

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Данильчук Владислав Васильович

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розрахунок параметрів силового трифазного трансформатора при тривалих  
несиметричних режимах  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

Данильчук В.В.

(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)

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Данильчук В.В. Розрахунок параметрів силового трифазного трансформатора при тривалих несиметричних режимах. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

У роботі проведений аналіз перехідних процесів при тривалих несиметричних навантаження для різних схем з'єднання трансформаторів.

Виробленні рекомендацій по покращенню роботи трифазних силових трансформаторів при тривалих несиметричних режимах навантаження.

**Ключові слова:** силовий трансформатор, несиметричний режим, перехідний процес, схема з'єднання.

## ABSTRACT

Danylchuk V.V. Calculation of the parameters of a three-phase power transformer for long-term asymmetric modes. Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2023.

In the work, the analysis of transient processes during long-term asymmetric loads for various schemes of connection of transformers is carried out.

Development of recommendations for improving the operation of three-phase power transformers in long-term asymmetric load modes.

**Key words:** power transformer, asymmetric mode, transition process, connection diagram.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОЮ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ.	6
1.1 Аналіз несиметричних режимів роботи трансформаторів	6
1.1.1 Аналіз несиметричного режиму при схемі з'єднань обмоток Y/Y <sub>n</sub>	6
1.1.2 Аналіз несиметричного режиму при схемі з'єднань обмоток Y/Z <sub>n</sub>	7
1.1.3 Визначення опорів прямої та нульової послідовності для різних схем з'єднання трансформатора	10
1.2 Аналіз роботи трансформатора при різних схемах з'єднання обмоток	11
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ РІЗНИХ СХЕМ З'ЄДНАННЯ	19
2.1 Аналіз роботи трансформатора Y/Δ з зигзагом при несиметричному навантаженні	19
2.2 Несиметричні режими роботи силових трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток Y/Y <sub>0</sub>	27
Висновки по розділу 2	34
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

## ВСТУП

Силовий трансформатор є одним із найважливіших елементів кожної електричної мережі. Передача електричної енергії на великі відстані від місця її виробництва до місця споживання вимагає в сучасних мережах не менше чим п'яти - шестиразової трансформації в підвищуючих і знижуючих трансформаторів. У міру віддалення від електростанції поодинокі потужності трансформаторів зменшуються, а питома витрата матеріалів на виготовлення трансформатора та втрати, віднесені до одиниці потужності, а також вартість 1 кВт втрат зростають. Тому одним із найважливіших завдань на даний час є зменшення втрат енергії у розподільчих трансформаторах класу напруги 6(10) кВ, які становлять найбільшу частину всього трансформаторного парку. У цих трансформаторах виникає основна маса втрат енергії, яка оплачується споживачем по найбільш високою ціні.

У електричних мережах 0,4 кВ з великим питомою вагою однофазних споживачів дуже складно рівномірно розподілити навантаження по фазах, оскільки вони включаються не залежно друг від друга в різні моменти часу. Головною причиною збільшення втрат у таких мережах є **несиметричне навантаження**, під дією якої значно збільшуються втрати енергії в трансформатор, і погіршується якість вихідної напруги. Збільшення цих втрат і погіршення якості енергії, що відпускається, сильно залежать від застосовуваної **схеми з'єднання** обмоток трансформатор. Тому дослідження несиметричних режимів роботи трифазних силових трансформаторів при несиметричних режимах навантаження і визначають **актуальність теми роботи**.

Відповідно **метою кваліфікаційної роботи** є аналіз перехідних процесів при тривалих несиметричних навантаження для різних схем з'єднання трансформаторів.

**Об'єктом дослідження** являється триобмотковий силовий трансформатор.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в виробленні

рекомендацій по покращенню роботи трифазних силових трансформаторів при тривалих несиметричних режимах навантаження.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження:**

Данильчук В.В. АНАЛІЗ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна.  
С. 69-71

Гончаренко Ю.П., Данильчук В.В. АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РОБОТІ ТРАНСФОРМАТОРА  $Y/\Delta$  З ЗИГЗАГОМ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна.  
С. 69-71

## РОЗДІЛ 1

### ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОЮ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ.

#### 1.1 Аналіз несиметричних режимів роботи трансформаторів

##### 1.1.1 Аналіз несиметричного режиму при схемі з'єднань обмоток $Y/Y_n$

Оцінімо вплив однофазний навантаження на роботу трансформатора зі схемою з'єднання  $Y/Y_n$  (Рис. 1.1).

У вторинному ланцюзі навантажена тільки одна обмотка і, отже, створена вторинною обмоткою намагнічуюча сила (Н.С.) розмагнічує тільки один стрижень, але первинний струм, компенсуючий розмагнічуючу дію вторинної обмотки, буде протікати тільки по одній навантаженій фазі не може, це пов'язано з відсутністю нейтрального проводу на первинній стороні (ВН).

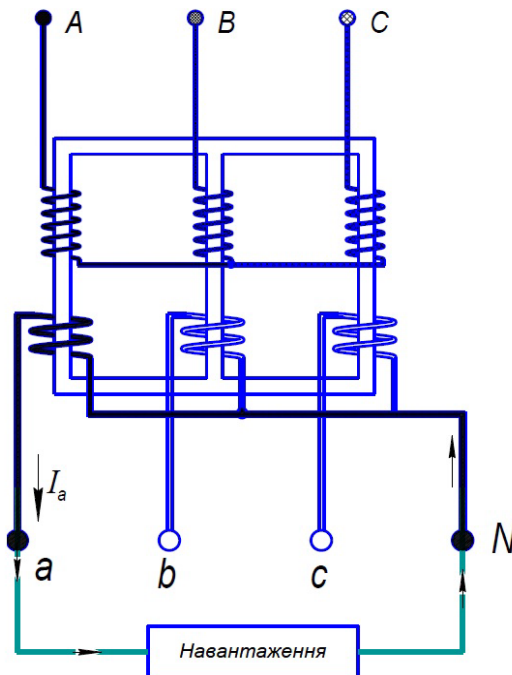


Рисунок 1.1 - Однофазне навантаження для трансформатора зі схемою  
 $Y/Y_n$ .

Первинний струм різною мірою протікає через усі три обмотки ВН. Створена ним н.с. нерівномірно розподіляється між стрижнями магнітопроводу і не компенсується в не навантажених фазах і відповідно

магнітну рівновагу порушено. Наслідки цього порушення зводяться до виникнення у трьох стрижнях магнітного потоку розсіювання, направлено в один бік  $\Phi_{a3}$ ,  $\Phi_{b3}$ ,  $\Phi_{c3}$  (рис.1.2) [9]. Він замикається через оливу, бак та дно трансформатора та нагріває його. Крім того, магнітний потік розсіювання значно збільшує опір магнітно невірноваженої частини первинної обмотки. Це наводить до нерівномірного розподілу первинної напруги між обмотками. Але якщо первинні напруги відрізняються, то і вторинні напруги не можуть бути рівними. Наслідком всього цього є усунення нейтралі фазних Е.Р.С. первинної та вторинної обмоток, що призводить до значних додатковим активним втрат у трансформаторі.

