блок-схема розрахунку НПТ

При відомому $R_e(I, T)$ може бути знайдена необхідна довжина кабелю в обмежувальній частині обмотки.

$$l_{np} = \frac{R_{необ.} \cdot n_v \cdot n_{ш}}{R_e(I, T)},$$

де $R_{необ}$ - необхідний опір для обмеження струму КЗ;

n_v и $n_{ш}$ - число шарів в обмотці по висоті и ширині відповідно.

Число витків, задіяних в обмеженні струму КЗ

$$w = \frac{l_{np}}{2\pi \cdot r_g},$$

де r_g – середній радіус витка.

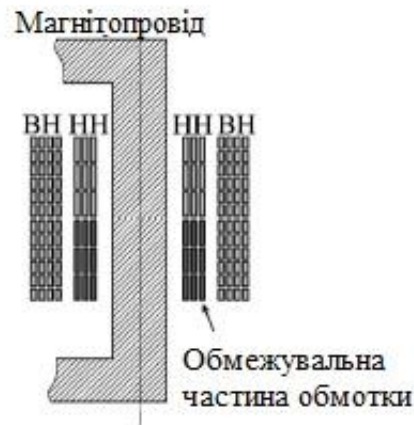


Рисунок 1.17 – Схематичний вигляд струмообмежуючої частини обмотки НПТ

Таке виконання дозволяє досягти не тільки необхідного значення активного опору, але також з'являється можливість домогтися швидкого повернення трансформатора в надпровідний стан під час безструмової паузи або після відключення КЗ на приєднанні, що відходить за рахунок використання додаткових засобів охолодження в струмообмежувальній частині обмотки.

Обмотки трансформатора під час КЗ зазнають значних механічних зусиль. У НПТ обмотки мають менший поперечний переріз, отже обмотки НПТ повинні бути сконструйовані таким чином, щоб витримувати ці зусилля.

Наприклад, використання транспонованих ВТНП проводів дозволяє

знизити як втрати у ВТНП проводі, а й збільшити механічну міцність обмотки [14].

1.4. Порівняльний аналіз випадків використання НПТ та звичайного трансформатора з розщепленою обмоткою

Проведемо порівняння випадків встановлення на підстанції НПТ та звичайного трансформатора з точки зору обмеження струмів короткого замикання. На рисунках 1.18 та 1.19 показані схеми у разі встановлення НПТ та звичайного трансформатора з наступними параметрами:

Система: $U_C = 115$ кВ, $R_C = 1$ Ом, $X_C = 10$ Ом;

НПТ: $S_{ном} = 40$ МВА, $U_{BH} = 115$ кВ, $U_{HH} = 11$ кВ, $u_k = 5$ %.

Звичайний трансформатор: $S_{ном} = 40$ МВА, $U_{BH} = 115$ кВ, $U_{HH} = 11$ кВ, $u_{кВ-Н} = 10,5$ %, $u_{кН-Н} = 38$ %, $\Delta P_{КЗ} = 170$ кВт.

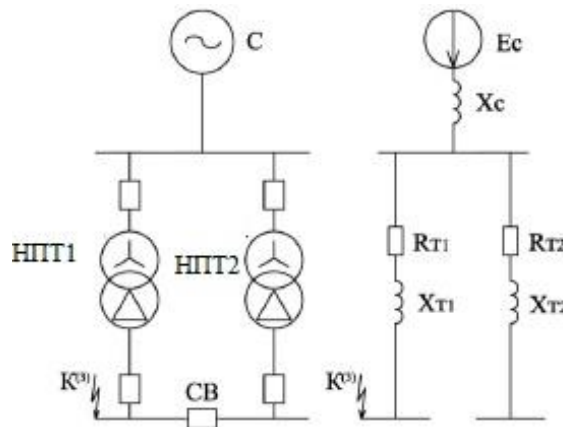


Рисунок 1.18 – Принципова схема та схема заміщення для розрахунку струмів КЗ у разі встановлення НПТ

Знаходимо індуктивний опір НПТ

$$X_{НПТ} = \frac{u_k U_{ном}^2}{100 S_{ном}} = \frac{5 \cdot 115^2}{100 \cdot 40} = 16,53.$$

Активний опір трансформатора с розщепленою обмоткою

$$R_B = \frac{\Delta P_{к} U_{ном}^2}{2 \cdot 10^3 S_{ном}^2} = \frac{170 \cdot 115^2}{2 \cdot 10^3 \cdot 40^2} = 0,7 \text{ Ом.}$$

$$R_{H1} = R_{H2} = 2R_B = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ Ом.}$$

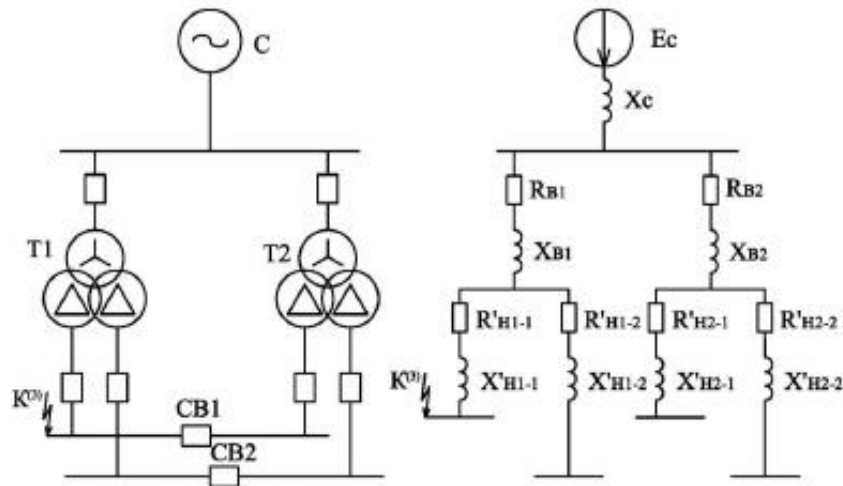


Рисунок 1.19 – Принципова схема та схема заміщення для розрахунку струмів КЗ у разі встановлення звичайного трансформатора з розщепленою обмоткою

Індуктивні опори трансформатора з розщепленою обмоткою

$$K_p = \frac{u_{кН-Н}}{u_{кВ-Н}} = \frac{38}{10,5} = 3,62,$$

$$Z_{B-H} = \frac{u_{кВ-Н}}{100} \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100} \frac{115^2}{40} = 34,71,$$

$$Z_{H-H} = \frac{u_{кН-Н}}{100} \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{38}{100} \frac{115^2}{40} = 125,63,$$

$$Z_{H1} = Z_{H2} = \frac{Z_{H-H}}{2} = \frac{125,637}{2} = 62,82,$$

$$Z_B = Z_{B-H} - \frac{Z_{H-H}}{4} = 34,715 - \frac{125,637}{4} = 3,30,$$

$$X_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2} = \sqrt{3,3^2 - 0,7^2} = 3,22,$$

$$X_H = \sqrt{Z_H^2 - R_H^2} = \sqrt{62,82^2 - 1,4^2} = 62,8.$$

Струм КЗ у разі використання НПТ, припущення, що в момент КЗ є активний опір величиною 20 Ом

$$I_{кЗ.НПТ} = \frac{U_C}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_C + R_{НПТ})^2 + (X_C + X_{НПТ})^2}} =$$

$$= \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1+20)^2 + (10+16,53)^2}} = 1,962 \text{ кА.}$$

Струм КЗ у разі використання трансформатора з розщепленою обмоткою

$$I_{\text{КЗ.ГРДН}} = \frac{U_C}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_C + R_B + R_H)^2 + (X_C + X_B + X_H)^2}} =$$

$$= \frac{115}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(1 + 0,7 + 1,4)^2 + (10 + 3,22 + 62,8)^2}} = 0,872 \text{ кА.}$$

Висновки по першому розділу

В наслідок проведеного аналізу можна відмітити що, струм КЗ на стороні НН обмежується переважно при розщепленні обмотки. І, отже, у НПТ має сенс також розщеплювати обмотку ПН для обмеження струмів КЗ на стороні ПН. У сукупності розщеплення обмотки та функція обмеження струмів КЗ НПТ дадуть значний ефект в обмеженні струму КЗ.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

Електромеханічні перехідні процеси, що виникають при великих збуреннях, мають тривалість близько 1-1000 с. Час переходу в нормальний стан та подальше повернення НПТ до НП стан входить у даний діапазон часу, тому необхідно оцінити вплив НПТ на електромеханічні перехідні процеси.

Над провідниковий трансформатор, як було показано вище, має менше індуктивного опору розсіювання в порівнянні зі звичайним трансформатором. При цьому під час короткого замикання НПТ може мати значний активний опір. У зв'язку з цим необхідно провести аналіз впливу НПТ на статичну та динамічну стійкість ЕЕС, в якій встановлено НПТ, з різними параметрами переходу до нормального стану та повернення до НП стану. Необхідно розглянути тепловий вплив струму КЗ у зоні струмового обмеження за допомогою НПТ.

