

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Кондратюк Анна Ірорівна

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз впливу якості електроенергії на надійність трансформаторів системи
електропостачання
(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

Кондратюк А. І.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Борисов Федір Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.ф.-м.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Кондратюк А. І. Аналіз впливу якості електроенергії на надійність трансформаторів системи електропостачання Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

Робота присвячена аналізу факторів, які впливають на надійність роботи силових трансформаторів і відповідно на якість електроенергії.

У роботі розглянута питання розробки рекомендацій по зниженню небезпечних впливів на роботу силових трансформаторів.

Ключові слова: силовий трансформатор, якість електроенергії, нелінійні навантаження.

ABSTRACT

Kondratyuk AI Analysis of the impact of electricity quality on the reliability of transformers of the power supply system Qualification work for a master's degree in specialty 141 - Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The work is devoted to the analysis of factors that affect the reliability of power transformers and, accordingly, the quality of electricity.

The paper considers the development of recommendations for reducing hazardous effects on the operation of power transformers.

Key words: power transformer, power quality, nonlinear loads.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	6
1.1. Фактори впливу на роботу силових трансформаторів.	6
1.2. Вплив атмосферних перенапруг на роботу трансформаторів	9
1.3 Вплив комутаційних та дугових перенапруг на роботу трансформаторів	11
1.4 Вплив неякісної електроенергії на роботу трансформаторів	14
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	17
2.1. Вплив нелінійності навантаження на роботу силового трансформатора	17
2.2. Вплив спотворення якості електроенергії на тепловий режим роботи силового трансформатора.	23
Висновки по розділу 2	28
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ЗНИЖЕННЮ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВПЛИВІВ НА СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ.	29
3.1. Установка додаткових пристроїв для зменшення величини впливу вищих гармонік на втрати потужності трансформатора	29
3.2. Використання додаткового трансформатора та струмообмежуючого реактора для зменшення величини впливу ударних струмів на роботу трансформатора	32
Висновки по розділу 3	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Силові трансформатори є важливим та відповідальним обладнанням, що забезпечує передачу електричної енергії від місця генерації до споживачів, а також її розподіл між мережами споживачів. При багаторазовій трансформації електричної енергії змінного струму параметри та характеристики силових трансформаторів мають значний вплив на роботу енергосистем, знижуючи її якість, особливо, при перетіканні реактивної потужності в системах енергопостачання та в мережах енергоспоживачів [1-3].

У процесі експлуатації силові трансформатори можуть працювати в режимах, які відрізняються від номінального, наприклад, на різних щаблях пристроїв регулювання напруги, з різними струмовими навантаженнями. На сучасному етапі розвитку електроенергетики збільшується частка альтернативної генерації електричної енергії, яка залежить від погодних та інших факторів. В певні періоди часу відсутність або зниження потужності альтернативної генерації для вітростанцій може бути пов'язано з невеликою швидкістю вітру, а для геліостанцій – з низьким сонячним випромінюванням у хмарну погоду, увечері або його відсутністю вночі [4]. За таких обставини трансформаторні обладнання в мережах з альтернативними джерелами генерації може працювати з низьким струмовим навантаженням в режимах, які у певні проміжки часу наблизатимуться до режиму холостого ходу.

В іншому випадку, коли присутні тяжкі погодні умови, на роботу трансформаторів можуть значно впливати атмосферні та дугові перенапруги.

Аналіз всіх цих факторів, які впливають на надійність роботи силових трансформаторів і відповідно на якість електроенергії являється **метою даної кваліфікаційної роботи.**

Розробка рекомендацій по зниженню небезпечних впливів на роботу силових трансформаторів являється **предметом дослідження.**

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Борисов Ф.І., Гончаренко Ю.П., Кондратюк А. І. ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА РОБОТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

V МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 2. С.96-102 . «Біоенергетичні системи». 27-28 травня 2021 Житомир, Україна.

Гончаренко Ю.П., Кондратюк А. І., Степанчук В. О. УСТАНОВКА ДОДАТКОВИХ ПРИСТРОЇВ КОМПЕНСАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ВПЛИВУ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА

V МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 3. С.89-93 . «Біоенергетичні системи». 27-28 травня 2021 Житомир, Україна.

Кондратюк А. І. ВПЛИВ КОМУТАЦІЙНИХ ТА ДУГОВИХ ПЕРЕНАПРУГ НА РОБОТУ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Студентські читання – 2021: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2021». 26 жовтня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021.- 400 с.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

1.1 Фактори впливу на роботу силових трансформаторів

Одним з основних електричних пристроїв в системах електропостачання є трансформатори. Надійність електропостачання споживачів багато в чому визначається силовим трансформаторним обладнанням. При цьому можливі пошкодження трансформаторів ведуть, до погіршення електропостачання споживачів, а також до великих аварій.

Підвищення питомої пошкоджуваності силових трансформаторів пов'язано зі зменшенням терміну експлуатації, перенапруженнями, дефектами ізоляції, короткими замиканнями.

Трансформатори - це статичний електромагнітне пристрій, який має дві або більше індуктивно пов'язаних обмотки і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінного струму в одну або кілька інших систем змінного струму [1].

В значній мірі конструкція трансформаторів визначається їх призначенням. На рис. 1.1. представлена класифікація трансформаторів.



Рисунок 1.1. Класифікація трансформаторів

Найцікавішими являються силові трансформатори, так як вони мають найдовший термін служби - 25 років. На рисунку 1.2 представлена класифікація силових трансформаторів за призначенням.

Трансформатори, які призначені для перетворення електроенергії в електричних мережах і установках, використовуваних для прийому і перетворення електричної енергії, називають силовими. При цьому до силових трансформаторів відносяться однофазні трансформатори потужністю $5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ і більше, а також трифазні і багатофазні трансформатори потужністю $6.3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ і більше [2].

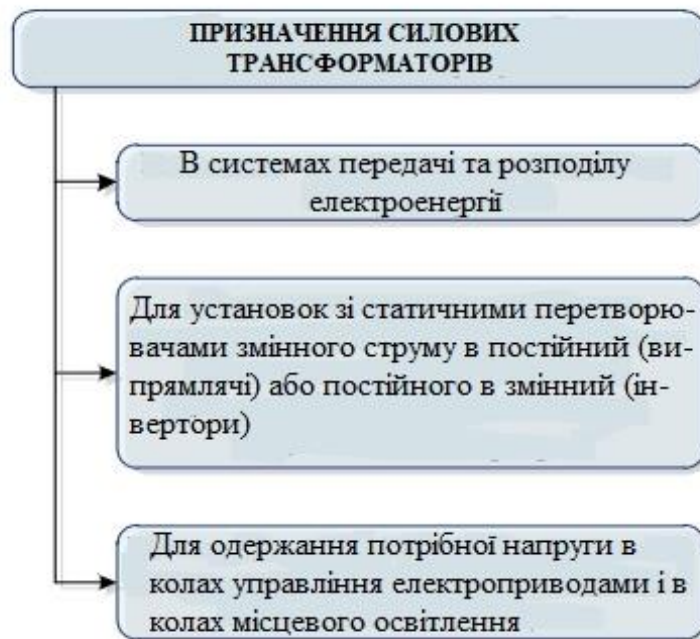


Рисунок 1.2. Класифікація силових трансформаторів по призначенню

Силові трансформатори є дуже дорогим обладнанням, тому їх вивченню потрібно приділяти велику увагу.

Для дослідження скороченого терміну служби силових трансформаторів були проведені реєстрації характеристик навантаження та показників якості електроенергії на діючій підстанції ПС-110/10/10 з метою виявлення джерел негативного впливу.

На підстанції встановлені два трансформатора 1Т і 2Т з розщепленої обмоткою 10 кВ типу ТРДНМ 63000/110-У1. На кожній системі шин 10 кВ

встановлені трансформатори напруги ТН-10 (ТН-10-I, II, III і IV) типу НТМИ-10. Все обладнання, приєднане до систем шин 10 кВ (крім ТСН і розрядників, що захищають шинопроводи), встановлено в осередках комплектного розподільного пристрою.

Основний споживач підстанції - станкобудівне підприємство в м. Бердичіві.

По деяким відходними фідерами 10 кВ живляться також т міські споживачі.

Принципова електрична схема підстанції в нормальному режимі представлена на рисунку 1.3.