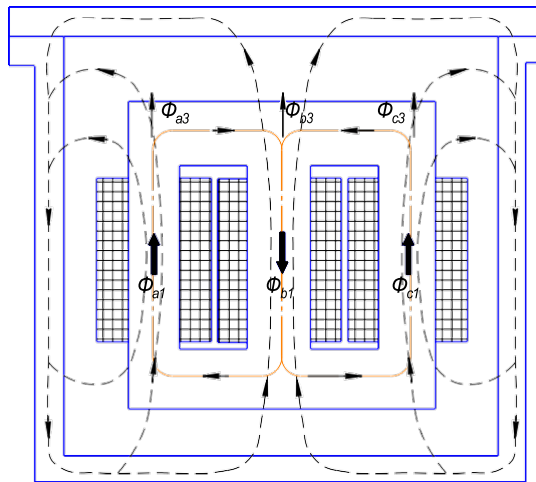


Рисунок 1.2 -  $\Phi_{a3}$ ,  $\Phi_{b3}$ ,  $\Phi_{c3}$  - магнітні потоки, що збігаються по фазі, однаково спрямовані в стрижнях і тому змушені замикатися через бак трансформатора.  $\Phi_{a1}$ ,  $\Phi_{b1}$ ,  $\Phi_{c1}$  - магнітні потоки основної частоти.

### 1.1.2 Аналіз несиметричного режиму при схемі з'єднань обмоток $Y/Z_n$

З'єднання обмоток в «зигзаг» застосовується для рівномірного розподілу навантаження вторинних обмоток між фазами трансформатора, що дозволяє навіть при нерівномірному навантаженні зберігати магнітну рівновагу.

Для з'єднання вторинних обмоток (НН) трансформатора в схему «зигзаг»,

обмотка кожної фази складається з двох половин: одна половина розташована на одному стрижні, інша - на іншому (рис.1.3). Дані половини обмотки включені зустрічно, тобто. кінець  $x_1$  з'єднаний з кінцем  $y_2$  і т.д. Початки  $a_2, b_2$  і  $c_2$  з'єднані та утворюють нейтраль.

До початків  $a_1, b_1$  і  $c_1$  приєднані лінійні проводи вторинної мережі. При такому з'єднанні Е.Р.С. обмоток, розташованих на різних стрижнях, зрушені на  $120^\circ$ ; векторна діаграма Е.Р.С. вторинної обмотки показано на рис. 1.4.

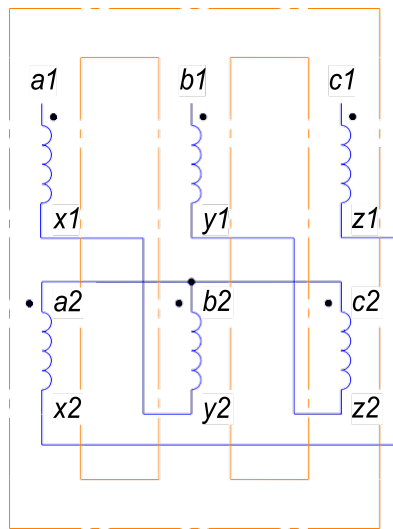


Рисунок 1. 3 - Схема з'єднання вторинних обмоток в "Зигзаг".

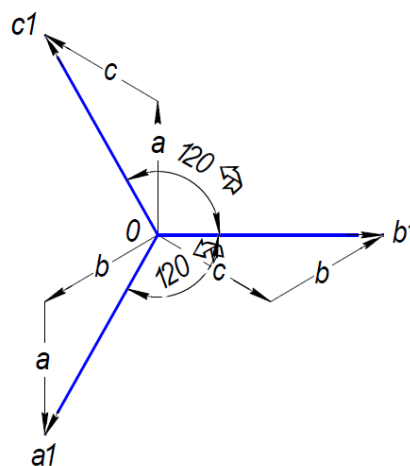


Рисунок 1.4 - Векторна діаграма Е.Р.С. обмоток при схемі з'єднання "Зигзаг".

Для того щоб трансформатор зі схемою з'єднання  $Y/Z_H$  мав аналогічні характеристики втрат холостого ходу і втрат короткого замикання, що й



трансформатор зі схемою з'єднання  $Y/Y_n$ , необхідно використовувати більше матеріалів, оскільки з'єднання в «zigzag» вимагає більшої кількості витків. Дійсно, при послідовному з'єднанні двох половин обмотки, розташованих на одному стрижні, Е.Р.С. складаються алгебраїчно, тобто. в даному випадку подвоюються. Дійсно, при послідовному з'єднанні двох половин обмотки, розташованих на одному стрижні, Е.Р.С. складаються алгебраїчно, тобто. в даному випадку подвоюються. При з'єднанні обмоток, розташованих на різних стрижнях, Е.Р.С. складаються геометрично під кутом  $120^\circ$  і дають Е.Р.С. в  $\sqrt{3}$  більше з них, тобто. Е.Р.С. не в 2-а, а всього в 1,732 рази більше. Отже, щоб отримати Е.Р.С. тієї ж величини при з'єднанні в «zigzag», потрібно на 15% більше витків, чим при з'єднанні в зірку.

Розглянемо роботу трансформатора зі схемою з'єднання  $Y/Z_n$  при однофазному навантаженні (Рис. 1.5).

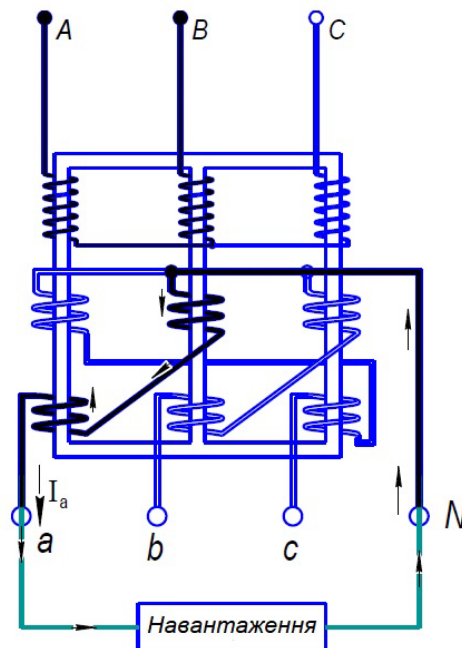


Рисунок 1.5 - Однофазне навантаження для трансформатора зі схемою  $Y/Z_n$ .

Як вже було сказано вище, особливістю даної схеми з'єднання є те, що кожна фаза вторинної обмотки (НН) одночасно розташовується відразу на двох стрижнях магнітопроводу. Отже, при однофазному навантаженні створена вторинною обмоткою н.с. розмагнічує одразу два стрижня, і

первинний струм, компенсуючий це розмагнічуючу дію, розподіляється по фаз первинної обмотки. Магнітна рівновага практично не порушується, не виникає односпрямований магнітний потік розсіювання (обмотки включені зустрічно), відсутні його негативні наслідки.