При аналізі впливу використовуються різні програмно-обчислювальні комплекси.

2.1. Вплив над провідникових трансформаторів на статичну стійкість

Для оцінки впливу НПТ на статичну стійкість як приклад розглянемо найпростішу схему електропередачі, в якій генератор працює через трансформатор та лінію електропередачі на шини приймальної системи нескінченної потужності (ШБМ). Схема електропередачі наведена на рисунку

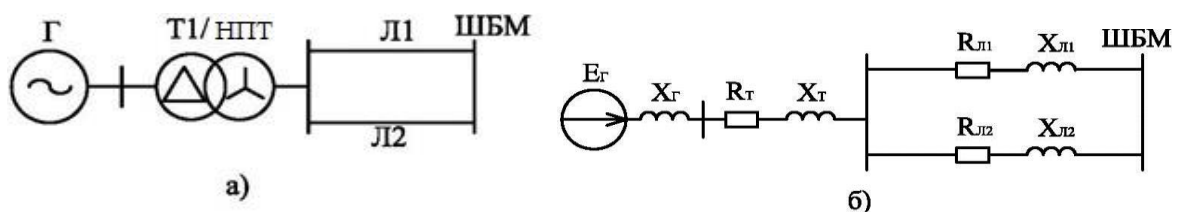


Рисунок 2.1 – Принципова схема (а) та схема заміщення (б) найпростішої електропередачі генератор-ШБМ

Кутова характеристика мощностей $P(\delta)$ має вид, приведений на рисунку 2.2.

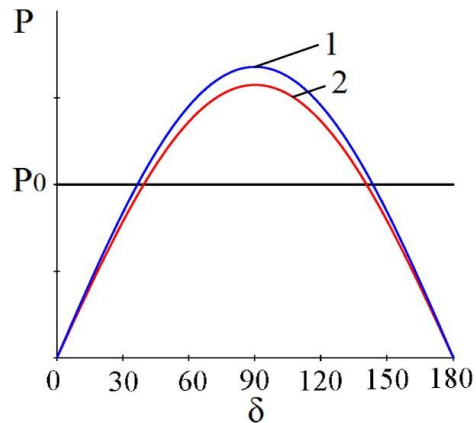


Рисунок 2.2 – Характеристики потужності: 1 – у випадку із НПТ; 2 – у випадку з традиційним трансформатором

З рисунка 2.2. очевидно, що синхронізуюча потужність у випадку НПТ має більше значення, ніж у випадку зі звичайним трансформатором

$$\frac{dP^{\text{НПТ}}(\delta)}{d\delta} > \frac{dP(\delta)}{d\delta}. \quad (2.1)$$

Тобто ця обставина може розглядатися як критерій поліпшення статичної стійкості ЕЕС.

Величина індуктивного опору НПТ залежить від прийнятих конструктивних рішень (розміри обмоток, параметри ВТНП проводу і т.д.) і як наслідок межа потужності, що передається, може змінюватись в залежності від ступеня зниження опору трансформатора. Визначимо співвідношення максимумів характеристик потужності для випадків використання НПТ та традиційного трансформатора (при рівності ЕРС систем)

$$\frac{P_{\text{макс}}^{\text{НПТ}}}{P_{\text{макс}}} = \frac{E_{\Gamma}^{\text{НПТ}} U_C \cdot X_{\Sigma}}{X_{\Sigma}^{\text{НПТ}} \cdot E_{\Gamma} U_C}, \quad (2.2)$$

і побудуємо залежність цього співвідношення від ступеня зниження опору трансформатора (рисунку 2.3) для прикладу.

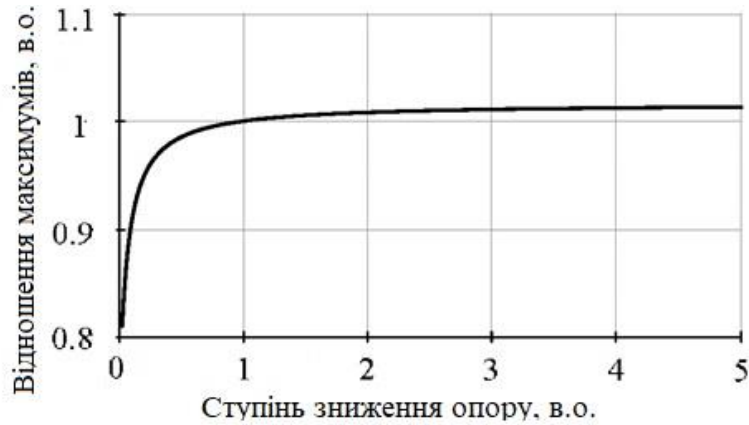


Рисунок 2.3 – Залежність відношення максимумів потужностей від ступеня зниження опору трансформатора

З рисунку 2.3 видно, що при заміні звичайного трансформатора на трансформатор із НП обмотками останній помітно впливає на межу потужності, що передається. Оцінимо чисельне збільшення межі потужності, що передається, з параметрами мережі, наведеними в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри мережі [15]

| | |
|---------------|--|
| Генератор | $S_{\text{НОМ}} = 235 \text{ МВА}, X'_d = 0,295 \text{ о.е.}, X_d = 1,7 \text{ Т}_j = 7,4 \text{ с}$ |
| Трансформатор | $S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}, U_{\text{ВН}} = 242 \text{ кВ}, u_k = 11\%, \Delta P_k = 600 \text{ кВт}$ |
| НПТ | $S_{\text{НОМ}} = 250 \text{ МВА}, U_{\text{ВН}} = 242 \text{ кВ}, u_k = 3\%$ |
| Лінія | $L = 150 \text{ км}, r_{\text{ЛПТ}} = 0,121 \text{ Ом/км}, x_{\text{ЛПТ}} = 0,435 \text{ Ом/км}$ |

При прийнятому опорі НПТ ($u_k = 3\%$) коефіцієнт запасу збільшується з 57 % у разі традиційного трансформатора до 60 % у разі НПТ. Потрібно відзначити, що в найпростішій схемі, в якій генератор працює на шини приймальної системи нескінченної потужності, вплив НПТ на характеристику потужності зменшено через великий опір генератора. У схемі ж, наприклад, з двома системами сумірної потужності збільшення межі потужності, що передається, більш виражено. Розглянемо дві електростанції, які можна порівняти за потужністю та працюють на загальне навантаження. Схема мережі наведена малюнку 2.4 [16], та її параметри у таблиці 2.2.

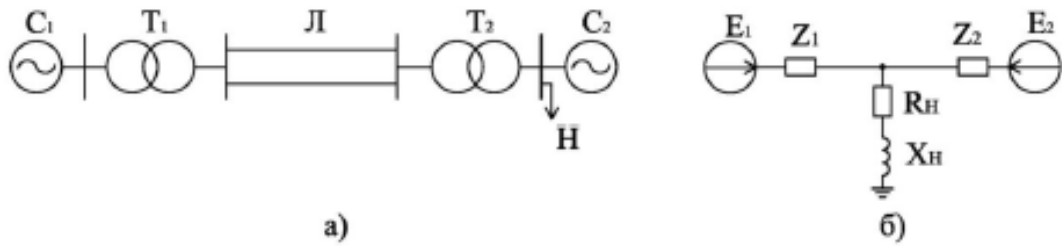


Рисунок 2.4 – Принципова схема (а) та схема заміщення (б) системи з двома електростанціями

Таблиця 2.2 – Параметри мережі

| | |
|----------------|--|
| Система | $E_1 = 115 \text{ кВ}, X_{C1} = 15 \text{ Ом}, E_2 = 115 \text{ кВ}, X_{C2} = 20 \text{ Ом}$ |
| Звичайний тр-р | $U_{BH} = 242 \text{ кВ}, S_{НОМ} = 250 \text{ МВА}, u_k = 11\%$ |
| НПТ | $U_{BH} = 242 \text{ кВ}, S_{НОМ} = 250 \text{ МВА}, u_k = 3\%$ |
| Лінія | $x_{y\delta} = 0,43 \text{ Ом/км}, r_{mm} = 0,12 \text{ Ом/км}, l = 100 \text{ км}$ |