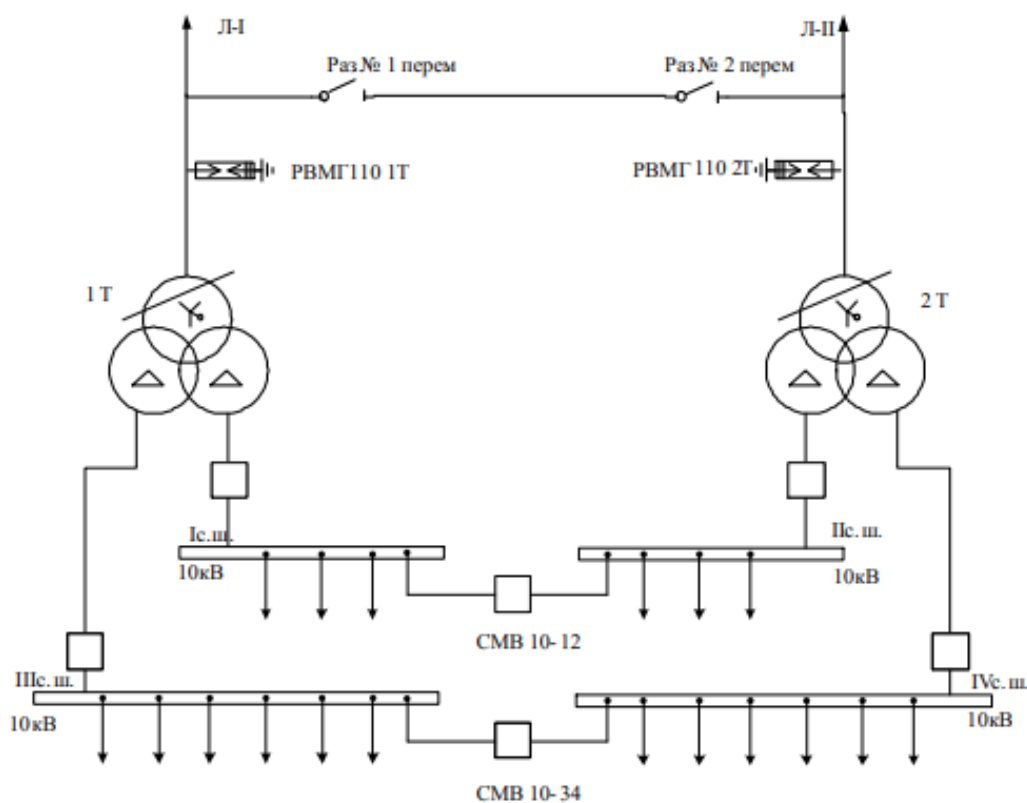


Рисунок 1.3. Принципова електрична схема підстанції в нормальному режимі роботи

Можливий вплив на роботу силових трансформаторів можуть надавати наступні фактори (рис. 1.4)

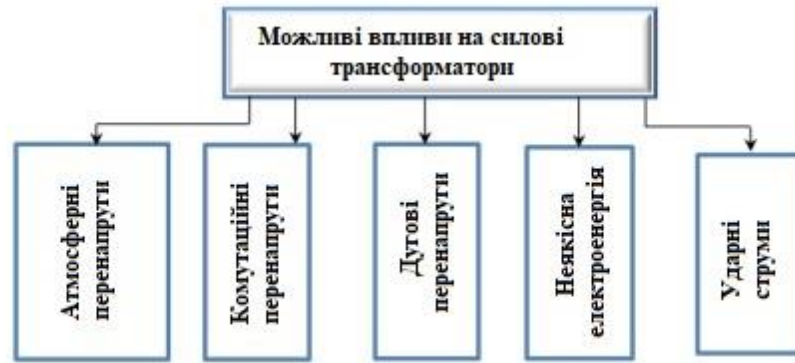


Рисунок 1.4. Можливі впливи на силові трансформатори

1.2 Вплив атмосферних перенапруг на роботу трансформаторів

Формування атмосферних перенапруг на обладнанні підстанції обумовлено проривами блискавки на обшивку при розрядах в підстанцію, а також набігаючими по ЛЕП грозовими хвилями. Поява небезпечних грозових хвиль можливо при проривах ударів блискавки на фазні проводи повз тросового захисту в межах підходів ЛЕП до підстанції і при ударах блискавки в опори або троси на підходах ЛЕП з подальшими зворотними перекриттями їх ізоляції. Збільшення ймовірності зворотних перекриттів в межах тросових підходів характерно для районів з високим питомим опором ґрунту, де є проблеми практичної реалізації заземлення опор відповідно до вимог ПУЕ.

Атмосферні перенапруги діляться на внутрішні і зовнішні. До перших відносяться перенапруги пов'язані з нестабільністю енергії в самій системі. Зовнішні – визвані індукцією перенапруги прямого удару в наслідок удару блискавки в землю поряд з лінією, або в один із елементів самої лінії. Величину амплітуди хвилі приблизно можна розрахувати по формулі:

$$U_{ai\ xв} = a \cdot h , \quad (1.1)$$

де h – середня висота підвішування проводу лінії; a – коефіцієнт, який залежить від величини струму блискавки.

Даний коефіцієнт визначається при величині струму 100-200 кА згідно виразу:

нормативну надійність. В [3] експериментально показана залежність режиму заземлення нейтралі силового трансформатора при впливі на нього атмосферних перенапруг.

Умови формування атмосферних перенапруг на обох силових трансформаторах однакові. Тому впливами атмосферних перенапруг не можна пояснити різну ступінь витрачання ресурсу і зносу Т1 і Т2.

1.3 Вплив комутаційних та дугових перенапруг на роботу трансформаторів

Комутаційні перенапруги.

Перенапруги при напружених ненавантажених трансформаторах або машин можуть виникати на приєднаннях з боку комутowanego обладнання. Виникнення комутаційних перенапруг в схемі 10 кВ ПС можливо тільки при операціях вимикачами приєднань, секційними і вступними вимикачами. В РУ 10 кВ встановлені масляні вимикачі типу ВМП-10, ВМПЕ і ВМПП, які допускають повторні запалювання дуги при комутаціях великих струмів замикань. Однак вплив ємності підключених кабелів істотно згладжує комутаційні перенапруги. Таким чином, поява комутаційних перенапруг великої кратності практично виключено.

Перенапруги при відключеннях ненавантажених трансформаторів або машин можуть виникати на приєднання з боку комутowanego обладнання, тому для силових трансформаторів Т1 і Т2 вони небезпеки не представляють.

Дугові перенапруження.

Для зменшення струмів однофазних замикань на землю в мережі 10 кВ на всіх шинах ПС встановлені дугогасильні реактори типу ЗРОМ-300/10 з фіксованим настроюванням. Виділення нейтралі виконано за допомогою фільтрів приєднання типу ТМ-400/10. Для аналізу дугової перенапруги зазвичай використовуємо спрощену схему, аналогічну наведеної на рис. 1.6.

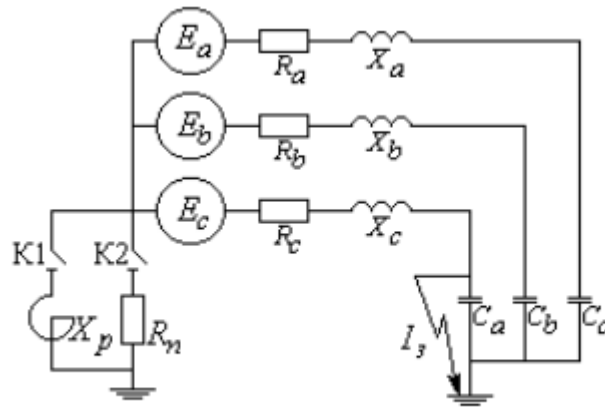


Рисунок 1.6. Узагальнена схема для аналізу дугових перенапруг в мережі з ізольованою нейтраллю, з нейтраллю ізольованою через дугогасильний реактор або високоомний резистор

Вивчення процесів, які супроводжують найбільш ймовірні випадки однофазних замикань на землю, проводилося на моделі, схема якої приведена на рис.1.7. Як приведення розрахункової моделі до умов роботи силових трансформаторів Т1 і Т2, виконаний облік гальванічної розв'язки мережі 110 кВ і 10 кВ, режим заземлення нейтралі на стороні 110 кВ, підключення дугогасного реактора через 4ДК і через трансформатор приєднання ТМ 4ДК, вплив магнітного зв'язку обмоток 10 кВ, які шунтують вплив навантаження на міжфазні ємності.

Наявність дугогасних реакторів в значній мірі запобігає підвищення інтенсивності дугових перенапруг. Їх використання дозволяє компенсувати ємкостну складову струмів однофазних замикань на землю, підвищує ймовірність самогасіння дуги при нестійких перекриттях ізоляції елементів мережі 10 кВ, а також істотно знижує частоту повторних запалень дуги і перенапруг при пошкодженнях ізоляції. Вплив на силові трансформатори в вигляді підвищення напруги на непошкоджених фазах спостерігається як в момент замикання, так і після ліквідації або проміжного гасіння дуги в місці пошкодження. У розглянутому випадку кратність (при точній настройці дугогасного реактора) підвищення напруги становить:

$$K_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ПН}}}{U_{\text{МФ}}}.$$

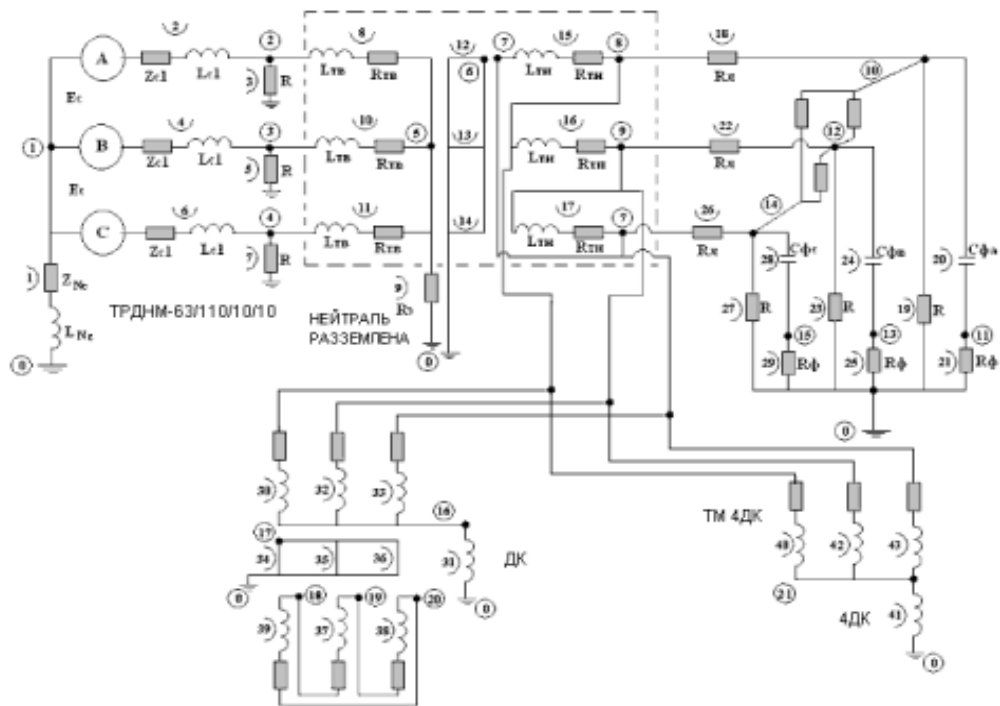


Рисунок 1.7. Схема розрахункової моделі для аналізу перенапруг і перехідних процесів при однофазних замиканнях на землю в мережі 10 кВ