### 1.1.3 Визначення опорів прямої та нульової послідовності для різних схем з'єднання трансформатора

Опір прямий послідовності для всіх схем з'єднання визначаються по формулам [10]:

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} ; \quad R_1 = \frac{P_{кз}}{3I_H^2} ; \quad Z_1 = \frac{U_k U_H^2}{100 \cdot S_H} .$$

де  $I_H$  - номінальний струм;

$Z_1$  - повний опір трансформатора прямої послідовності;  $U_k$  - напруга короткого замикання;

$P_{кз}$  – втрати короткого замикання;  $S_H$  - номінальна потужність;

$U_H$  - номінальна напруга.

Тобто, опір прямої послідовності від схеми з'єднання практично не залежать.

У трансформаторі опір прямий і зворотній послідовностей приблизно рівні  $R_1 \cong R_2$ ,  $X_1 \cong X_2$ .

Для схеми  $Y/Y_H$  - опір нульової послідовності розрахувати практично не можливо. Він залежить від конструктивних параметрів трансформатора (конструкція активної частини, ярмових балок, внутрішніх ізоляційних зазорів). Їх значення вимірюються заводом виробником по вимогу замовника.

Для схеми  $Y/Z_H$  - опір нульової послідовності практично дорівнює нулю  $R_0 \cong 0$ ,  $X_0 \cong 0$ .

Довідкові дані повного опору трансформаторів сторони НН для різних схем з'єднання наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Потужність трансформатора, кВА	Z повне для схеми Y/ Y <sub>H</sub> -0, Ом	Z повне для схеми Y/Z <sub>H</sub> -11, Ом
25	3,11	0,675
40	1,95	0,412

63	1,237	0,2639
100	0,779	0,1674
160	0,487	0,1071
250	0,312	0,069
400	0,203	0,046
630	0,129	-
1000	0,081	-

Проаналізувавши довідкові дані опорів трансформаторів, не важко переконатися, що струм однофазного короткого замикання для трансформаторів зі схемою з'єднання  $Y/Z_n$  збільшується більш ніж 4,5 рази по відношенню до струму короткого замикання для схеми  $Y/Y_n$ , що полегшує правильний вибір захисту трансформаторів та забезпечує її надійну роботу.

## **1.2 Аналіз роботи трансформатора при різних схемах з'єднання обмоток**

Для виведення поточних параметрів електричної мережі можна використовувати ЕОМ, яка підключається через оптичний інтерфейс зв'язку із застосуванням програмного забезпечення "Конфігуратор СЕТ-4ТМ". Вікно конфігуратора після включення трансформатора на навантаження показано на рис. 1.6.

Під впливом нерівномірності навантаження фаз у трансформаторі зі схемою з'єднання  $Y/Y_n$  відбувається спотворення системи фазної напруги. І вже на низьковольтних вводах трансформатора показники КЕ, такі як Відхилення напруги і Несиметрія напруги, не відповідають нормам ДСТУ EN 50160-2014. У кінці ліній, за даними досліджень, відхилення напруг приблизно вдвічі більше. Основним негативним ефектом несиметрії напруги є нагрівання обладнання. При даній якості живлення споживачів відбувається підвищення в них рівня втрат електроенергії та прискорений вихід з ладу електротехнічних приладів.

Наочно це можна побачити при підключенні до трансформатора однофазного навантаження приблизно рівного 45% від номінальної навантаження фази (рис.1.7).