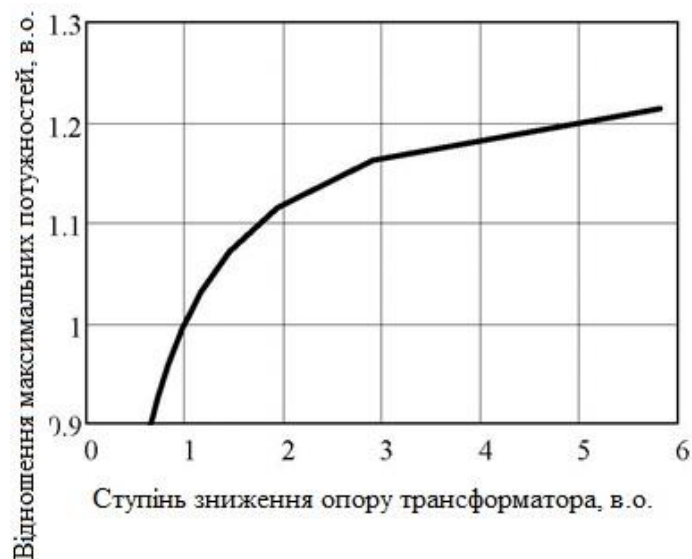


Рисунок 4.5 – Залежність відношення максимумів потужностей від ступеня зниження опору трансформатора

І в цьому випадку коефіцієнт запасу збільшується на

$$\Delta K_3 = \frac{P_{МАКС}^{НПТ} - P_{МАКС}}{P_{МАКС}} \cdot 100 = \frac{211,9 - 179,1}{179,1} \cdot 100 = 18,3\%.$$

Також слід зазначити той факт, що НПТ має велику перевантажувальну здатність, допустиме дворазове навантаження протягом 48 годин [16]. Таким чином, НПТ має позитивний вплив на межу потужності, що передається.

2.2. Вплив над провідникових трансформаторів на динамічну стійкість елементів мережі

Як було зазначено вище, НПТ обмежує струми КЗ. Розглянемо вплив НПТ із функцією обмеження струмів КЗ на динамічну стійкість. Обмеження струмів КЗ за допомогою НПТ носить резистивний характер, і, отже, відрізняється від [17], де для струмове обмеження використовується СОТ індуктивного типу. Порівняємо два випадки: випадок, коли в ЕЕС встановлено традиційний трансформатор і випадок, коли встановлений НПТ з струмовою обмежуючою функцією, причому НПТ повертається в НП стан після усунення короткого замикання.

Зазвичай під час розрахунку стійкості виявляють точку, де КЗ є найбільш небезпечним, і розрахунки проводяться з нею. Такий підхід дає дещо завищені результати на користь надійності. У схемі (рисунок 2.1) найнесприятливішою точкою трифазного КЗ є початок або кінець лінії, так як у разі передача потужності від генератора до системи відсутня.

На рисунку 2.6 показані кутові характеристики потужності у разі використання звичайного трансформатора. У робочому режимі генератор працює при деякому рівноважному куті θ . При виникненні трифазного КЗ потужність генератора падає майже до нуля, внаслідок чого ротор генератора починає прискорюватися, збільшується кут δ . Після відключення КЗ режим роботи визначається кутовою характеристикою P^{III} [18].

При використанні НПТ з'являється подовжній активний опір в момент КЗ обмежує струм КЗ і компенсує скидання потужності генератора, внаслідок чого ротор генератора прискорюється меншою мірою і, більше того, при великих значеннях активного опору може загальмуватися. Перехідні процеси у разі активного опору НПТ схожі з включенням навантажувальних резисторів. Однак, є деякі відмінності, пов'язані з тим, що

активний опір НПТ, що з'являється, виникає безпосередньо в початковий момент короткого замикання, а не до моменту відключення КЗ як у разі включення навантажувальних резисторів [18-20].

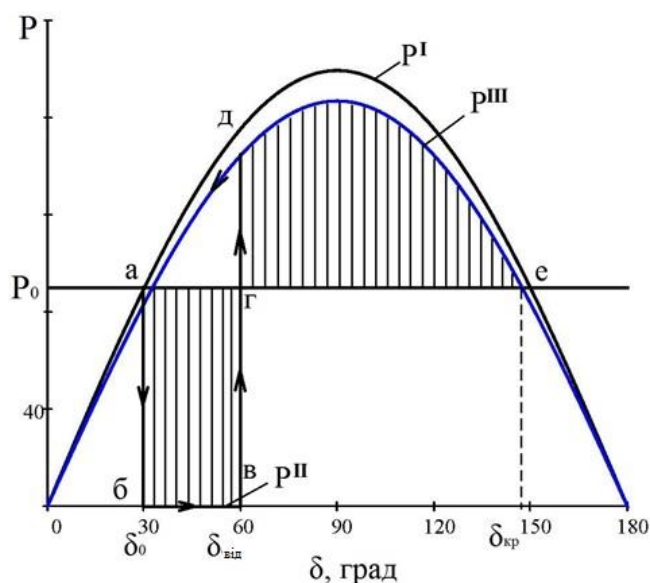


Рисунок 4.6 – Кутові характеристики потужності у разі використання звичайного трансформатора: P^I – доаварійна; P^{II} – під час аварії; P^{III} – після аварійна

На рисунку 4.7 показані кутові характеристики потужності у разі використання НПТ при малих значеннях активного опору, для яких амплітуда аварійної характеристики потужності набагато менша за амплітуду робочої характеристики. При цьому майданчик прискорення $abvcd$ виявляється меншим, ніж у разі використання звичайного трансформатора. Одночасно ця обставина супроводжується збільшенням майданчика гальмування за рахунок того, що НПТ не встигає миттєво повернутися в НП стан і активний опір, що залишився, піднімає характеристику потужності.

За деякого значення активного опору $R_{опт}$ аварійна характеристика потужності буде близька до доаварійної, що викличе мінімальні коливання кута δ .

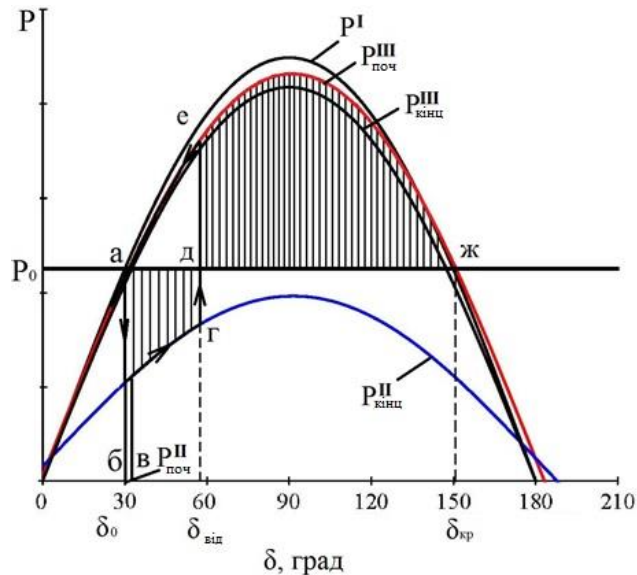


Рисунок 2.8 – Кутові характеристики потужності у разі використання СПТ при великих значеннях активного опору

Слід зазначити, що тривалий режим роботи у стані неповернення НПТ неекономічний через великі втрати. Крім того, виникають побоювання надмірних коливань кута та потужності при поверненні НПТ у НП стан.

2.3. Чисельний розрахунок параметрів електромеханічних перехідних процесів за наявності у мережі над провідникового трансформатора

Докладніше розглянемо вплив на електромеханічні перехідні процеси на прикладі мережі, наведеної на малюнку 2.1, з параметрами, наведеними в таблиці 2.1 На початку однієї з паралельної лінії відбувається трифазне КЗ після чого вона відключається, після усунення КЗ відбувається автоматичне повторне включення лінії через 0,4 с. Прийнято припущення, що генератор функціонує без системи автоматичного регулювання збудження. Розрахунок провадиться для випадку, коли в ЕЕС встановлено традиційний трансформатор, і для випадків НПТ з різними активними опорами. Активний опір трансформатора, що з'являється, під час короткого замикання (за

рахунок втрати НП) ставився як

$$R_T = R_{T.КЗ} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}),$$

шляхом послідовних включень паралельно-послідовних сполук активних опорів.

Під час повернення передбачалося, що активний опір також змінювався за експоненціальним законом

$$R_T = R_{T.КЗ} e^{-\frac{t}{\tau_2}},$$

шляхом послідовних відключень паралельно-послідовних сполук активних опорів.

Характер зміни активного опору показаний рисунку 2.9.

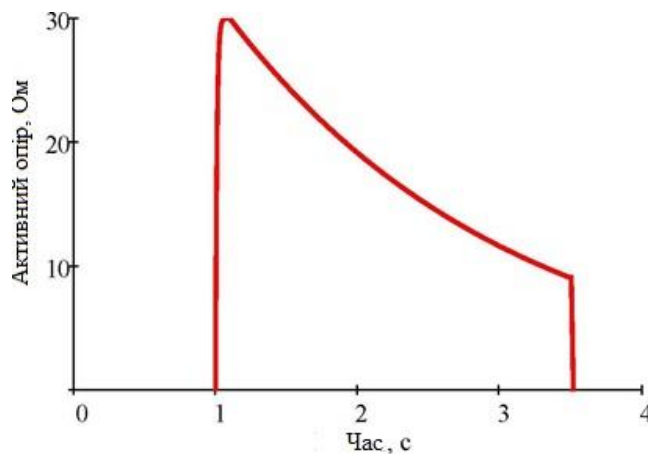


Рисунок 2.9 – Зміна активного опору НПТ у часі

На рисунку 4.10 наведено результати розрахунків відносного кута у програмному комплексі ПК Multisim для $\tau_1 = 1$ мс.