ПС

При порушеннях точності настройки дугогасильних реакторів, обумовлених обмеженим числом перемикачів параметрів реактора і схемними змінами підключеної мережі, можливе виникнення низькочастотних коливань напруги при самоліквідації однофазних замикань з підвищенням напруги на непошкоджених фазах вище лінійного. Кратність підвищення напруги не є небезпечною для ізоляції електричних машин. Так, випадки замикань на землю за час досліджень не зареєстровані. З урахуванням запасу електричної міцності ізоляції трансформатора підвищення напруги на непошкоджених фазах при самоліквідації нестійких замикань на землю не уявляють небезпеки для ізоляції обмоток 10 кВ Т1 і Т2.

Порушення перенапруги при обриві струму в дугогасильних реакторах ДК, наприклад, при відключеннях двох фазних замикань на землю виключено,

так як зміна ємності мережі, підключеної до шин з реакторами ДК, змінюється після комутації не суттєво.

Комутаційні перенапруги, які приводять до відключень ненавантажених трансформаторів Т1 або Т2 на стороні 110 кВ, виникають за рахунок енергії, накопиченої в індуктивності намагнічування трансформатора. Факторами, що визначають величину перенапруги, є величина індуктивності намагнічування, ємність апаратів (включаючи трансформатор) і шин, підключених до трансформатора, і величина струму ненавантаженого трансформатора (миттєве значення), при якому відбувається обрив струму в комутаційному апараті. Кратність максимально можливої перенапруги буде залежати від відключаючої здібності комутаційного апарату.

Таким чином, атмосферні, дугові і комутаційні перенапруги не можуть бути причиною виникнення електромагнітних впливів великої інтенсивності. Кратність перенапруги при відключеннях ненавантажених трансформаторів на стороні 110 кВ залежить від послідовності операцій і відключає здібності відокремлювачів ОД-110.

1.4 Вплив неякісної електроенергії на роботу трансформаторів

Гармонійні спотворення при перевищенні нормально допустимих рівнів гармонік викликають збільшення втрат намагнічування і деяке збільшення втрат електроенергії.

Зареєстровані спотворення сінусоїдальності викликають збільшення втрат намагнічування і деяке збільшення втрат електроенергії, але не є небезпечними для силових трансформаторів. Тому спеціальних заходів щодо зниження гармонійних спотворень з метою зменшення негативних впливів на силові трансформатори не потрібно.

Раніше авторами [4] були виконані експериментальні дослідження по реєстрації показників якості на деяких подібних підстанціях. Авторами відзначено, що в режимі роздільної роботи реєстрація на ШМА1 показала підвищення сумарного коефіцієнта спотворення сінусоїдальності напруги до

3%. Однак вихід перевищень нормально допустимого рівня для всіх гармонік дорівнювало нулю.

Реєстрації на ШМА2 також показали збільшення сумарного коефіцієнта спотворення сінусоїдальності напруги до 3%. У розподілі спотворень по гармонікам видно, що перевищення нормально допустимого рівня відзначено для 28-й гармоніки (виходи більше 5% від часу реєстрації) і для 30-й гармоніки (виходи до 1.5%).

Таким чином, гармонійні спотворення, що перевищують нормально допустимі рівні, зареєстровані для 15-й і 21-й гармонік на ШМА3 і ШМА4 і для 28-й і 30-й гармонік на ШМА2. Виходи перевищень складають 2 ... 5% від часу реєстрації.

Зареєстровані спотворення (перевищення нормально допустимого рівня) можуть бути підставою для пред'явлення претензій до показника якості електроенергії з боку споживачів, підключених до шин 10 кВ ПС. Для запобігання таких претензій необхідне підключення фільтрів силових вищих гармонік на приєднання споживачів з електроустановками, генеруючими вищі гармоніки (наприклад, тиристорні перетворювачі, електропечі і т. п.). Фільтри повинні бути приєднані на стороні спотворюють, установок споживачів і перебувати на їх балансі.

Тому доцільно в договорі на постачання електроенергії з промисловим споживачем передбачити зобов'язання промислового підприємства встановити на своїх приєднання силові фільтри вищих гармонік, наприклад, Ф15-10-2400 Л (П) УЗ. Вибір параметрів фільтра визначається в залежності від потужності джерела спотворень. Судячи по спектрального складу спотворень необхідні фільтри широкого частотного діапазону.

Ударні струми. Реєстрації струмів навантаження виконані в трансформаторах струму вступних вимикачів (повний струм навантаження на одну з обмоток 10 кВ силового трансформатора), секційних вимикачах (В

ремонтному режимі роботи з одним силовим трансформатором), а також вимикачах приєднань до кожної з систем шин 10 кВ.

Несиметрія ударних струмів створює нерівномірний розподіл магнітних потоків. Поєднання перерозподілу потоку розсіювання і головного намагнічуючого потоку в стрижнях або ярмах магнітної системи обумовлює схильність трансформаторів до перезбудження і локальним підвищенням температури, особливо в умовах перевантаження.

Збудження СНЧ-коливань фазних струмів сприяє механічним резонансним явищам і підмагнічування магнітопроводу. Додаткове намагнічування викликає накладення перехідних струмів. Супроводжуючі спотворення форми струму і накладення перехідних процесів створюють ефект коливальних змін частоти.

Всі вищевказані фактори створюють умови для локальних термічних впливів на ізоляцію та порушення механічної міцності елементів ізоляції і магнітної системи. Локальні термічні впливи в місцях з високою електростатичною напруженістю (в обмотках або з'єднаннях) призводять до термохімічну зносу ізоляції.

Вимірювання струмів в заземленою нейтралі обмотки 110 кВ трансформатора Т1 виявили амплітудні спотворення струму несиметрії, які можуть бути викликані нерівномірною намагнічуваністю і погіршенням стану магнітопроводу трансформатора. Таким чином, причиною підвищеного зносу силових трансформаторів є висока інтенсивність ударних несиметричних змін струмів навантаження, а також супроводжуючі перехідні і над низькочастотні процеси.

Висновки по першому розділу

Проведений все сторонній аналіз можливих впливів на силові трансформатори дозволяє сформулювати основні напрямки покращення їх роботи і тим самим забезпечити надійність електропостачання споживачів.

РОЗДІЛ 2

ВПЛИВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1 Вплив спотворення якості електроенергії на тепловий режим роботи силового трансформатора

Для оцінки надійності силового трансформатора його можна представити у вигляді двох елементів, в одному з котрих може з'явитися раптова, а в іншому - поступова відмова. Тоді ймовірність його безвідмовної роботи визначиться добутком ймовірностей безвідмовної роботи двох незалежних елементів, з'єднаних послідовно в сенсі надійності:

$$p(t) = p_p(t) \cdot p_n(t), \quad (2.1)$$

де $p_p(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи елемента, яка відповідає раптовим відмовам;

$p_n(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи елемента, яка відповідає поступовим відмовам.

Використовуючі моделі раптових і поступових відмов, отримаємо [7]:

$$p(t) = e^{-\lambda t} \cdot e^{-c(t-t_0)^\alpha}, \quad (2.2)$$

$t_i = f(t)$ – термін служби ізоляції, який залежить від характеристик міцності ізоляції і зовнішніх впливів; λ – параметр потоку відмов; α – математичне очікування числа відмов на певному інтервалі часу.

Звідси, можна визначити термін служби ізоляції силового трансформатора, що відповідає певному рівню надійності за час $(0, t)$:

$$t_i(t) = t_0 + \left\{ \frac{1}{c} [\lambda t + \ln p(t)] \right\}^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (2.3)$$

Надійність роботи трансформатора залежить від багатьох факторів, з яких можна виділити в якості основних характер живильного електричного навантаження і якість електричної енергії.

Відомо, що фактична температура зовнішнього середовища істотно впливає на показники функціональної надійності силових трансформаторів, що живлять споживачів зі спокійним характером навантаження. Для навантажень з різко змінним характером електроспоживання узагальнена залежність здатності навантаження трансформатора при спільному обліку теплового і вібраційного старіння ізоляції при його терміні служби 20 років показана на рисунку 2.1. Тут ξ - коефіцієнт варіації навантаження.