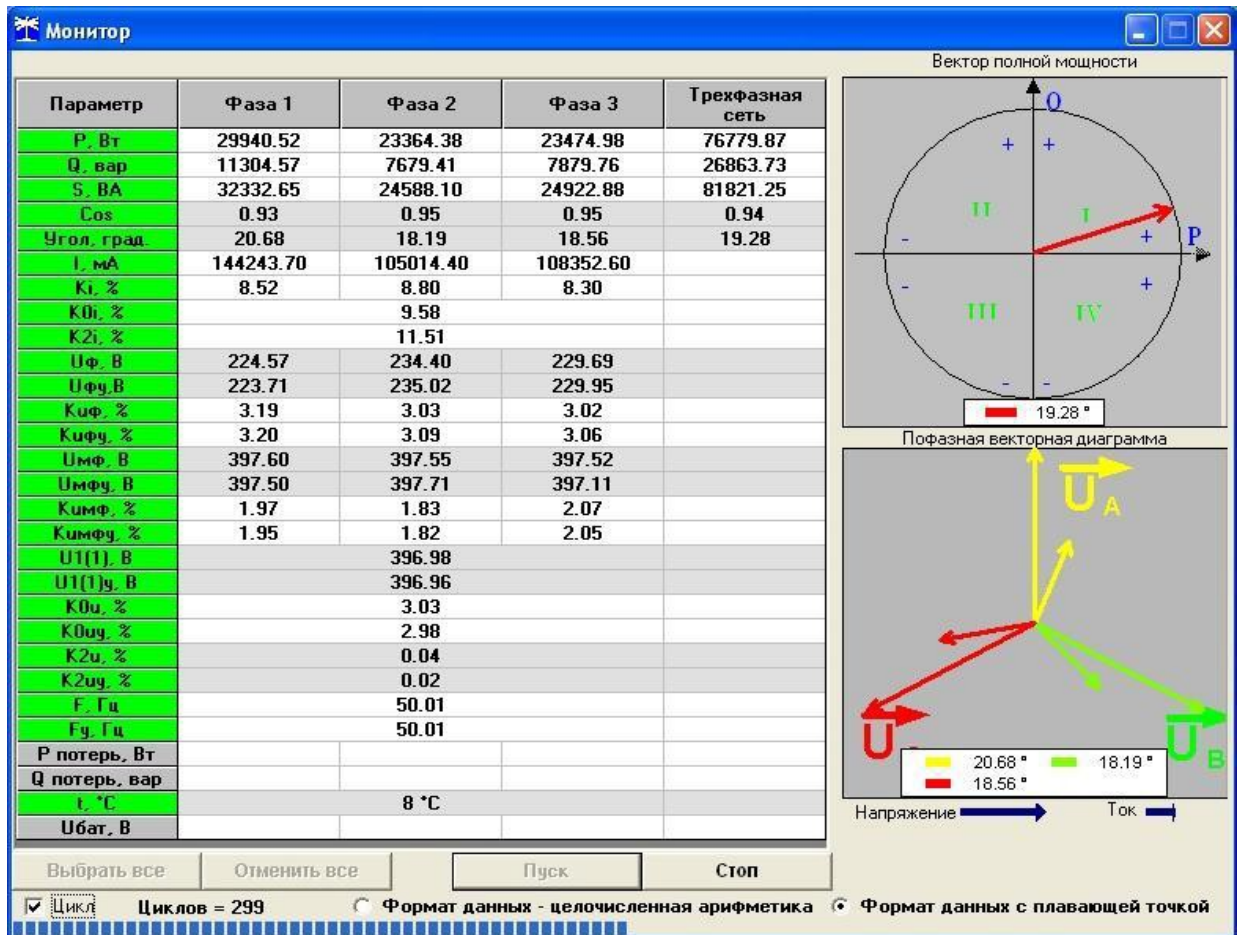


Рисунок 1.6 - Поточні значення параметрів електричної енергії на боці 0,4 кВ трансформатора ТМ-250 зі схемою з'єднання  $Y/Y_n$ , де: P - активна потужність; Q – реактивна потужність; S - Повна потужність; Cos - коефіцієнт потужності; Кут – кут зсуву фаз між струмом та напругою; I - струм; Ki - коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривий струмів; K0i, K2i – коефіцієнт несиметрії струму за нульовою та зворотною послідовностями; Uф - фазна напруга; Kиф - коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої фазної напруги; Umф - міжфазна напруга; Kумф - коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривий міжфазних напруги; U1(1) – чинне значення міжфазної напруги прямої послідовності основної частоти; K0u - коефіцієнт несиметрії напруги за нульовим послідовності; K2u - коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю; F - Частота мережі; t - температура всередині лічильника.

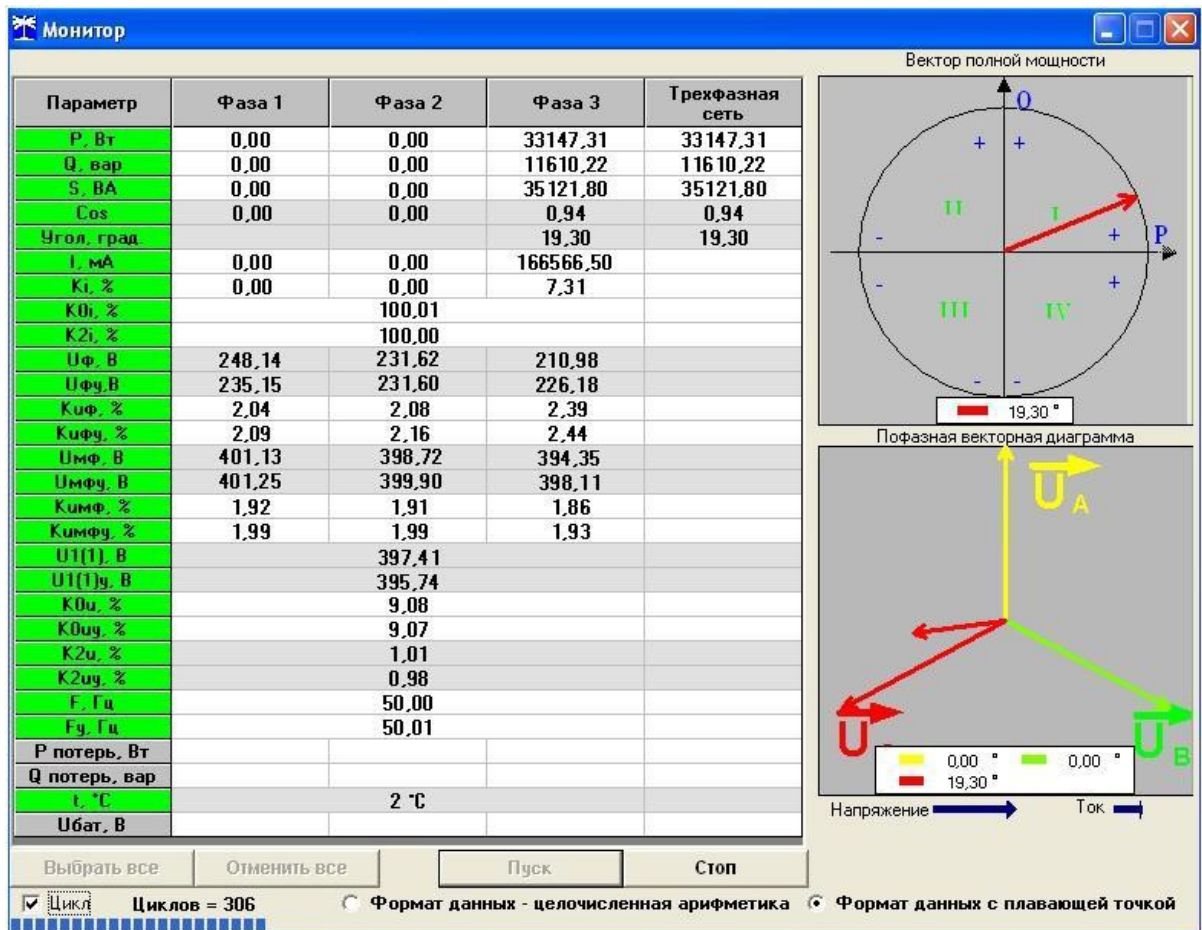


Рисунок 1.7- Поточні показання електричної енергії на стороні 0,4 кВ трансформатора ТМ-250 зі схемою з'єднання Y/Ун при роботі на однофазне навантаження.

За результатами вимірювання видно, що коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0u}$ , характеризує несиметрію фазних напруги, має значення більше 9% , що значно перевищує нормально допустимі 2% і гранично допустимі 4% за ДСТУ EN 50160-2014.

На навантаженій фазі напруга становить близько 211 В. З урахуванням падіння напруги в лінії живлення, ближче до її кінця, напруга у споживача буде менше 190 В, що неприпустимо, і може спричинити вихід з ладу електроустаткування.

На крайній, не навантаженій фазі, напруга підвищується до 248 В, що також виходить за межі нормально допустимих значень. Підвищення напруга на одній крайній, не навантаженій фазі, трансформатора пов'язано з особливістю роботи тристержневого трансформатора в несиметричному

режимі зі схемою з'єднання  $Y/Y_n$ .

У даному режимі відбувається значне зміщення нейтральної точки вторинної обмотки трансформатора (з точки  $O$  в точку  $O'$ ), щодо нейтральної точки в симетричному режимі роботи (рис.1.8), що несприятливо позначається як у роботі самого трансформатора, і на роботі споживачів, запитаних від нього.

Основну частину несиметрії вносить складова напруги нульової послідовності. Для того щоб практично повністю виключити складову напруги нульової послідовності і тим самим, вирівняти величини фазних напруг, використовують схему з'єднання  $Y/Z_n$ .

### **Робота трансформатора зі схемою $U/U_n$ на трифазне несиметричне навантаження**

Трансформатор був включений у нормальний робочий стан, на реальне трифазне навантаження (рис.1.6). У протягом 8 годин, з інтервалом 10 хвилин знімалися усереднені показання вимірюваних фізичних величин. Зміна коефіцієнта несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0u}$ , характеризує несиметрію фазних напруг у часу при різному струмі у нульовому провіднику, показано на рис. 1.9.