У разі використання НПТ з функцією обмеження струмів КЗ динамічна стійкість покращується до певного значення активного опору. Зі збільшенням активного опору розмах коливань збільшується.

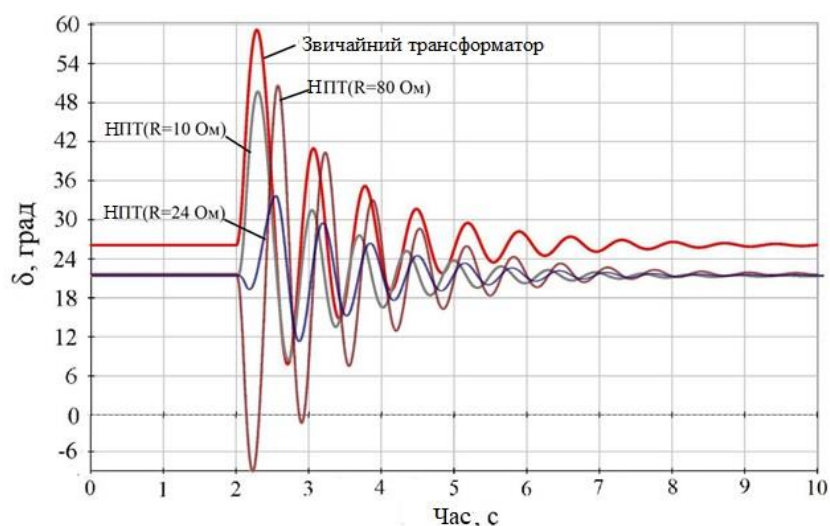


Рисунок 2.10 – Відносний кут ротора генератора для різних випадків
Залежність максимального кута від величини активного опору показана
на рисунку 4.11.

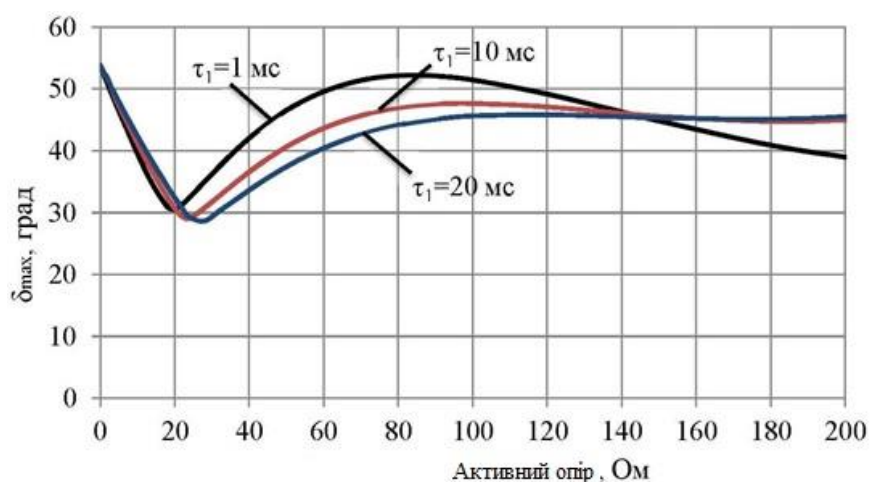


Рисунок 2.11 – Залежність амплітуди відносного кута ротора генератора
від активного опору трансформатора

На рисунках 2.12-2.14 наведено потужність, що віддається генератором у різних випадках.

Далі наводяться розрахунки, проведені в ПВК АТР ЕМТР, забезпеченому графічним інтерфейсом і стандартних компонентів електричних мереж, що поставляється в комплекті з бібліотеками. В даний час у всьому світі дослідники-електроенергетики широко використовують програму розрахунку електромагнітних перехідних процесів ЕМТР

(ElectroMagnetic Transient Program) та її некомерційну версію ATP (Alternative Transient Program). EMTP – універсальна система програмування для цифрового моделювання перехідних явищ як електромагнітного, і електромеханічного характеру. За допомогою цієї програми можуть моделюватися складні мережі та системи управління довільною структурою. EMTP використовується для аналізу комутаційних та грозових перенапруг, дослідження координації ізоляції та обертальних коливань електричних машин, моделювання релейного захисту та гармонійного аналізу, вивчення проблем якості електроенергії та електромагнітної сумісності тощо. [21].

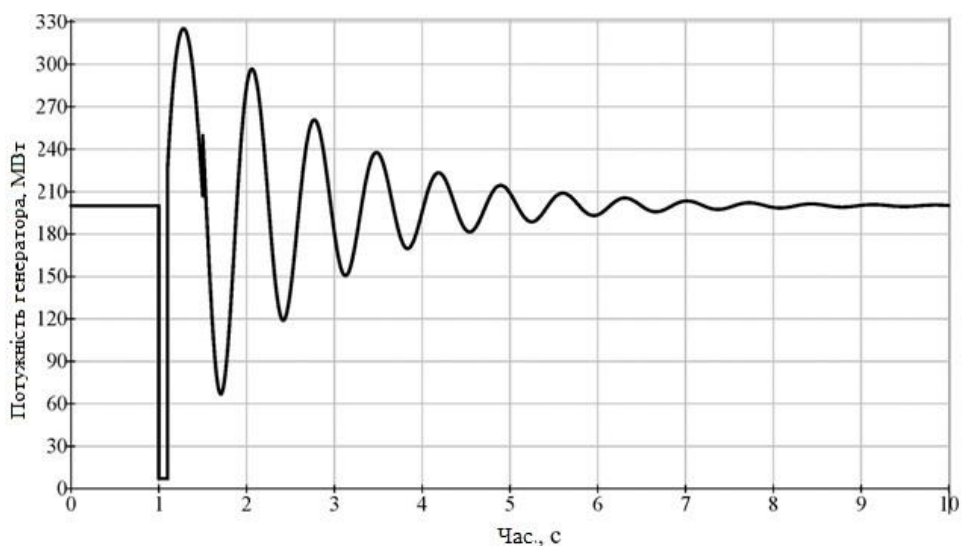


Рисунок 4.12 – Потужність генератора у разі використання звичайного трансформатора

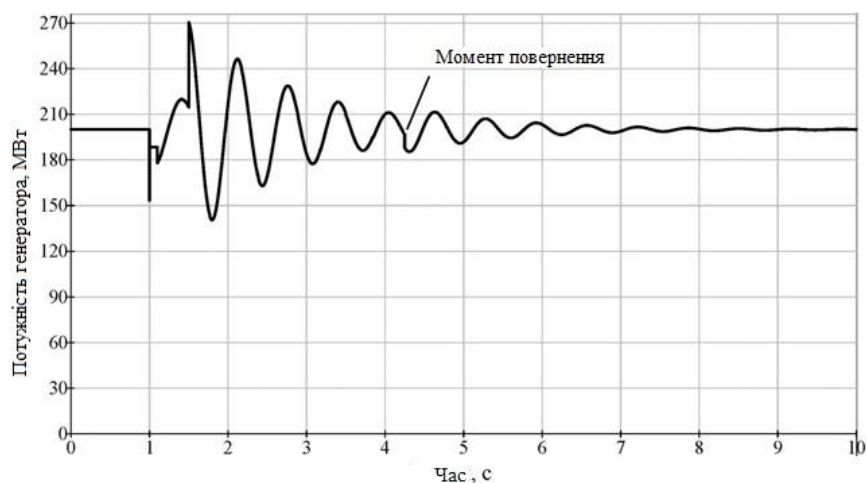


Рисунок 2.13 – Потужність генератора у разі використання НПТ при
 $R=20 \text{ Ом}$

Для наочного уявлення впливу НПТ на перехідні процеси момент інерції генератора задається великою величиною, з метою виключення коливань ротора генератора. На рисунку 2.14 показано криву струму під час та після усунення КЗ.