Звідси при визначенні рівня надійності силового трансформатора необхідно враховувати характер навантаження і впливу навколишнього середовища. Спотворення якості електроенергії (ЯЕ), що виникають в мережі, можуть призводити до посилення негативного теплового, електричного та механічного впливів на ізоляцію елементів ЕЕС. Причина теплового впливу - втрати електроенергії всередині електрообладнання. Спотворення ЯЕ призводять до збільшення втрат, а, отже, і до посилення теплового впливу.

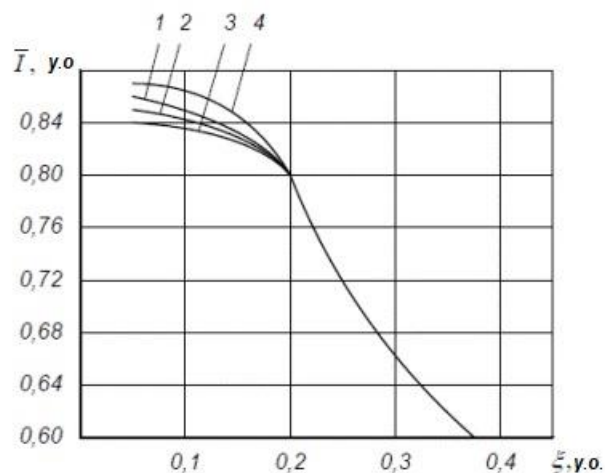


Рисунок 2.1. Навантажувальна здатність трансформатора при спільному обліку теплового та вібраційного старіння ізоляції при ймовірності

безвідмовної роботи $p = 0,8$ протягом 20 років:

1 - типу ТМ 1,0 ÷ 6,3 МВА; ТРДЦН 63000/110; ТДЦН 80000/110;

2 - типу ТРДН 10; 16; 40; 63 МВА; ТРДЦН 63000/220;

3 - типу ТРДН 25000/110; 4 - типу ТРДЦН 80000/110.

Необхідно відзначити, що потужність додаткових втрат від низької ЯЕ буде нагрівати не весь силовий трансформатор, а окремі їх точки, які і в нормальних умовах є термічно напруженими. Саме в цих точках буде відбуватися прискорене старіння ізоляції. Скорочуючи термін служби ізоляції, спотворення ЯЕ впливають на середній час безвідмовної роботи елементів електроенергетичної системи, а, отже, і на інші показники надійності.

Вираз, що визначає інтенсивність відмов елемента, можна уточнити, ввівши скорочення терміну служби його ізоляції через низьку ЯЕ:

$$\lambda_{\text{ЯЕ}}(t) = \frac{1}{T - \Delta T} + \frac{e^{\frac{(1-T-\Delta T)^2}{2\sigma_T^2}}}{\sigma_T \sqrt{2\pi} \cdot \Phi\left(\frac{t-T-\Delta T}{\sigma_T}\right)}, \quad (2.4)$$

де ΔT – середнє значення скорочення терміну служби ізоляції, обумовленого спотвореннями ЯЕ; $\Phi\left(\frac{t-T-\Delta T}{\sigma_T}\right)$ – функція Лапласа, або інтервал ймовірності на інтервалі скорочення терміну служби ізоляції; σ_T – значення дисперсії відмов.

Графічно вплив спотворень ЯЕ на інтенсивність відмов елемента показано на рисунку 2.2.

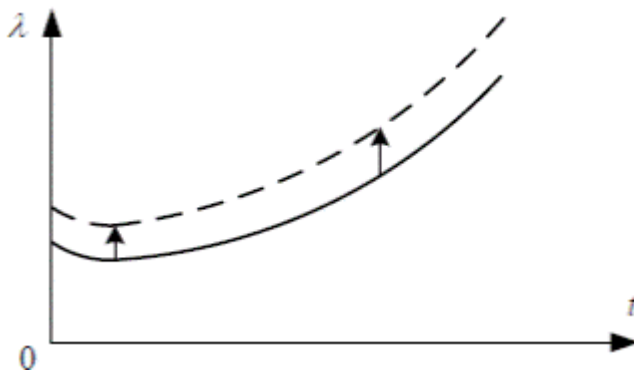


Рисунок 2.2. Залежність інтенсивності відмов від часу

Як видно з рисунка 2.2, інтенсивність відмов не постійна в часі, а має дві ділянки: на першому вона зменшується, що описує процес приробітку трансформатора, а потім починає зростати, що відповідає поступовому зносу. Спотворення ЯЕ призводять до збільшення інтенсивності відмов у трансформаторі протягом усього часу експлуатації, що рівносильно паралельного переносу характеристики вгору (показано стрілками).

Цією залежністю можна користуватися при наявності достатньої кількості статистичних даних. При їх відсутності для періоду нормальної експлуатації, коли завершився процес приробітку обладнання та підтримується нормальна періодичність ремонтів можна вважати, що λ постійна в часі і використовувати показаний закон розподілу. Тоді інтенсивність відмови з урахуванням якості електроенергії матиме вигляд:

$$\lambda_{\text{ЯЕ}}(t) = \frac{1}{T_{\text{ЯЕ}}} = \frac{1}{T \cdot \tau_1 / \tau_2} = \frac{1}{T - \Delta\tau}, \quad (2.5)$$

де τ_1 / τ_2 – відношення терміну служби обладнання при наявності спотворень ЯЕ до терміну служби при їх відсутності; $\Delta\tau$ - скорочення терміну служби ізоляції при низькій ЯЕ.

Зазвичай вважають, що термін служби ізоляції при тепловому старінні обернено пропорційний швидкості хімічних реакцій. Тоді, використовуючи рівняння Ареніуса [8], можна отримати наступний вираз для відношення термінів служби ізоляції при різних температурах:

$$\tau_1 / \tau_2 = 2^{-(T_2 - T_1) / \Delta T},$$

де τ_1 і τ_2 – терміни служби відповідно при температурах T_1 і T_2 , в нашому випадку відповідають роботі ізоляції при низькій і нормальній якості електроенергії; ΔT – підвищення температури, яке визиває скорочення терміну служби ізоляції в 2 рази.

Спотворення ЯЕ призводять до скорочення терміну служби ізоляції через збільшення її температури за рахунок додаткових втрат. Для визначення скорочення терміну служби ізоляції необхідно знайти зміну температурного

режиму елемента ЕЕС. Розглянемо як змінюється термін служби ізоляції силового трансформатора при спотворенні якості електроенергії.

Перевищення температури обмотки в найбільш нагрітої точки над температурою масла v_m , з деякою погрішністю описується виразом:

$$\theta_{\text{обм.н.н.т}} = v_m + (g + \varepsilon) \left(\frac{I}{I_{\text{тр.ном.}}} \right)^{2m}, \quad (2.6)$$

де g, ε - коефіцієнти, одержувані з теплової діаграми трансформатора;
 m - коефіцієнт, що приймається за рекомендаціями МЕК:
 $m = 0,8$ для трансформаторів із системами охолодження М (природна циркуляція повітря і масла), $m = 0,9$ для системи Д (примусова циркуляція повітря і природна масла) і $m = 1$ для трансформаторів із системами охолодження ДЦ (примусова циркуляція повітря і масла з ненаправленим потоком масла) і Ц (примусова циркуляція води і масла з ненаправленим потоком масла); I - струм трансформатора при аналізованому режимі; $I_{\text{тр.ном.}}$ - номінальний струм трансформатора.

Дане перевищення і визначає різницю температур ($T_2 - T_1$)

Температура нагріву масла залежить від втрат потужності в ньому:

$$v_m = \Delta P^m,$$

де ΔP - втрати потужності в трансформаторі.

Для силового трансформатора втрати потужності з урахуванням низької якості електроенергії визначається наступним чином:

$$\Delta P = P_{\text{кз}} (1 + \Delta P_{\text{кз}}) \cdot K_3^2 + P_{\text{хх}} (1 + \Delta P_{\text{хх}}), \quad (2.7)$$

де $P_{\text{кз}}, P_{\text{хх}}$ - відповідно втрати короткого замикання і холостого ходу трансформатора;

$\Delta P_{\text{кз}}, \Delta P_{\text{хх}}$ - відповідно додаткові втрати короткого замикання і холостого ходу трансформатора у відносних одиницях, що викликаються спотворенням якості електроенергії;

K_3 - коефіцієнт завантаження трансформатора:

$$K_3 = \frac{S_H}{S_{m \text{ ном}}}$$

Додаткові втрати потужності короткого замикання, які визвані спотвореннями ЯЕ, в долях від номінальних втрат визначаються виразом:

$$\Delta P_{кз} = k_{2I}^2 + k_{0I}^2 + \sum_{n=2}^{40} k_{I(n)}^2 \cdot \sqrt{n} \quad , \quad (2.8)$$

k_{2I} , k_{0I} , $k_{I(n)}$ - відповідно коефіцієнти несиметрії струмів по зворотній і нульовій послідовності струму n -ої гармоніки; n – номер висшої гармоніки.

Додаткові втрати холостого ходу, викликані спотвореннями ЯЕ, в частках від номінальних втрат знаходяться за формулою:

$$\Delta P_{xx} = k_{2U}^2 + k_{0U}^2 + \sum_{n=2}^{40} k_{U(n)}^2 \cdot n^{1,3/2} \quad , \quad (2.9)$$

k_{2U} , k_{0U} , $k_{U(n)}$ – відповідно коефіцієнти не симетрії напруг по зворотній та нульовій послідовності, напруги n -ої гармонійної складової.