Як видно з графіків, несиметрія фазної напруги залежить від величини струму в нульовому провіднику. Якість електричної енергії за коефіцієнтом нульової послідовності відповідає ДСТУ EN 50160-2014, сумарна тривалість часу виходу за його нормально допустимі значення (МДЗ – 2%) за весь період вимірювання становить 77% за нормованих 5%, а за гранично допустимі значення (ПДЗ – 4%) становить 3,96% при нормованому ДСТУ - 0%.

### **Трансформатор зі схемою $Y/Z_n$ при роботі на однофазну навантаження**

Після демонтажу трансформатора ТМ-250  $Y/Y_n$  на підстанцію було встановлено трансформатор ТМГ-250 з схемою з'єднання  $Y/Z_n$ . До трансформатора, як і в попередньому досвіді з трансформатором  $Y/Y_n$ , була

підключена аналогічна однофазне навантаження (Рис. 1.10).

Однофазне навантаження для трансформатора "Зірка"

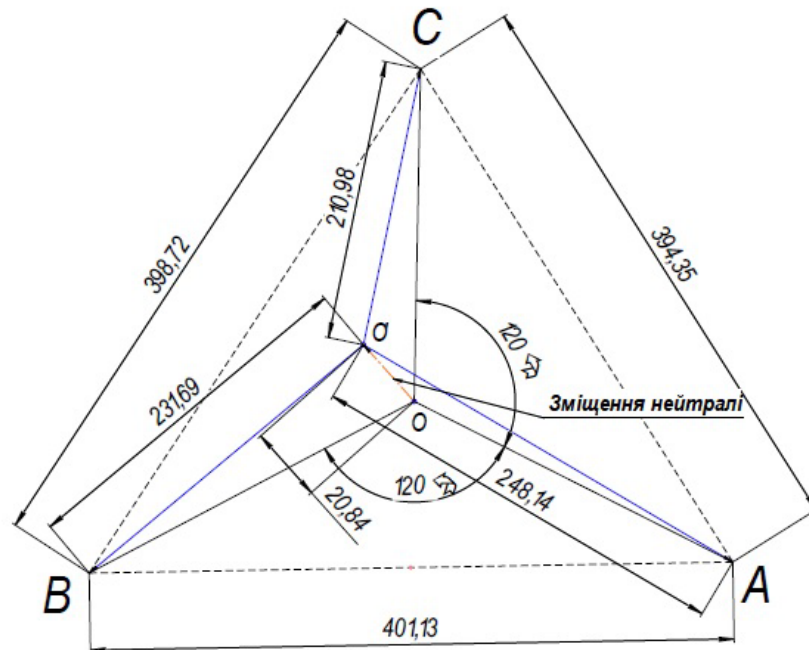


Рисунок 1.8 - Векторна діаграма напруг трансформатора при несиметричному навантаженні.

У цьому досвіді чітко видно, що **однофазне навантаження** трансформатора **мало спотворює фазні напруги**, фазні напруги залишаються на номінальному рівні.

Коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності  $K_{0u}$  **не перевищує 0,3%**, що відповідає вимогам ДСТУ EN 50160-2014.[1]

### **Робота трансформатора зі схемою $Y/Z_n$ на трифазне несиметричне навантаження.**

Трансформатор  $Y/Z_n$ , аналогічно трансформатору  $Y/Y_n$ , був включений в нормальний робочий стан, реальне трифазне навантаження. Протягом 8 годин з інтервалом у 10 хвилин знімалися усереднені показання вимірних фізичних величин.



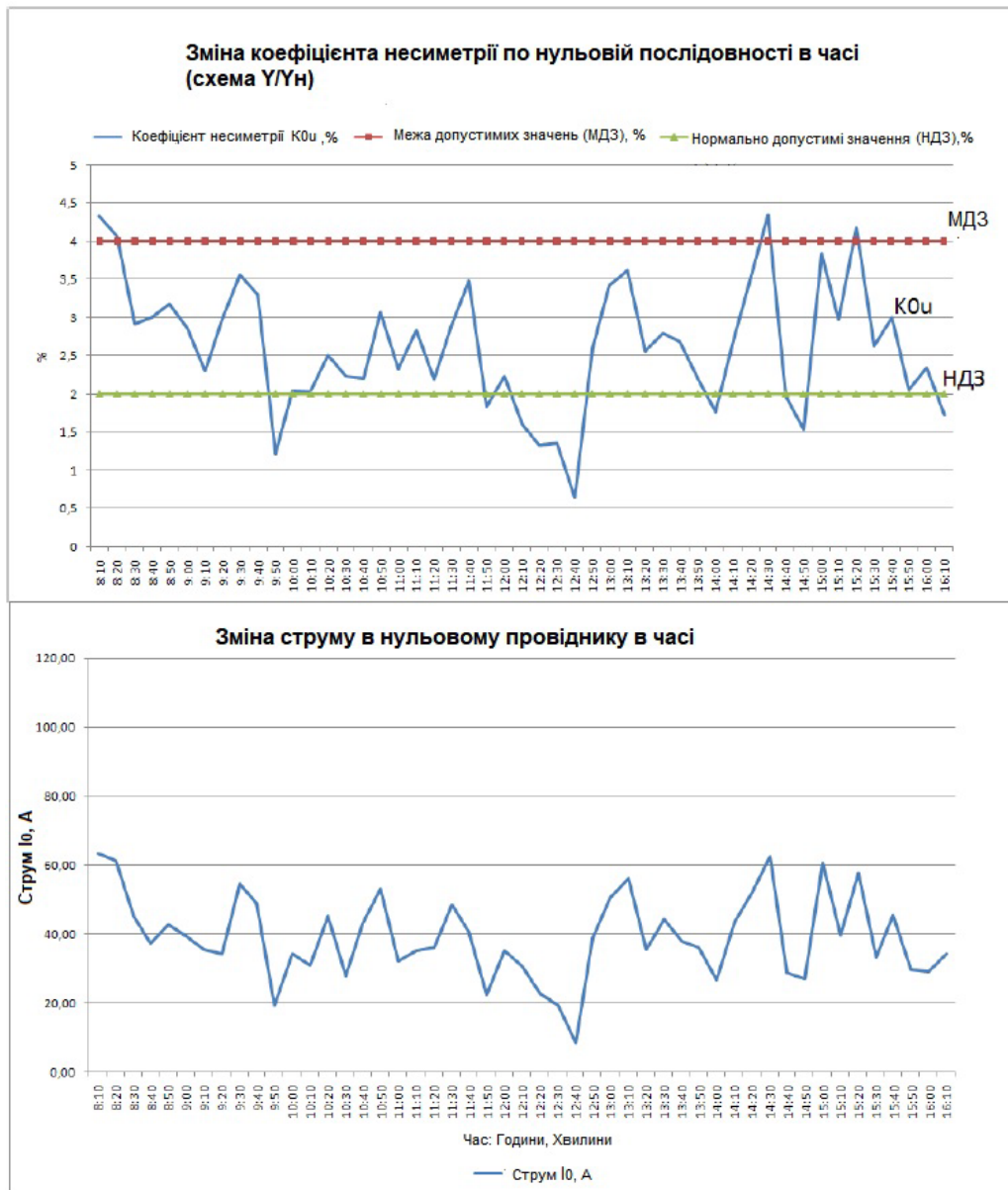


Рисунок 1.9 - Зміна коефіцієнта несиметрії по нульовій послідовності в часі в залежності від струму в нульовому провіднику.