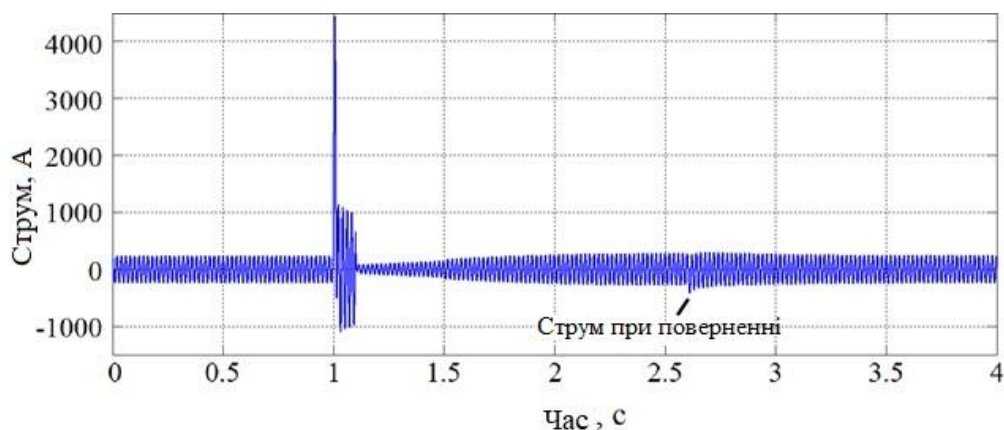


Рисунок 2.14 - Струм, що протікає через НПТ на стороні ВН при
 $R_{НПТ}=160 \text{ Ом}$ і $t_{\text{повернення}}=1,5 \text{ с}$

З рисунка 2.14 видно, що струм КЗ обмежується активним опором трансформатора, як і струм навантаження після усунення КЗ. У момент повернення НПТ в НП стан сплеск струму залежить від величини активного опору при поверненні та від часу повернення. Залежність цього сплеску від часу повернення наведена на малюнку 2.15.

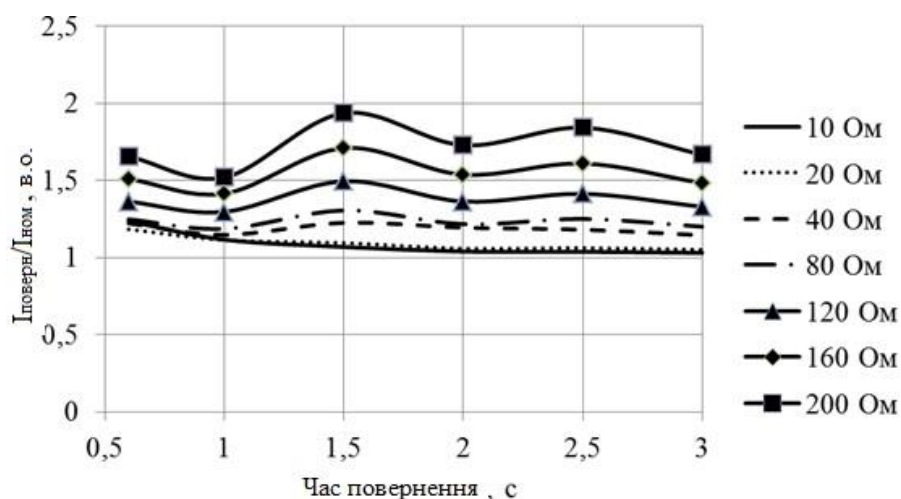


Рисунок 2.15 – Залежність струму при поверненні від часу повернення за різних значень активного опору НПТ

Внаслідок появи активного опору напруга на висновках НПТ має знижене значення після усунення КЗ, а в момент повернення спостерігається стрибок напруги, викликаний усуненням активного опору, що показано на малюнку 2.16.

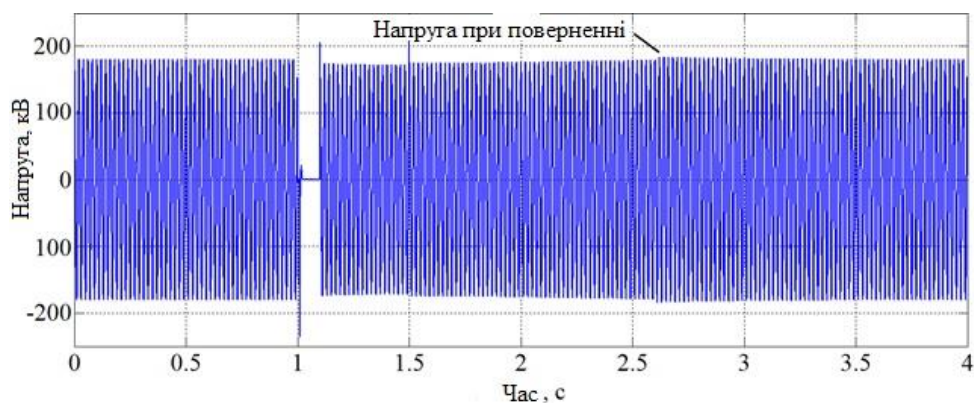


Рисунок 2.16 – Напруга на висновках НПТ при $R_{\text{НПТ}}=160$ Ом та $t_{\text{повернення}}=1,5$ с.

На рисунку 2.17 наведено залежність напруги на висновках НПТ у момент повернення час від часу за різних значень активного опору.

Величина сплесків напруги, як власне і сплесків струму, не великі при значеннях активного опору поблизу $R_{\text{опт}} \approx 20$ Ом для прикладу, що розглядається (рисунок 2.1).

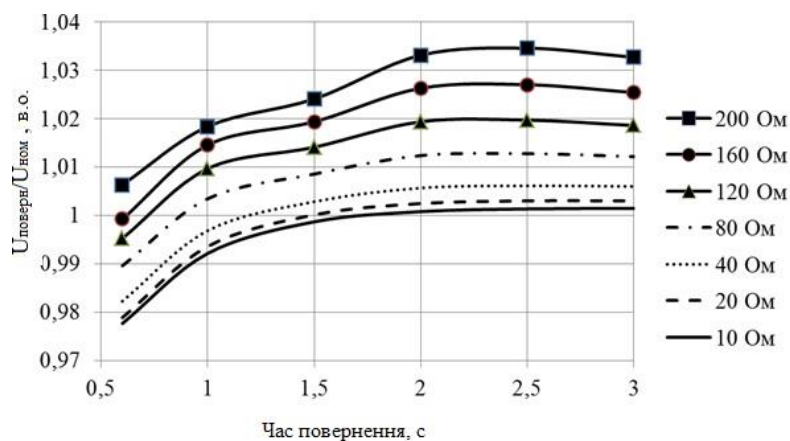


Рисунок 2.17 – Залежність напруги при поверненні від часу повернення за різних значень активного опору НПТ

На рисунку 2.18 показано залежність максимальної напруги від величини активного опору

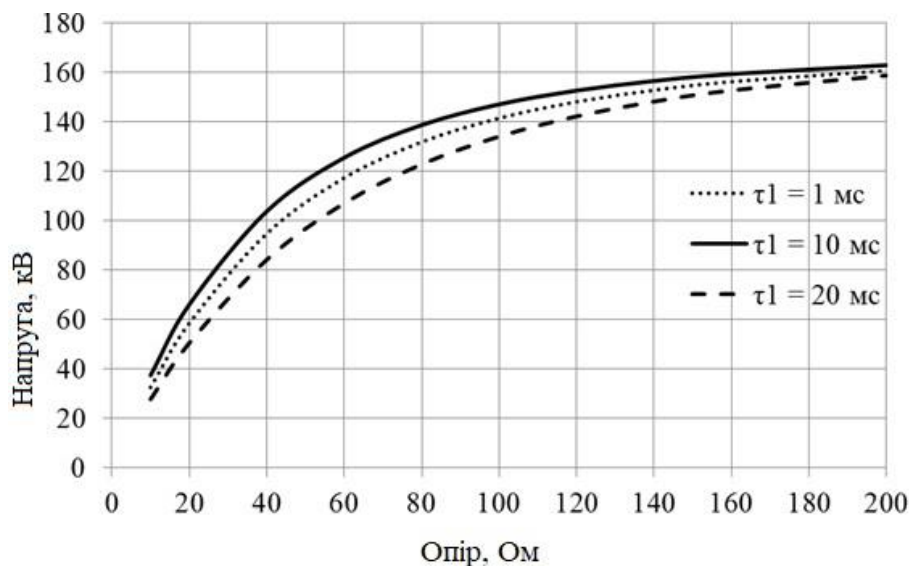


Рисунок 2.18 – Залежність падіння напруги від величини активного опору за різних постійних часу наростання активного опору

З рисунків 2.18 видно, що для оптимального активного опору величиною 20 Ом падіння напруги дорівнює 60 кВ. Необхідно відзначити, що ізоляція обмоток повинна бути розрахована на те, щоб витримувати ці перенапруження.

Максимум потужності має місце у початковий момент короткого замикання (у першому напівперіоді) і пов'язаний з дією ударного струму КЗ. Залежність максимальної потужності (потужності в початковий момент КЗ) від величини активного опору та для різних постійних часів його наростання наведено на рисунку 2.19.