Значимість впливу якості електроенергії на термін служби ізоляції трансформаторів при їх різних коефіцієнтах завантаження і різних співвідношеннях показників ЯЕ показана на прикладі силових трансформаторів напругою 220 кВ (див. Табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Теплове старіння ізоляції силових трансформаторів 220 кВ

Показ- ник	Коефіцієнт завантаження силового трансформатора					
	0,5		0,7		1	
	$k_{2U}=4\%$	$k_{2U}=6\%$	$k_{2U}=4\%$	$k_{2U}=6\%$	$k_{2U}=4\%$	$k_{2U}=6\%$
	$k_{2U}=6\%$	$k_{2U}=10\%$	$k_{2U}=6\%$	$k_{2U}=10\%$	$k_{2U}=6\%$	$k_{2U}=10\%$
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	0	0,4	0	5,5	6,5	15,3
τ_1/τ_2	1	0,997	1	0,624	0,567	0,262

Результати, представлені в таблиці 2.1, наочно показують, що спотворення ЯЕ призводять до додаткового нагрівання ізоляції трансформатора і, як наслідок, до зниження її терміну служби. При цьому спотворення ЯЕ на рівні гранично допустимих ГОСТом 13109-97 значень при

низькому коефіцієнті завантаження трансформатора не призводять до збільшення температури ізоляції вище допустимої. А відносно невеликі спотворення ЯЕ при повному завантаженні трансформатора вже призводять до перевищення допустимої температури. Граничними параметрами є: коефіцієнт завантаження рівний 0,7, рекомендований ПТЕ, і величина спотворень на рівні гранично допустимих ГОСТом 13109-97 значень. Збільшення будь-якого з них призводить до зниження терміну служби ізоляції, а, отже, і надійності функціонування трансформатора.

2.2 Вплив нелінійності навантаження на роботу силового трансформатора

Як відомо, допустиме систематичне перевантаження найбільш поширених в мережах промислових підприємств трансформаторів типу ТМ (ТМГ) регламентує ДСТУ 3463-99 (МЕК 354-91) «Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів» [9]. При цьому здатність навантаження трансформатора (в частках від номінальної потужності - $S_{ном.тр}$) поряд з постійною часу нагріву і температурою навколишнього середовища визначається коефіцієнтами початкового (K_1) і підвищеного (K_2) навантажень, які пропорційні протікаючому через трансформатор еквівалентному струму, а економічність його роботи оцінюється по пов'язаних з ККД величинами умовно-постійних (в сталі) $\Delta P_{ст}$ і змінних (в міді) $\Delta P_{мд}$ втрат, віднесених до одиниці переданої потужності.

Поява в мережі вищих по відношенню до промислової частоті гармонік викличе додаткові втрати активної потужності в обмотках і магнітних системах трансформаторів, головним чином за рахунок вихрових струмів. В цьому випадку Європейським комітетом по нормуванню в галузі електротехніки (CENELEC) рекомендується при визначенні навантажувальної здатності трансформатора додатково враховувати коефіцієнт запасу потужності - K [10]:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \left(\frac{I_1}{I_{скв}}\right)^2 \cdot \sum_{n=2}^{40} n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}, \quad (2.10)$$

де: I_1 — основна гармоніка струму навантаження; $I_{скв} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$ — середньоквадратичне значення струму n – ої гармоніки [10]; n — номер гармоніки; e, q — коефіцієнти, які залежать від складових втрат в міді та сталі трансформатора.

Обернено пропорційна $K(1)$ тривало допустиме навантаження трансформатора (рис. 1) в загальному випадку залежить від рівня присутніх гармонійних складових (від 2-ї до 40-ї), що характеризуються коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги [10] –

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

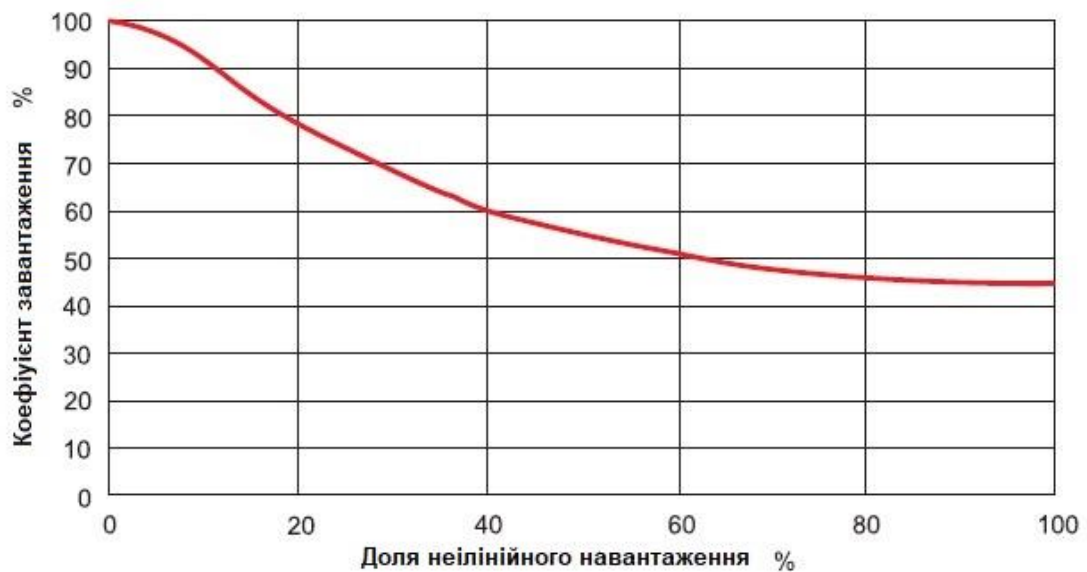


Рисунок 2.3. Залежність допустимого завантаження силового трансформатора 20–6/0,4 кВ від потужності нелінійного навантаження

і ненормованим коефіцієнтом нелінійного спотворення форми вторинного струму (Total Harmonic Distortion) [10] –

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{СКВ}}}{I_1}\right)^2 - 1},$$

в комплексі утворюють потужність спотворення [11], тобто частину реактивної потужності, викликану наявністю гармонік. Для трансформаторів 20-6/ 0,4 кВ із з'єднанням обмоток Y/Y_H, або Δ/Y_H величина THD_I і K_U при неузгодженому режимі роботи електрозварювального устаткування, вентиляльних перетворювачів з шестифазної схемою випрямлення, в основному визначається наявністю 5-ї ($0,27 \cdot I_1$), 7-ї ($0,11 \cdot I_1$), 11-ї ($0,09 \cdot I_1$), 13-ї ($0,06 \cdot I_1$) гармонік, а також 3-ї ($0,1 \cdot I_1$) і 5-ї ($0,03 \cdot I_1$) гармоніки газорозрядних ламп. У дужках наводиться критерій оцінки викиду в мережу гармонік зазначеним видом електроустаткування, рекомендований VDEW (Association of German Power Supply Companies) для технічних розрахунків.

Дослідження експлуатаційних режимів силових трансформаторів в мережах з нелінійним навантаженням показали, що наряду з інтенсифікацією процесу старіння ізоляції, збільшення приведених до $S_{\text{ном}}$ втрат ΔP_{xx} і $\Delta P_{\text{кз}}$, визначаються відповідними коефіцієнтами – k_{xx} і $k_{\text{кз}}$ [3]:

$$k_{\text{xx}} = 1 + \sum_{n=2}^{n=40} \frac{U_n^2}{\sqrt{n}}; k_{\text{кз}} = \frac{1 + \sum_{n=2}^{n=40} I_n^2 \sqrt{n}}{1 + \sum_{n=2}^{n=40} I_n^2}.$$

Фізично це пояснюється додатковим нагріванням осердя (додаткові втрати на гістерезис і вихрові струми) і збільшенням (приблизно в два-чотири рази для 3-13-ї гармоніки) опору короткого замикання трансформатора внаслідок впливу поверхневого ефекту і ефекту близькості [12]. Нехтуючи втратами холостого ходу, додаткові втрати активної потужності від протікання через трансформатор струмів присутніх в мережі гармонік (ΔP_n) можна визначити по емпіричному закону [13]:

$$\Delta P_n = 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{кз}}{u_{кз}^2} \cdot \sum_{n=2}^{40} \left(\frac{1}{n\sqrt{n}} + 0,05\sqrt{n} \right) \cdot K_{U(n)}^2, \quad (2.12)$$

де $u_{кз}(\%)$ – напруга короткого замикання трансформатора; $K_{U(n)}$ – коефіцієнт n -ої гармонічної складової напруги.

Сполучена залежність одночасного зростання $I_{скв}$ і ΔP_n (2) силових трансформаторів 20-6/0,4 кВ (без урахування поверхневого ефекту) приведена на рис. 2.4. Випереджальне $I_{скв}$ збільшення над ΔP_n пояснюється прогресуючим зростанням втрат (2) при посиленні спотворення синусоїдальності вторинного струму трансформатора (THD_I). Побічно ступінь спотворення можна оцінити по співвідношенню між $I_{макс}$ і $I_{скв}$ (K -factor [10]), який представляє собою параметр, що відображає внесок в нагрів трансформатора нелінійного навантаження.