Зміна коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю  $K_{0i}$ , що характеризує несиметрію фазних напруг у часу при різному струмі в нульовому провіднику, показано на рис. 1.11.

**Несиметрія** фазної напруги практично **відсутня** і не залежить від струму в нульовому провіднику. Коефіцієнт  $K_{0i}$  вписується у 0,3% на відміну трансформатора зі схемою з'єднання Y/  $Y_n$ , де  $K_{0i}$  перевищує 4%.



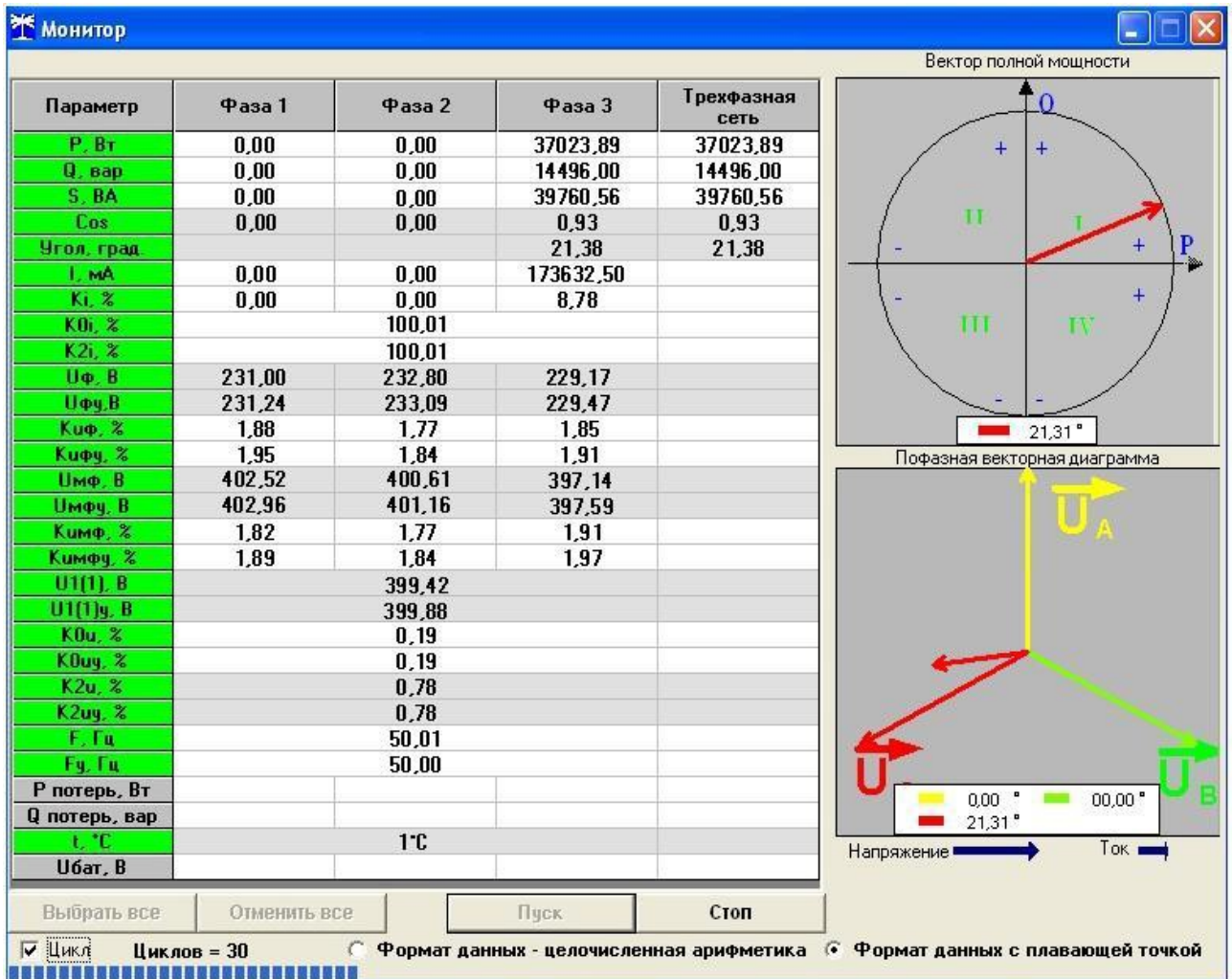


Рисунок 1.10 - Поточні показання електричної енергії за 0,4 кВ трансформатора ТМГ-250 зі схемою з'єднання Y/Zn під час роботи на однофазне навантаження

### Висновки по першому розділу

Найбільш не захищеним з точки зору впливу несиметрії є трансформатор зі схемою з'єднання Y/Y<sub>n</sub>-0. У ньому відбувається спотворення величин фазної напруги (зміщення нейтралі), збільшення активних втрат енергії в трансформаторі, та має дуже малі струми однофазного короткого замикання.