На рисунку 2.20 показано максимальну кількість теплоти, що виділилася на момент повернення НПТ у надпровідний стан.

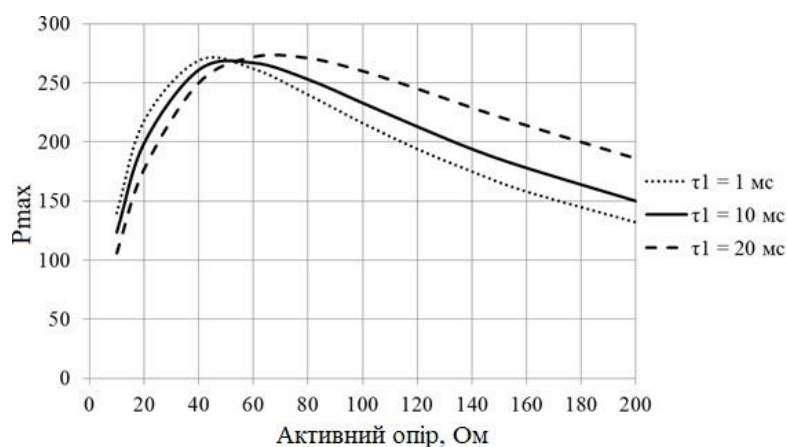


Рисунок 2.19 – Залежність максимальної потужності від величини активного опору за різних значень постійних часу наростання активного опору

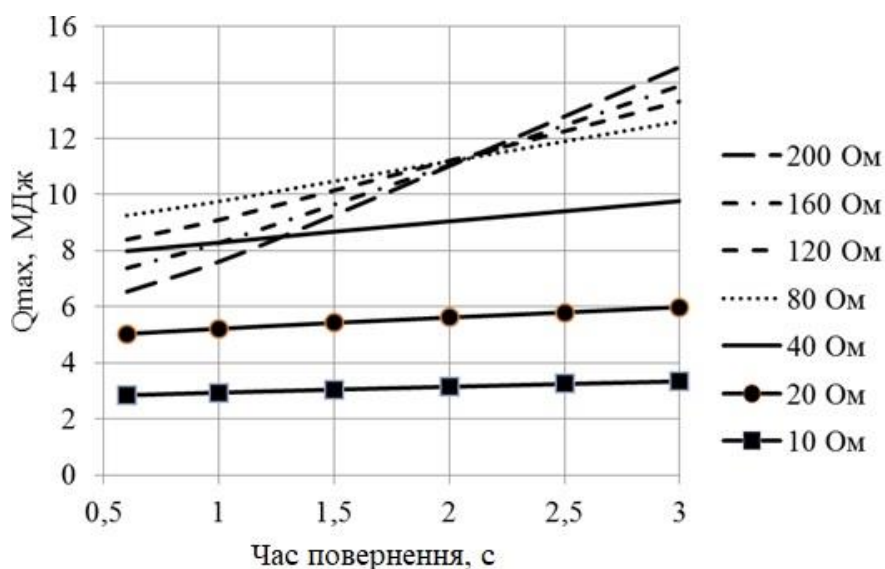


Рисунок 2.20 – Залежність кількості теплотворення від часу повернення при різних значеннях активного опору НПТ

З побудованих графіків видно, що момент повернення відіграє важливу роль, і повернення в НП стан повинен відбуватися в момент часу, не близький до моменту АПВ лінії, тому що активний опір, що усувається стрибком, викликає коливання потужності генератора і кута ротора. Також очевидно, що активні опори великої величини недоцільні з погляду виділення тепла активному опорі. Як видно з малюнків, оптимальне значення активного опору для розглянутого прикладу становить близько 20 Ом.

Теплоємності обмоток і охолоджуючої рідини повинні бути розраховані

для сприйняття тепла, що виділяється, а тривалість КЗ повинна бути обмежена.

Потрібно зазначити, що у разі неповернення НПТ до НП стан після обмеження струму КЗ необхідно відключати трансформатор для його повернення до НП стан, також слід зазначити, що тривалість протікання струму КЗ обмежується товщиною стабілізатора. Однак, при більшій товщині стабілізатора в нормальному режимі в стабілізаторі виникають великі втрати на вихрові струми і в аварійному режимі з'являється менший опір, що обмежує.

Висновки по другому розділу

1. НПТ суттєво впливають на електромеханічні перехідні процеси. Статична стійкість покращується через менший індуктивний опір СПТ. Показано, що коефіцієнт запасу зростає до 20%.

2. Динамічна стійкість може, як поліпшитися, і погіршитися залежно від величини активного опору. Активний опір НПТ, що з'являється в аварійному режимі, обмежує струм короткого замикання та компенсує скидання потужності генератора. Амплітуда аварійної характеристики генератора виявляється незрівнянно вищою за амплітуду аварійної характеристики генератора у випадку з традиційним трансформатором. Показано, що при деякому значенні активного опору аварійна характеристика виявляється майже рівною до аварійною, що забезпечує мінімальні коливання кута ротора генератора. Висунуто критерій покращення динамічної стійкості у разі використання НПТ.

РОЗДІЛ 3

ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО НАД ПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Сформулюємо кілька вимог, яким мають відповідати параметри НПТ, розглянувши їх з погляду стійкості електричного навантаження, комутаційної здатності високовольтного вимикача та обмеження струму КЗ з необхідною глибиною при успішному поверненні після усунення КЗ.

З метою з'ясування найпридатнішого місця встановлення НПТ, з погляду техніко-економічних параметрів потрібно провести розрахунки. У цьому розділі передбачається техніко-економічне порівняння використання НПТ потужністю 40 МВА зі співвідношенням напруг високої та низької сторони 115/11 кВ з традиційним трансформатором ТДН-40000/110 з аналогічними параметрами потужності та співвідношенням напруг. Трансформатори потужністю 40 МВА застосовуються в системах електропостачання великих промислових підприємств як трансформатори головних низьких підстанцій. У ході розрахунків належить оцінити капіталовкладення в об'єкт, втрати електроенергії за рік з урахуванням встановленого тарифу, економію витрат та визначити термін окупності об'єкта. Таким чином, провівши техніко-економічні розрахунки, можна буде оцінити комерційну ефективність застосування НПТ. Комерційна ефективність визначається зіставленням витрат і одержуваного ефекту. Як витрати розглядаються загальні річні експлуатаційні витрати, а як одержуваний ефект – економія витрат на втрати електроенергії у разі застосування НПТ.

Порівнювані варіанти відповідають умовам енергетичної сумісності (однаковий енергетичний ефект у споживача, однакова якість енергопостачання споживачів) та умовам економічної сумісності (порівняння в порівнянних цінах, в одному часовому періоді).

3.1. Формування вимог до експлуатації над провідникових трансформаторів

3.1.1. Вимога з погляду стійкості навантаження

Для промислових підприємств зі складними та безперервними технологічними процесами актуальною є проблема стійкості електричного навантаження під час збурень у системах електропостачання. При проектуванні НПТ необхідно враховувати вимоги до його параметрів, які будуть пред'явлені з позиції забезпечення стійкості електричного навантаження, для цього розглянемо вплив НПТ з функцією струмообмеження на динамічну стійкість навантаження, запитаного через нього. Короткі замикання призводять до короткочасних порушень електропостачання (КПЕ) споживачів. Тривалість КПЕ становить від 0,1 до декількох секунд, проте, незважаючи на малу тривалість збурень, вони можуть викликати втрату динамічної стійкості вузлів електричного навантаження [22]. Збурення у внутрішній або зовнішній частині системи електропостачання (СЕС) виявляються у вигляді провалів напруги певної глибини та тривалості. При симетричних аварійних збуреннях в електричних мережах залишкова напруга вузла характеризується значенням, що діє. При несиметричних аварійних збуреннях залишкова напруга характеризується діючими значеннями симетричних складових, стійкість вузла залежить від значень прямої та зворотної складових напруги. Для вузлів електричного навантаження напруга є первинним параметром, що визначає режим вузла, тому межі стійкості визначаються в координатах напруги або її складових [22].

Кордон статичної стійкості вузла електричного навантаження при симетричних збуреннях визначається одним параметром - значенням напруги статичної стійкості U_{CC} , що вимірюється у відносних одиницях (в.о.). U_{CC} - мінімальним значенням ЕРС, при встановленні якої не відбувається лавиноподібного зниження напруги. Кордон динамічної стійкості вузла електричного навантаження при симетричних збуреннях визначається як залежність $\tau(u)$ - максимально допустимого часу $\tau(c)$ збурення від величини

залишкової напруги. Величина τ_0 - максимально допустимий час існування збурення, що не викликає порушення динамічної стійкості вузла навантаження при залишковій напрузі, що дорівнює нулю [21].