Конструктивно в серійних трансформаторах 20-6/0,4 кВ цехових ТП використовуються заходи для придушення гармонік, які зводяться до з'єднання фаз обмоток вищої напруги в «трикутник», що усуває гармоніки, кратні трьом, а решта гармонійних складових практично не придушуються.

Споживання реактивної потужності дискретно комутованих вентилями перетворювачем обумовлено зсувом по фазі його робочого струму I_1 в сторону відставання від напруги мережі живлення - $U_{ном}$. через природне запізнювання пофазної комутації в момент перемикавання вентиля (кут γ) і штучної затримки його відкриття для регулювання випрямленої напруги (кут α), які, з урахуванням внесених спотворень синусоїдальності, змінюють фактор потужності перетворювача частоти (ПЧ) [13]:

$$\lambda = \nu \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) = \frac{I_1}{I_{скв}} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right). \quad (2.13)$$

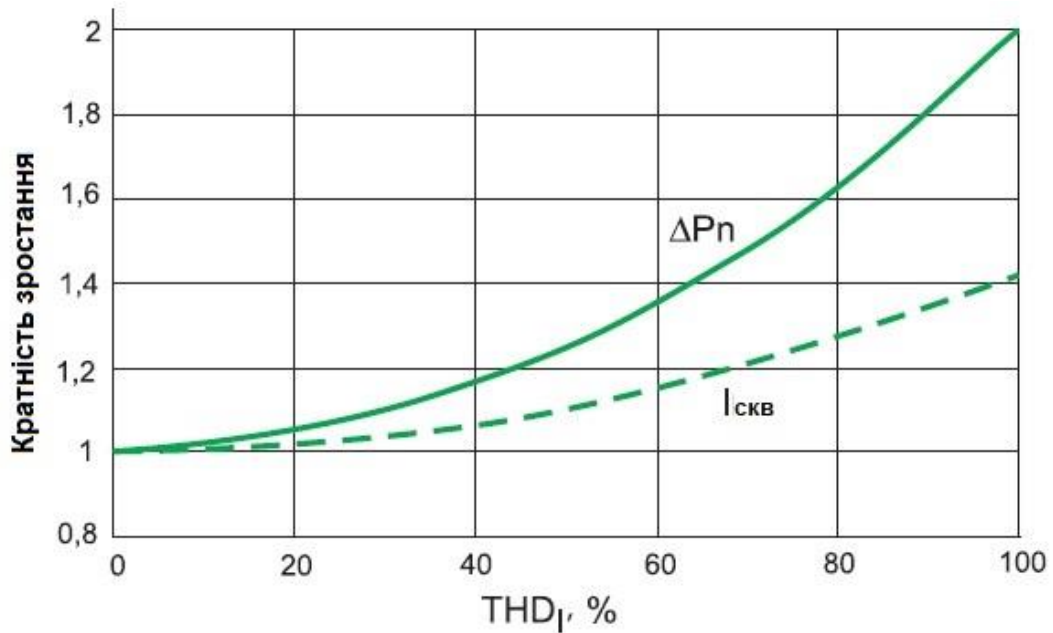


Рисунок 2.4. Зростання $I_{скв}$ і втрат потужності ΔP_n двохобмоткових трансформаторів 20–6/0,4 кВ в функції THD_I мережі 0,4 кВ

З формули (2.13) видно, що при зменшенні випрямленої напруги ($\alpha \rightarrow 90^\circ$) споживання перетворювачем реактивної потужності зростає, при цьому значно знижуючи власний коефіцієнт потужності АД - $\cos\varphi$, тестований в системі ПЧ-АД як коефіцієнт зсуву: $\lambda \cdot \cos\varphi$.

Наприклад, як зазначено в [13], коефіцієнт зсуву ПЧ-АД ($S_{пч} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$), джерелом живлення якого був трансформатор цехової ТП ($S_{ном.тр} = 800 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $u_{кз} = 5,0\%$), знизився на 34% в порівнянні з номінальним $\cos\varphi$ АД. В даному прикладі єдиним засобом придушення вищих гармонік була власна індуктивність мережі живлення з основною складовою - реактансом силового трансформатора, наведене значення якого $X_{тр}$ (%) знаходиться як [13]:

$$X_{тр} (\%) = u_{кз} \cdot \frac{S_{пч}}{S_{ном.тр}}, \quad (2.14)$$

де $S_{пч}$ – повна потужність ПЧ (кВА).

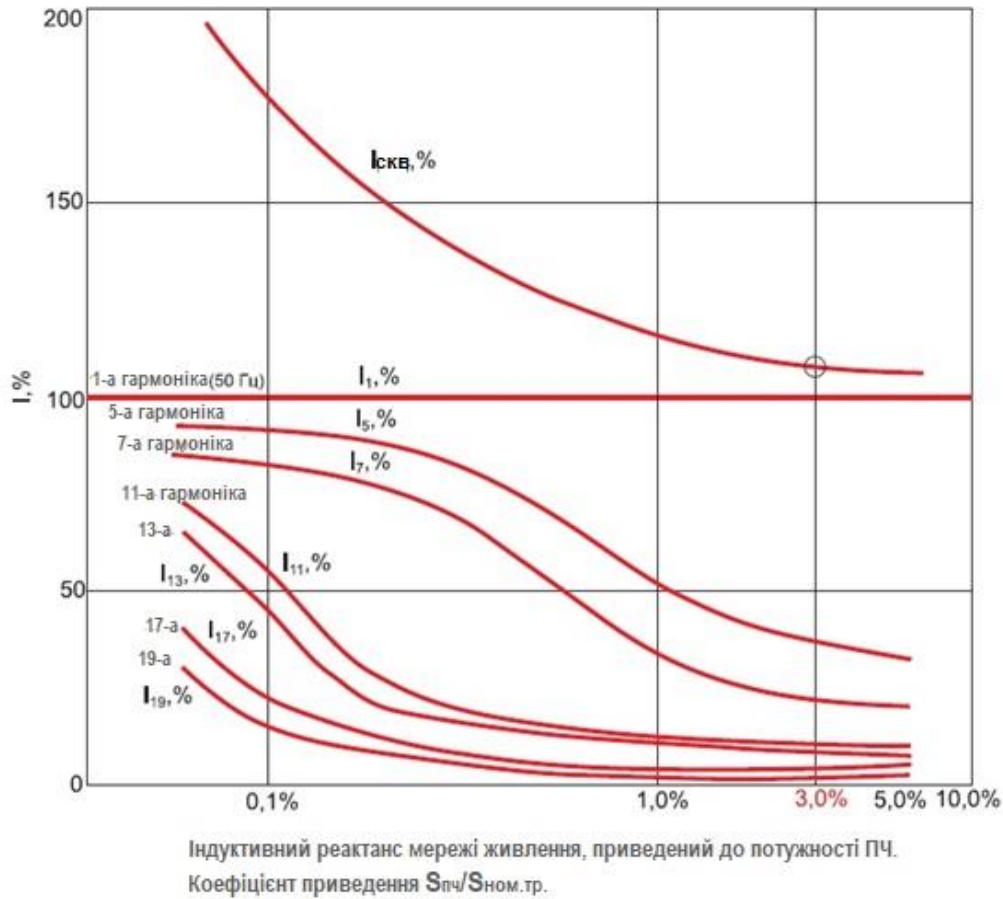


Рисунок 2.5. Залежність середньоквадратичного струму ПЧ і його гармонічних складових від реактанса живильної мережі

Висновки по другому розділу

Дослідження показали, чим більше $S_{ном.тр}$ щодо потужності ПЧ, тим нижчий наведений реактанс (2.14) і вищий рівень гармонік які генеруються в мережу (рис. 2.5). Відзначимо, що в найбільш поширеній шестиімпульсній схемі випрямлячів ПЧ генерується гармонійний спектр, який містить переважно 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю гармоніки [10, 11]. Враховуючи, що ПЧ малої потужності допускається підключати до мережі безпосередньо [13], а цехові ТП найбільш часто комплектуються трансформаторами з $S_{ном.тр} = 630-1600$ кВА і $u_{кз} = 5,5-6,5\%$, в мережі живлення не вдається досягти прийнятного за величиною $I_{скв}$ (рис.2.5) тривідсоткового реактансу. Тому для підтримки в системі електропостачання вимог стандарту якості електроенергії [2] необхідно застосовувати спеціальні технічні засоби.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ЗНИЖЕННЮ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВПЛИВІВ НА СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ.

При розробці рекомендацій були розглянуті наступні варіанти зниження небезпечних впливів на роботу силових трансформаторів:

- установка додаткових пристроїв для зменшення величини впливу вищих гармонік;
- об'єднання навантаження для використання шунтуючої дії стабілізованого навантаження;
- зміна системи живлення установок, що викликають ударні впливи шляхом, застосування струмообмежуючих реакторів в якості згладжуючих ударні зміни струмів та симетрувальних пристроїв.

3.1 Установка додаткових пристроїв для зменшення величини впливу вищих гармонік на втрати потужності трансформатора

Одним з таких засобів є установка між живильною мережею і ПЧ мережевого дроселя, магнітопровід якого повинен залишатися ненасиченим у всьому діапазоні струму ПЧ ($I_{пч}$) [13].