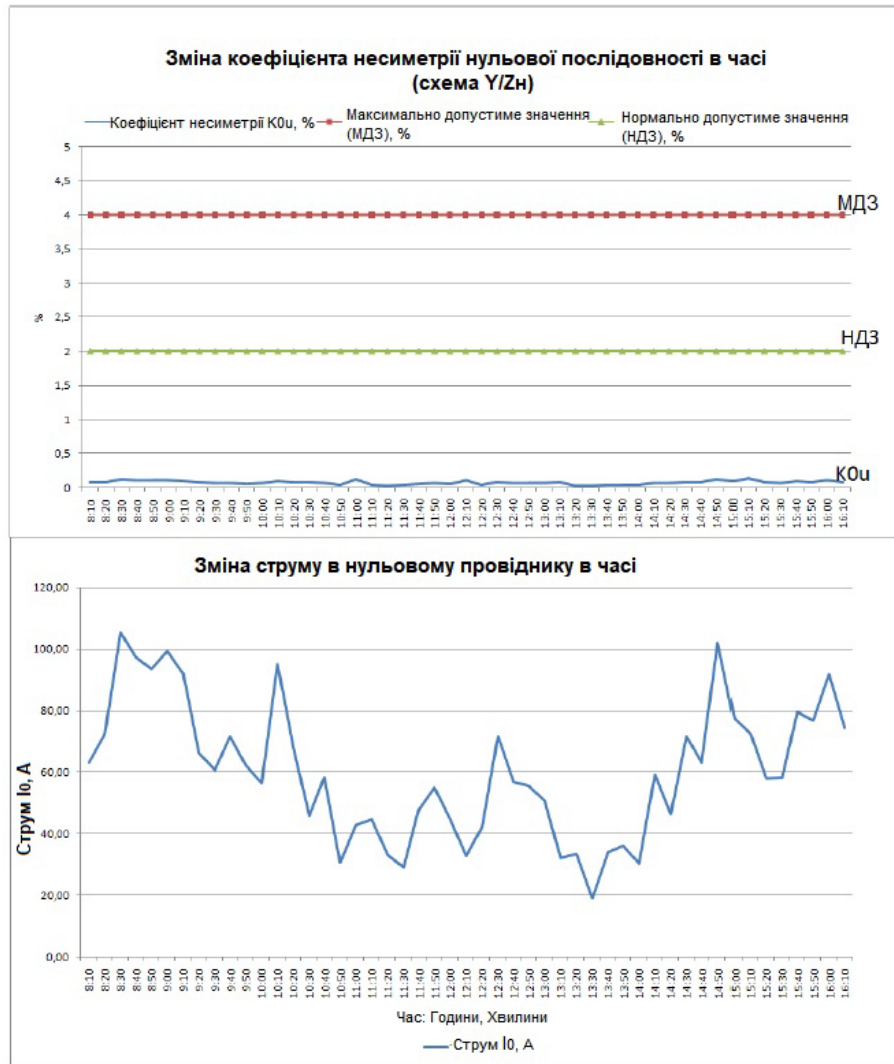


Рисунок 1.11- Зміна коефіцієнта несиметрії при нульовій послідовності в часі в залежності від струму в нульовому провіднику.

## РОЗДІЛ 2

## АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ РІЗНИХ СХЕМ З'ЄДНАННЯ

### 2.1 Аналіз роботи трансформатора $Y/\Delta$ з зигзагом при несиметричному навантаженні

Завдання підвищення якості напруги в електричних мережах актуальна для всіх регіонів України. Особливо це актуально для сільських мереж. Це пояснюється територіальною роз'єднаністю споживачів, великий протяжністю повітряних ліній при малій переданій потужності. У таких мережах підтримка нормованого рівня якості напруги пов'язано із значними труднощами.

Рекомендовані для застосування в мережах сільськогосподарської призначення трансформатори  $Y / Y_n$ ,  $\Delta/Y$ ,  $Y/\Delta$ ,  $Y_n/\Delta$ ,  $Y/Z_n$  не дозволяють забезпечувати достатньо високий рівень симетрії напруг при несиметричному характері навантаження [6,7].

Для вирішення задачі забезпечення якості напруги в електромережах сільськогосподарського призначення автором пропонується здійснювати живлення несиметричних споживачів за допомогою трансформатора зі схемою з'єднання  $Y/\Delta$  із зигзагом, схема з'єднання обмоток якого представлено на рис.2.1[8]. Первинні обмотки 1 трансформатора з'єднані зіркою.

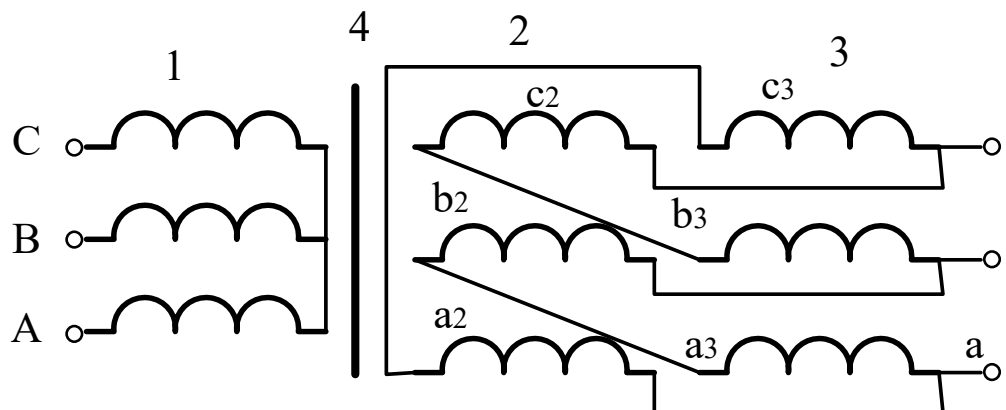


Рисунок. 2.1. Трансформатор із схемою з'єднання омоток  $Y/\Delta$  із зигзагом:  
1 -первинна обмотка трансформатора; 2 -3 – вторинні обмотки; 4 – магнітопровід

Вторинні обмотки 2-3 складаються з двох з'єднаних послідовно половин 2 і 3, що знаходяться на різних стрижнях магнітопроводу 4. Причому на кожному із стрижнів магнітопроводу знаходяться половини обмоток двох різних фаз. Зокрема, обмотка фази «а» складається з двох половин  $a_3$  та  $b_2$ , фази «b» - з половин  $b_3$  та  $c_2$ , фази «с» - з половин  $c_3$  і  $a_2$ .

Зробимо аналіз роботи трансформатора при несиметричному навантаженні методом симетричних складових, сутність якого полягає в тому, що будь-яку несиметричну систему трьох струмів, напруг і т. д. однакової частоти можна уявити у вигляді трьох симетричних систем: прямої, зворотної та нульової послідовностей. При цьому опори тих самих елементів електричних систем різні для різних послідовностей і називаються відповідно опором прямої, зворотної та нульової послідовностей. При розгляді приймемо такі припущення:

1. Трансформатор є лінійним елементом мережі.
2. Система первинних напруг симетрична і залежить від режиму роботи трансформатора.
3. Струм холостого ходу дорівнює нулю.
4. Обмотки трансформатора, розміщені на одному стрижні, розглядаються як обмотки трьохобмотувального трансформатора. При цьому параметри кожної з половин вторинної обмотки приведені до параметрів первинної обмотки
5. Досліджуваний трансформатор понижуючий.

Аналіз роботи трансформатора при несиметричному навантаженні почнемо з розгляду умов протікання струмів нульової послідовності. Для цього розглянемо схему з'єднання обмоток  $Y/\Delta$  з зигзагом, представлену на рис. 2.1. Обмотка вищої напруги з'єднана в зірку без нульового проводу. Тому в ній немає шляху для протікання струмів нульової послідовності. У цій обмотці вони відсутні. Система фазних струмів обмотки вищої напруги є врівноваженою, а їх сума дорівнює нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 . \quad (2.1)$$

де  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  - фазні струми обмоток вищої напруги А, В, С відповідно.

Фазні струми обмоток вищої напруги дорівнюють:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} = \dot{I}'_A; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = \dot{I}'_B; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = \dot{I}'_C, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{B1}, \dot{I}_{C1}$  - струми прямої послідовності обмотки вищої напруги трансформатора фази А, В, С відповідно;

$\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2}$  - струми зворотної послідовності обмотки вищої напруги трансформатора фази А, В, С відповідно;

$\dot{I}'_A, \dot{I}'_B, \dot{I}'_C$  - сума струмів прямої та зворотної послідовностей обмотки вищої напруги трансформатора фази А, В, С, відповідно.