Навіть при струмообмеженні за допомогою НПТ для запобігання пошкодженню електродвигунів, що загальмувалися в результаті КПЕ, а також для полегшення умов самозапуску та автоматичного повторного запуску відповідальних механізмів використовується захист мінімальної напруги (ЗМН). Як вихідний орієнтир критеріїв стійкості електричної можна прийняти положення п. 3.3.85 і п. 5.3.52 ПУЕ [74]. Вставку ЗМН рекомендується приймати рівною $0,7 \cdot U_{НОМ}$, а час спрацьовування від 0,5 до 1,5 сек. Ці значення можна використовувати для формування вимоги до параметрів НПТ при струмообмеженні за допомогою нього.

Залишкова напруга на шинах ($U_{ЗАЛ}$) при струмообмеженні під час КЗ за допомогою НПТ визначається як

$$\frac{U_{ЗАЛ}}{\sqrt{3} \cdot E_{ЕКВ}} = \frac{Z_{НПТ}}{Z_{ЕКВ} + Z_{НПТ}} = \frac{\left(\frac{Z_{НПТ}}{Z_{ЕКВ}}\right)}{1 + \left(\frac{Z_{НПТ}}{Z_{ЕКВ}}\right)}, \quad (3.1)$$

Напруга, при якій не відбувається лавиноподібного зниження напруги (U_{CC}), у відносних одиницях $U_{CC}^* = U_{CC} / U_{НОМ}$, тоді з урахуванням цього отримуємо, що

$$U_{CC}^* = \frac{\left(\frac{Z_{НПТ}}{Z_{ЕКВ}}\right)}{1 + \left(\frac{Z_{НПТ}}{Z_{ЕКВ}}\right)}, \quad (3.2)$$

звідси визначається опір НПТ, при якому зберігається стійкість навантаження.

$$Z_{НПТ} = \frac{U_{CC}^* \cdot Z_{ЕКВ}}{1 - U_{CC}^*}.$$

Відношення опору НПТ до опору ЕЕС

$$\frac{Z_{НПТ}}{Z_{ЕКВ}} = \frac{U_{CC}^*}{1 - U_{CC}^*}, \quad (3.3)$$

Залежність відношення опорів НПТ та ЕЕС від напруги стійкості навантаження у відносних одиницях представлена на рисунку 3.1, на якому область стійкості навантаження за напругою розташовується над наведеною кривою.

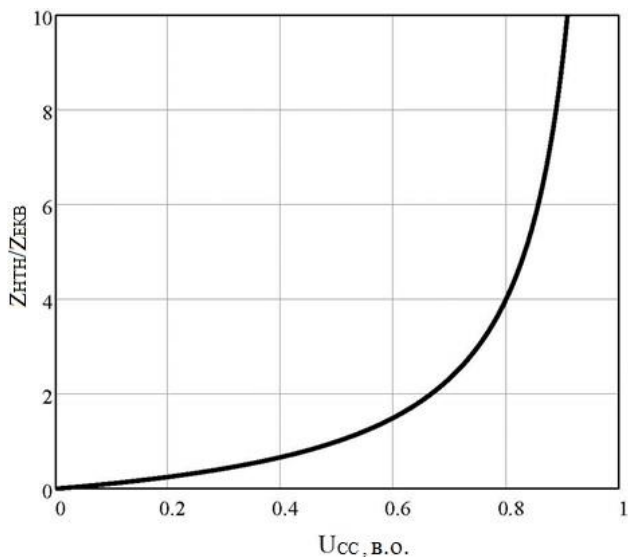


Рисунок 3.1 – Залежність відношення опору НПТ та ЕЕС від мінімальної напруги стійкості навантаження

3.1.2. Вимоги щодо обмеження струму КЗ

З викладеного в розділі 1, зокрема у пп. 1.2-2.4 слідує, що необхідно підбирати значення активного опору НПТ для ефективного обмеження струму КЗ та повернення в НП стан з мінімальною шкодою робочому режиму.

Припускаючи, що активний опір НПТ у початковий момент короткого замикання відповідає температурі 77 К, для достатнього обмеження струму КЗ має виконуватися умова

$$R_{НПТ}(77) > R_{MIN}, \quad (3.4)$$

де $R_{НПТ}(77)$ - активний опір НПТ при температурі рідкого азоту;

R_{MIN} – мінімально потрібний активний опір для обмеження струму КЗ.

В умовах струмового обмеження має виконуватися умова за максимально можливою температурою

$$T_{\text{ПРОВОДУ}}(t_{\text{відкл}}) < T_{\text{МАХ}}, \quad (3.5)$$

де $T_{\text{ПРОВОДУ}}(t_{\text{відкл}})$ – температура проводу на момент усунення КЗ;

$T_{\text{МАХ}}$ – максимальна допустима температура за умовами повернення, механічної міцності тощо.

Для швидкого повернення в НП стан електрично підведена потужність (до активного опору, що залишився) повинна бути менше потужності, яка відводиться термічно тепловим потоком. Це реалізується тим, що $R_{\text{НПТ}}$ підбирається шляхом вибору необхідної товщини стабілізатора ВТНП проводу. Тоді з урахуванням виразів (3.3) та (3.5)

$$R_{\text{НПТ.МАХ}}(T_{\text{МАХ}}) = \frac{q(T_{\text{МАХ}})A}{I_{\text{ПОВЕР}}^2(T_{\text{МАХ}})}, \quad (3.6)$$

де $I_{\text{ПОВЕР}}$ - навантажувальний струм, при якому відбувається повернення в НП стан.

Отже

$$R_{\text{НПТ}}(T_{\text{МАХ}}) \leq R_{\text{НПТ.МАХ}}(T_{\text{МАХ}}). \quad (3.7)$$

Повернення трансформатора після обмеження струму КЗ одна із найважливіших параметрів даного пристрою. Тривала робота обмоток у нормальному стані призводить до великих втрат і відповідно до значних тепловиділень. Тому необхідно, щоб НПТ повертався в НП стан якнайшвидше. Однак з іншого боку, повернення НПТ в момент часу близькому моменту АПВ лінії викликає коливання потужності та кута ротора генератора (при встановленні поблизу генератора). Отже, час повернення НПТ повинен бути більшим за час повторного включення лінії

$$t_{\text{повернення}} > t_{\text{АПВ.лінії}}. \quad (3.8)$$

3.2 Оцінка комерційної ефективності застосування над провідникових трансформаторів

Економія електроенергії – одне з найважливіших завдань. Щоб її

вирішити, необхідний показник, з яким можна було б порівняти фактичні досягнення підприємств; таким показником є потенційна можливість економії електроенергії, допустима з економічних міркувань під час впровадження нових досягнень науки і техніки, організаційно-технічних заходів тощо; оптимальним вважається захід, що забезпечує мінімум наведених річних витрат [23].

Показником режиму електроспоживання протягом року загалом є тривалість (чи кількість годин використання) найбільшого навантаження (рисунок 3.2).

Втрати у трансформаторі протягом року визначаються виразом

$$\Delta W = \Delta P_{XX} \cdot t + \Delta P_{KЗ} \cdot \beta^2 \cdot \tau, \quad (3.9)$$

де ΔP_{XX} – втрати холостого ходу; t – час роботи; $\Delta P_{KЗ}$ – втрати короткого замикання; β - коефіцієнт завантаження в період річного максимуму; τ - час найбільших втрат.

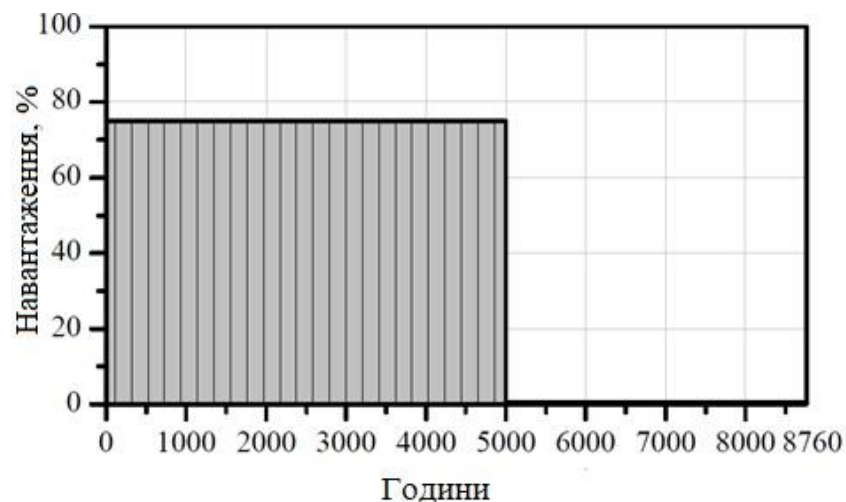


Рисунок 3.2 – Річний графік навантаження трансформатора ТДН-40000/110

Час найбільших втрат дорівнює[77]

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\max}}{10000} \right) 8760, \quad (3.10)$$

де T_{\max} – число годин використання максимуму навантаження.