Підсумовування індуктивних реактансу дроселя і трансформатора (2.14) послабить викид вищих гармонік (рис. 2.5), знизить амплітуду (K -factor) і спотворення синусоїдальності (THD_I) навантажувального струму ПЧ. Одночасно мережевий дросель гасить комутаційні перенапруги керованого випрямляча, симетрує вхідну напругу, а також обмежує крутизну наростання струму (di/dt) через випрямляч і інвертор в разі коливань вхідної напруги або короткого замикання на виході ПЧ [13]. Оскільки послідовне включення мережевого дроселя знизить напругу на вході ПЧ, що задається параметром його індуктивності L (мГн) (рис. 3.1) та буде гранично допустиме падіння напруги на дроселі без втрати моменту на валу АД - ΔU_L (3-5% від $U_{ном}$), розраховане для номінального струму ПЧ - $I_{ном.пч}$ на частоті f_1 (50 Гц) [13]:

$$L = \frac{\Delta U_L \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f_1 \cdot I_{ном.лч}} \cdot 10^3. \quad (3.1)$$

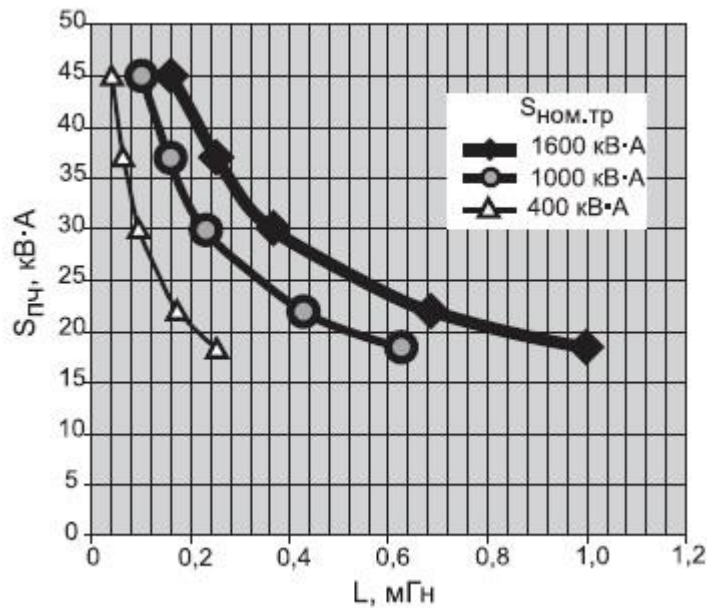


Рисунок 3.1. Вибір індуктивності мережевого дроселя L в залежності від $S_{пч}$ і $S_{ном.тр}$.

Таким чином, мережевий дросель в якості додаткової опції буферної ланки ПЧ сприяє наближенню коефіцієнта зсуву системи ПЧ-АД до величини $\cos\varphi$ двигуна, але не забезпечить компенсацію реактивної потужності індуктивної складової на частоті основної гармоніки. У розглянутому вище прикладі після підключення мережевого дроселя ($L = 2,4$ мГн) коефіцієнт зсуву ПЧ-АД перевищив $\cos\varphi$ АТ на 3,5% [13], що відповідало споживанню з мережі 0,75 кВАр реактивної потужності на 1 кВт активної навантаження і вимагає додаткової компенсації.

Традиційно в промислових системах електропостачання найбільш поширеним засобом компенсації РМ служать конденсаторні батареї (КБ), що підключаються до шин цехових ТП [11]. Згідно ГОСТ 1282-88 (МЕК 831) «Конденсатори для підвищення коефіцієнта потужності. Загальні технічні умови» струмове перевантаження КБ обмежена 30%. Однак при перевищенні в мережі допустимого значення K_U [12] через абсорбцію ємнісним опором

струмів вищих гармонік, допустима струмове навантаження буде перевищене і КБ швидко перегріється.

Крім того, на одній з частот гармонійного спектру ємність КБ може утворити з паралельно включеною індуктивністю мережі близький до резонансного контур [11-14]. Як правило, власна частота даного контуру знаходиться між 250 і 500 Гц [11-14], що відповідає частотам найбільш потужних 5-й і 7-й гармонік ПЧ (рис. 2.5). Це призведе до збільшення в 5-6 разів $K_{U(n)}$ [12] гармонік резонансу і додаткового зниження навантажувальної здатності трансформатора (2.10).

Послідовне включення з КБ захисного дроселя дозволить уникнути появи резонансного режиму, так як LC -ланка «дросель-КБ» утворює з опором мережі Z частотно-залежний діляк напруги, власна частота якого f_R зміщена нижче частот гармонік ймовірного резонансу (рис. 3.2). Тому для частоти f_R гілка LC матиме невеликий опір, приблизно рівне активного опору обмоток дроселя; для гармонік з частотою вище f_R імпеданс мережі буде індуктивним, а на основній частоті f_1 - ємнісним, забезпечуючи корекцію реактивної потужності навантаження. При цьому власну частотну характеристику мережі 0,4 кВ (без підключення КБ, рис. 3.2) можна вважати близькою до лінійної [10, 11].

Експлуатаційні властивості захисного дроселя характеризує внесений коефіцієнт частотного розладу [14]: $p = (f_1 / f_R) \cdot 2 \cdot 100\%$, а його прийняті VDEW стандартні величини (14; 7; 5,67%) відповідають f_R (135; 189; 210 Гц). Оскільки при зміні навантаження мережі частота f_R змінюється, значення p слід вибирати відповідно до порядку гармонік струму, що надходять від ПЧ.

Такі LC -ланки, що захищають КБ від перегріву і на частоті нижче f_R , одночасно з компенсацією реактивної потужності частково подавляють гармоніки, називають фільтрокомпенсуючими [14]. Найбільш часто однотипні LC -ланки об'єднують в комплектну фільтрокомпенсуючі установку (ФКУ), ступені якої автоматично комутуються в залежності від необхідної компенсації реактивної потужності на частоті основної гармоніки.

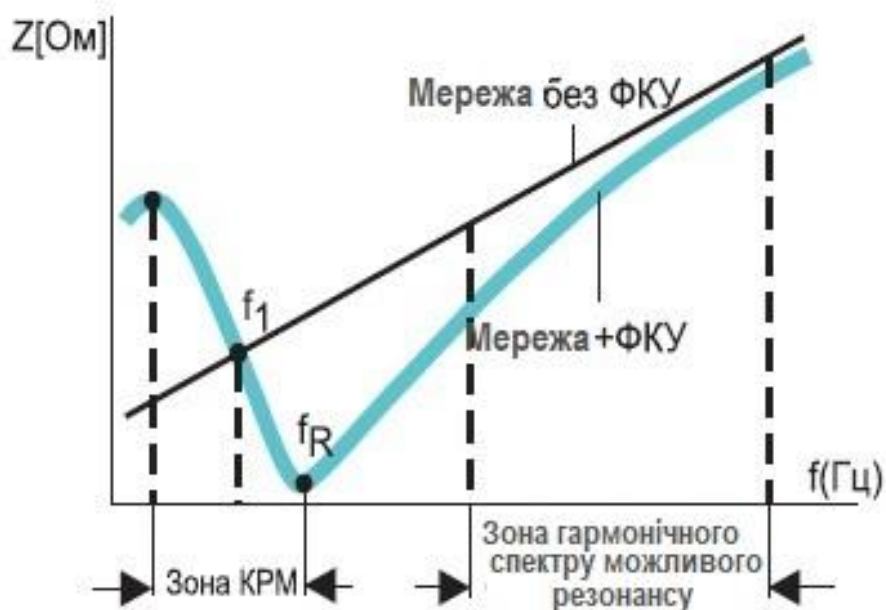


Рисунок 3.2. Зміна частотної характеристики низковольтної живильної мережі при підключенні ФКУ

3.2 Використання додаткового трансформатора та струмообмежуючого реактора для зменшення величини впливу ударних струмів на роботу трансформатора

Переклад ударного навантаження на живлення від трансформатора великої потужності, для якого інтенсивні зміни струмів величиною до 1000 А є безпечними, недоцільний внаслідок істотного зниження коефіцієнта його використання (завантаження) навіть при підключенні всіх споживачів, до шин 10 кВ ПС.

Забезпечення повної гальванічної розв'язки установок споживача з ударними характеристиками і шин 10 кВ ПС можливо шляхом використання додаткового силового трансформатора для живлення тільки установок з ударними характеристиками. Потужність виділеного трансформатора, по попередніми оцінками, повинна бути не менше 10 МВ·А. Підключення приєднання до силового трансформатора виконується через струмообмежуючі реактори з великим індуктивним опором, наприклад, РБГ-10-630-0.56, РБ, РБУБ РБГ 10-1000-0.56 або РБНГ 10-1000-0.56. При необхідності можливе

послідовне включення декількох реакторів з однаковою пропускною спроможністю (номінальним струмом).

У зв'язку з відсутністю шунтуючої дії навантаження з постійними характеристиками на джерело гармонійних спотворень схему доцільно доповнити широкосмуговим фільтром вищих гармонік. Так як додатковий трансформатор буде відчувати вплив аналогічний діючим, тому доцільно передати цей трансформатор на баланс промислового підприємства. Перевагою трансформаторної розв'язки є зниження емісії СНЧ процесів в мережу 110 кВ.

Другий варіант - забезпечення повної гальванічної розв'язки за допомогою включення в схему живлення випрямляча з інвертором і проміжним ємнісним накопичувачем енергії. Схема «випрямляч інвертор» приведена на рис. 3.3. Цей захід дає найбільший ефект, так як повністю виключає несиметрію струмів і ударні впливи. Для усунення можливих спотворень напруги внаслідок генерування інвертором і тиристорним випрямлячем високочастотних гармонік необхідно доповнити систему «випрямляч-інвертор» силовим фільтром вищих гармонік [6].