Розрахунки будемо робити для трансформатора марки ТДН-40000/110.

$$\tau = \left(0,124 + \frac{5000}{10000} \right) 8760 = 3411.$$

Втрати електроенергії в ТДН-40000/110 будуть дорівнювати:

$$\Delta W_{ТДН} = 34 \cdot 8760 + 170 \cdot 0,75^2 \cdot 3411 = 624010,5 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Відповідно до наведеного річного графіка навантаження, та [25,26] втрати електроенергії в НПТ за рік дорівнюють

$$\Delta W_{НПТ} = 16,3 \cdot 8760 + 13,056 \cdot 0,75^2 \cdot 3411 = 168013,1 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Якщо розглядати застосування трансформатора у складі головної низької підстанції (ГПП) промислового підприємства, то тарифи на електроенергію для промислових споживачів, як правило, встановлюються за підсумками ринкових торгів. Нерегульовані ціни на електроенергію, що встановлюються для даного регіону, можна переглянути на сайті гарантуючого постачальника електроенергії в даному регіоні.

Для інших, крім населення, категорій споживачів тарифи на електроенергію можуть диференціюватися залежно від рівня напруги, часу доби, обліку споживаної потужності.

Крім того, тариф на електроенергію може різнитися залежно від того, наскільки повно споживач використовує виділену йому потужність (так звану кількість годин використання заявленої потужності).

Прийmemo для першої цінової категорії (для обсягів купівлі електричної енергії (потужності), облік яких здійснюється в цілому за розрахунковий період) тариф відповідно до рівня напруги ВН на серпень 2021 року 2079 грн / МВт · год без урахування ПДВ.

Тоді вартість втрат протягом року для трансформатора ТДН–40000/110 складуть таку величину

$$\Delta E = \Delta W_{ТДН} \cdot C = 624,010 \cdot 2079 = 1297316 \text{ грн.}$$

Для НПТ відповідно

$$\Delta E = \Delta W_{НПТ} \cdot C = 168,013 \cdot 2079 = 349299 \text{ грн.}$$

На сьогодні вартість НПТ, в основному визначається кількістю ВТНП матеріалів, що використовуються для виготовлення його обмоток і кріокулера, що використовується для охолодження. На сьогоднішній день вартість за погонний метр в залежності від струмонесучої здатності становить: SP12050-400A-\$125, SP2050-240A-\$75, SP2050-200A-\$50 [50]. Інформація для загального подання.

Однак за оцінками фахівців фірми «Siemens» [24], зробленої на основі аналізу існуючих прототипів НПТ, а також прогнозу цін на кріогенне обладнання та ВТНП матеріали, вартість НПТ у разі їх масового виробництва буде знижена внаслідок серійного випуску обладнання і буде порівнянна із цінами за трансформатори традиційного виконання. Тому в перспективі їхнє застосування значною мірою виправдане.

Висновки по третьому розділу

В даному розділі показано, що для отримання максимальної вигоди від застосування НПТ необхідно встановлювати їх у місцях з великим коефіцієнтом завантаження з великою величиною T_{\max} . Як такі місця можуть виступати підприємства з дво-, тризмінним режимом роботи.

Відповідно кошторист втрат для НПТ майже в чотири рази менший ніж для традиційних трансформаторів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

При виконанні кваліфікаційної роботи був розроблений алгоритм роботи НПТ та його програмна реалізація, що дозволила розраховувати перехідні процеси. Визначено, що НПТ суттєво впливають на електромеханічні перехідні процеси. Статична стійкість покращується через менший індуктивний опір НПТ. Показано, що коефіцієнт запасу зростає до 20%.

Для статичної стійкості електричних систем установка над провідникових трансформаторів сприятлива у всіх випадках порівняно з традиційними трансформаторами з точки зору значень меж переданої потужності. У разі встановлення над провідникових трансформаторів між двома електростанціями сумірної потужності межа потужності, що передається, збільшується до 20%.

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.

Використання над провідникових трансформаторів з струмообмежувальною функцією у схемах великих вузлових підстанцій електричних мереж та СЕС промислових підприємств дозволяє при координації струмів КЗ збільшувати надійність за рахунок можливості спільної роботи секцій у нормальному режимі роботи, забезпечуючи якість електричної енергії.

Величина втрат енергії для НПТ майже в чотири рази менший ніж для традиційних трансформаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лутідзе Ш.І., Джафаров Е.А. Надпровідні трансформатори. - М: Научтехлітіздат, 2002. - 206 с.
2. 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>.
3. Надпровідники в електроенергетиці [Електронний ресурс] // М, 2011. - Режим доступу: <http://perst.issph.kiae.ru/supercond/index.php>. - Загл. з екрану.
4. 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
5. Васильєв А.А. Електрична частина станцій та підстанцій / А.А. Васильєв, І.П. Крючков, Є.Ф. Наяшкова, М.М. Околович. - М.: Енергоатом-видав, 1990. - 576 с.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М., Электрические машины. В 2-х ч. Ч.1 -Машины постоянного тока. Трансформаторы. -Л. Энергия, 1972. 544 с.
7. Вавілов С.Б. Особливості нагріву мідної та ВТСП стрічок у рідкому азоті при ступінчастому імпульсі струму / С.Б. Вавілов, І.Ф. Волошин, Г.І. Гараська, П.М. Дегтяренко, І.М. Дулькін, А.В. Калінов, Л.М. Фішер // Вісті академії наук. Енергетика. - 2011. - №4. - С. 37-41.
8. Pelegrin J. Influence of surface layer on YBaCuO coated conductors quench processes / J. Pelegrin, E. Martinez, L.A. Angurel, R. Lahoz, D. Hazelton, P. Brownsney, J. Duval // IEEE transaction on applied superconductivity. – June 2013. – vol 23. no. 3.
9. Манусов В.З., Міхєєв П.А. Математична модель електромагнітного перехідного процесу в електричній мережі, що містить надпровідниковий струмообмежувач індуктивного типу // Електротехніка.- 2008.- №7.- С. 50-56.
10. Kojima H. Self-recovery characteristic of high-Tc superconducting fault current limiting transformer with 2G coated conductors / H. Kojima, S. Ito, N. Hayakawa, F. Endo, M. Noe, H. Okubo // 8th European Conference on Applied

Superconductivity (EUCAS 2007), Journal of Physics: Conference Series 97 (2008) 012154.

11. Александров Г.М. Режимы работы трансформаторів. - СПб.: НОУ "Центр підготовки кадрів енергетики", 2006. - 143 с.

12. SuperPower Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://superpower-inc.com/>. – Загл. с экрана.

13. AMSC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amsc.com/>. – Загл. с экрана.

14. Kalsi S.S. Applications of high temperature superconductors to electric power equipment. – John Wiley & Sons Inc. – New Jersey, 2011. – 312 p.

15. Манусов В.З. Александров Н.В. Ефективність застосування високотемпературних надпровідних трансформаторів в електроенергетичних системах // Наукові проблеми транспорту Сибіру та Далекого Сходу. – 2012 р. – Вип. 1. - с. 358-361.

16. Манусов В. З., Міхеєв П. А. Вплив надпровідникових струмообмежувачів на електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах // Науковий вісник НДТУ. - 2007. - № 4 (29). - С. 143-156.

17. Жданов П.С. Питання стійкості електричних систем/За ред. Л.А. Жукова. - М., Енергія, 1979. - 456 с., Іл.

18. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008.–375 с.

19. Куликов Ю.А. Перехідні процеси в електричних системах. - Новосибірськ: Видавництво НДТУ, 2002. - 283 с.

20. Хрущов В.Ю. та ін. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах / В.Ю. Хрущов, К.І. Заповодніков, А.Ю. Юшков. - Томськ: Видавництво ТПУ, 2010. - 168 с.

21. Tomioka A. The short-circuit test results of 6.9 kV/2.3 kV 400 kVA-class YBCO model transformer with fault current limiting function / A. Tomioka, T. Bohno, S. Kakami, M. Isozaki, K. Watanabe, K. Toyama, S. Sugiyama, M. Konno,

Y. Goshō, H. Okamoto, H. Hayashi, T. Tsutsumi, M. Iwakuma, T. Saito, K. Tanabe, Y. Shiohara // *Physica C*. – January 2013. – vol. 484, pp. 239-241.

22. Dirks J.A. High-temperature superconducting transformers performance, cost and market evaluation / J.A. Dirks, J.E. Dagle, G. John // *Pacific Northwest Laboratory*. – 1993. – 210 p.

23. Сальников В.Г. Економія електроенергії у промисловості. - Алма-Ата: Казахстан, 1984. - 124 с.

24. Siemens global website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siemens.com/>. – Загл. с экрана.