Інший варіант зміни схеми живлення ударного навантаження наведений на рисунку 3.4.

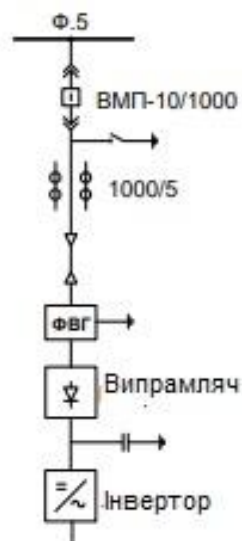


Рисунок 3.3. Схема «Випрамляч – інвертор»

Додатково трансформатор може бути обладнаний симетруючим пристроєм, який має бути спроектовано відповідно до характеристик підключених електроустановок промислового підприємства. В даний час розробляються системи вирівнювання розподілу фазного навантаження за допомогою силових трансформаторів з симетруючим пристроєм [5] і вивчається ефективність їх використання.

На рисунку 3.4 представлений варіант включення струмообмежувального реактора і фільтра вищих гармонік.

Доцільно використовувати реактор з великою індуктивністю, наприклад, РБУ-10-1000-0.56 або аналогічний. Слід зазначити, що даний варіант не забезпечує симетрування ударних впливів і зниження накладених СНЧ процесів.

На рисунку 3.5 наведена схема з включенням симетруючих трансформаторів. Симетруючі трансформатори розроблені для використання в тягових мережах, що мають відомий характер несиметрії - двох фазне навантаження на перегоні, а також для розподільних мереж з випадковим характером нерівномірного навантаження по фазах.

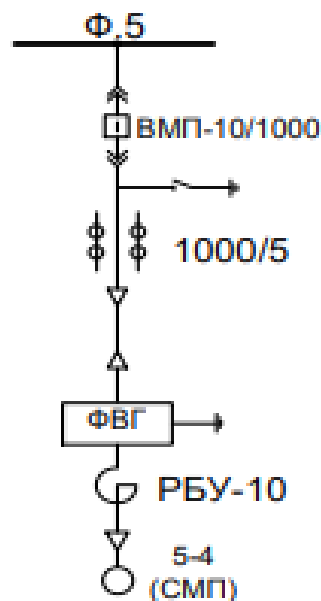


Рисунок 3.4. Схема підключення через реактор

У представленому варіанті пропонується включення групи паралельно включених трансформаторів типу ТМГСУ-250/10, або трансформаторів більшої потужності з симетруючим пристроєм. Потужність трансформаторів, клас напруги і інші технічні характеристики визначаються технологічними умовами виробництва споживача.

На рисунку 3.6 представлений варіант, який передбачає перетворення змінного струму в випрямлений, і переведення установок з ударним навантаженням на живлення випрямленою напругою. Цей варіант також, як і варіант схеми на рис. 3.7, повинен відповідати технологічним умовам підключеного споживача. Тому визначення моделі обладнання (випрямної установки і т.п.) і його характеристик, а також замовлення і виконання споживач повинен виконати самостійно.

Даний варіант за аналогією з варіантом схеми живлення з додатковим силовим трансформатором (рис. 3.7) і дає найбільший ефект, так як повністю виключає несиметрію струмів і ударні впливи. При використанні пристрою випрямлення з керованими силовими ключами необхідно доповнити систему «випрямляч-інвертор» силовим фільтром вищих гармонік

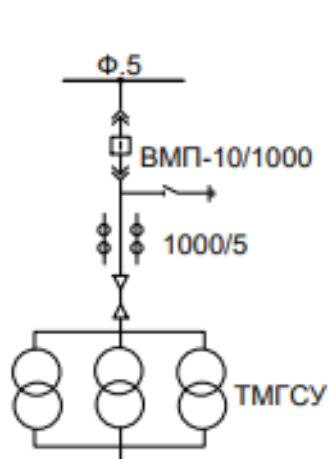


Рисунок 3.5. Група симетруючих трансформаторів

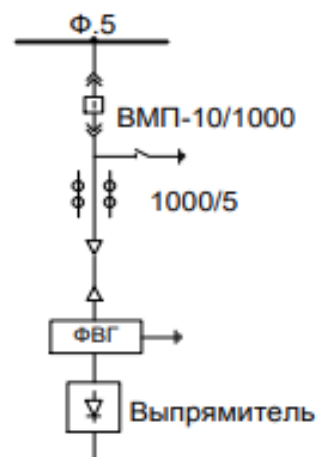


Рисунок 3.6. Перетворювач ударних навантажень АС/ДС

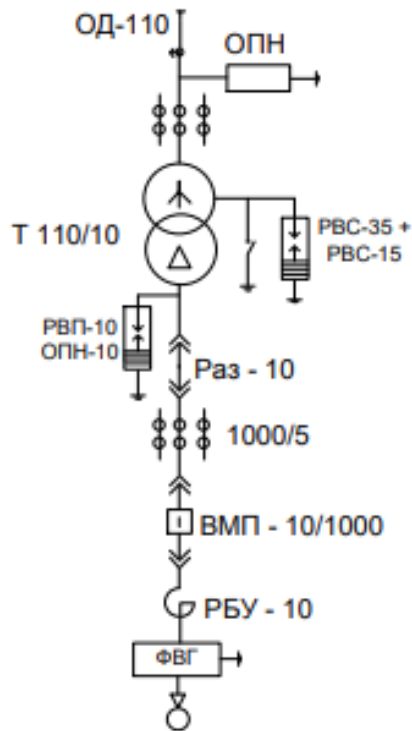


Рисунок 3.7. Схема живлення з додатковим силовим трансформатором

Висновки по третьому розділу

На основі проведених досліджень і з метою розробки пропозицій щодо зменшення впливу небезпечних чинників на силові трансформатори розглянуті наступні варіанти зниження небезпеки досліджуваних впливів:

- об'єднання навантаження для використання шунтуючої дії стабілізованого навантаження;
- зміна системи живлення установок, що викликають ударні впливи аж до застосування гальванічної розв'язки;
- використання струмообмежуючих реакторів в якості згладжують ударні зміни струмів;
- застосування симетруючих пристроїв.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню надійності роботи силових трансформаторів системи електроснабження за рахунок підвищення якості електроенергії.

Для цього було проаналізовано:

- вплив атмосферних перенапруг на роботу трансформаторів;
- вплив комутаційних та дугових перенапруг на роботу трансформаторів;
- вплив неякісної електроенергії на роботу трансформаторів;
- вплив якості електроенергії на тепловий режим роботи силового трансформатора;
- вплив нелінійності навантаження на роботу силового трансформатора.

Всі ці фактори впливають на надійність роботи трансформаторів тим чи іншим чином.

Після проведеного аналізу були розроблені рекомендації по зниженню небезпечних впливів на силові трансформатори, до яких можна віднести:

- установка додаткових пристроїв для зменшення величини впливу вищих гармонік на втрати потужності трансформатора;
- використання додаткового трансформатора та струмообмежуючого реактора для зменшення величини впливу ударних струмів на роботу трансформатора

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kulkarni, S. V. Transformer Engineering: Design and Practice. New York, 2004, 478 p.
2. Biki, M. A. Proektirovanie silovykh transformatorov. Raschet jsnivnykh parametrov. [Design of power transformers. Calculation of the main parameters]. Moscow, 2013. 612 p.
3. Novash, V.I., Romyancev Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki matlab-simulink s uchetom nasycheniya magnitprivoda [Calculation of parameters of the model of a three-phase transformer from the matlab-simulink library taking into account the saturation of the magnetic core]. Energetika. Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edinenij SNG, 2015, no. 1, pp. 12–24. (in Russian).
4. Daus, Yu., Yudaev, I. Estimation of Solar Energy Potential under Conditions of Urban Development. Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" 2017 (AIME 2017). AER-Advances in Engineering Research. 2017, vol. 133, pp. 156-161. doi: 10.2991/aime-17.2017.26.
5. Lup'e, A. I. Process vklyucheniya silovogo transformatora na holostoj hod i korotkoe замыкание [The process of switching power transformer on idle and short circuit]. Elektrotehnika, 2008, no. 2, pp. 2–18. (in Russian)
6. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы: Учебное пособие для электромеханических специальностей вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселёв, Н. А. Акимова / под ред. И. П. Копылова. М.: Высш. шк. 1989, 352 с.
7. <https://infopedia.su/5x428d.html>
8. В.В.Еремин, С.И.Каргов, Н.Е.Кузьменко, "Задачи по физической химии" (часть 2. Электрохимия), М: – Изд.МГУ 1999 г.
9. ДСТУ 3463-96 «Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів» (ГОСТ 14209-97, ІЕС 354-91). м. Київ:–1999 р.

10. Low-voltage expert guides № 4. Harmonic detection and filtering. Published by Schneider Electric Industries SA. France. 1999.
11. Жежеленко И. В, Саенко Ю. Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат. 2005.
12. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат. 1987.
13. Морозов М. И., Лукевски М. Дроссели фирмы Elhad Transformatory в составе энергосберегающих преобразователей частоты. <http://www.elhand.pl>
14. Шишкин С. Защитные антирезонансные дроссели низковольтных батарей конденсаторов // Силовая электроника. 2007. № 3.