Фазні напруги вищої обмотки трансформатора можуть включати складові всіх послідовностей:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \dot{U}'_A + \dot{U}_{A0} ; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0} = \dot{U}'_B + \dot{U}_{B0} ; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0} = \dot{U}'_C + \dot{U}_{C0} , \end{aligned} \quad (2.3)$$

де  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  - фазні напруги вищої обмотки трансформатора фази А, В, С, відповідно;

$\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$  - напруги прямої послідовності обмотки вищої напруги трансформатора фази А, В, С, відповідно;

$\dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$  - напруги зворотної послідовності обмотки вищої напруги трансформатора фази А, В, С, відповідно;

$\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{B0}, \dot{U}_{C0}$  - напруги нульової послідовності обмотки вищого напруги трансформатора фази А, В, С, відповідно;

$\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  - сума напруги пряма і зворотної послідовностей обмотки вищої напруги трансформатора фази А, В, С відповідно.

По обмотці нижчої напруги трансформатора, з'єднаної у трикутник, можуть протікати струми нульовий послідовності. Обмотка, з'єднана трикутником, представляє для струмів нульовий послідовності короткозамкнений ланцюг, по якому вони будуть циркулювати не виходячі із лінії. Відповідно фазні струми вторинної обмотки трансформатора можуть включати складові всіх послідовностей:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}'_{a1} + \dot{I}'_{a2} + \dot{I}_{a0} = \dot{I}''_a + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}'_{b1} + \dot{I}'_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{I}''_b + \dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}'_{c1} + \dot{I}'_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{I}''_c + \dot{I}_{c0}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $\dot{I}'_{a1}, \dot{I}'_{b1}, \dot{I}'_{c1}$  - струми прямої послідовності обмотки нижчої напруги трансформатора фази А, В, С відповідно;

$\dot{I}'_{a2}, \dot{I}'_{b2}, \dot{I}'_{c2}$  - струми зворотної послідовності обмотки нижчої напруги трансформатора фази А, В, С відповідно;

$\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$  - струми нульової послідовності обмотки нижчої напруги трансформатора фази А, В, С відповідно;

$\dot{I}''_a, \dot{I}''_{b0}, \dot{I}''_{c0}$  - сума струмів прямої та зворотної послідовностей обмотки нижчої напруги трансформатора фази А, В, С, відповідно.

Фазні напруги вторинної обмотки трансформатора, з'єднаної трикутником, не містять складових нульовий послідовності:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}'_{a1} + \dot{U}'_{a2} = \dot{U}''_a; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}'_{b1} + \dot{U}'_{b2} = \dot{U}''_b; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}'_{c1} + \dot{U}'_{c2} = \dot{U}''_c. \end{aligned}$$

де  $\dot{U}_{a1}, \dot{U}_{b1}, \dot{U}_{c1}$  - фазні напруги нижчої напруги трансформатора фази а, b, с, відповідно;

$\dot{U}_{a2}, \dot{U}_{b2}, \dot{U}_{c2}$  - напруги прямої послідовності обмотки нижчої напруги трансформатора фази а, b, с, відповідно;

$\dot{U}_a'', \dot{U}_b'', \dot{U}_c''$  - сума напруг прямої і зворотної послідовностей обмотки нижчої напруги трансформатора фази a, b, c, відповідно.

Трансформатор є статичним апаратом. Опір прямої та зворотної послідовностей у його рівні один одному і рівні опору короткого замикання. Отже, немає необхідності розглядати окремо струми прямої та зворотної послідовностей. Можна розглядати тільки їх суму.

Для обмотки вищої напруги фази А справедливий вираз:

$$\dot{U}_A = -\dot{E}_A + \dot{I}_A \cdot z_1, \quad (2.6)$$

де  $\dot{E}_A$  - ЕРС первинної обмотки фази А, яка створюється основним магнітним потоком трансформатора;

$z_1$  - еквівалентний опір обмотки вищої напруги трансформатора.

Для напівобмоток низького напруги  $a_2$  і  $a_3$ , (рис.2.1), що знаходяться на том ж стрижні магнітопроводу що і обмотка вищого напруги фази А, і які належать різним фазам:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{a_2} &= \dot{E}_A - \dot{I}_{a_2} \cdot z_2; \\ \dot{U}_{a_3} &= \dot{E}_A - \dot{I}_{a_3} \cdot z_3, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $\dot{U}_{a_2}, \dot{U}_{a_3}$  - напруга напівобмоток  $a_2$  і  $a_3$  вторинної сторони;

$z_2, z_3$  - еквівалентні опори відповідно напівобмоток 2 та 3;

$\dot{I}_{a_2}, \dot{I}_{a_3}$  - струми, які відповідно протікають по напівобмотках 2 та 3.

Еквівалентні опори обмоток вищої напруги і напівобмоток нижчого напруги можна, можливо визначити з виразів:

$$\begin{aligned} z_1 &= r_1 + jx_1 = r_1 + j\omega(L_1 - M_{12} - M_{13} + M_{23}) ; \\ z_2 &= r_2 + jx_2 = r_2 + j\omega(L_2 - M_{12} - M_{23} + M_{13}) ; \\ z_3 &= r_3 + jx_3 = r_3 + j\omega(L_3 - M_{13} - M_{23} + M_{12}) , \end{aligned} \quad (2.8)$$

де  $r_1, r_2, r_3$  - активні опору обмоток вищої напруги, напівобмоток 2 та 3 нижчої напруги, відповідно;

$x_1, x_2, x_3$  - реактивні опори обмоток;

$L_1, L_2, L_3$  - індуктивності обмоток вищої наруги, напівобмоток 2 та 3 нижчої наруги, відповідно;

$M_{12}, M_{13}, M_{23}$  - взаємна індуктивність пари обмоток.

Розкладемо обидві частини рівнянь (2.6) та (2.7) на симетричні складові і одержимо:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = -\dot{E}_{A1} - \dot{E}_{A2} - \dot{E}_{A0} + \dot{I}_{A1} \cdot z_1 + \dot{I}_{A2} \cdot z_1 ; \quad (2.9)$$

$$\dot{U}_{a2} = \dot{U}_{a21} + \dot{U}_{a22} + \dot{U}_{a0} = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} - \dot{I}_{a21} \cdot z_2 - \dot{I}_{a22} \cdot z_2 - \dot{I}_{a20} \cdot z_2 ; \quad (2.10)$$

$$\dot{U}_{a3} = \dot{U}_{a31} + \dot{U}_{a32} = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{A2} + \dot{E}_{A0} - \dot{I}_{a31} \cdot z_3 - \dot{I}_{a32} \cdot z_3 - \dot{I}_{a30} \cdot z_3 , \quad (2.11)$$

де  $\dot{U}_{a21}, \dot{U}_{a31}$  - напруга прямої послідовності напівобмоток  $a_2$  і  $a_3$  відповідно;

$\dot{U}_{a22}, \dot{U}_{a32}$  - напруга зворотної послідовності напівобмоток  $a_2$  і  $a_3$  відповідно;

$\dot{E}_{A1}, \dot{E}_{A2}, \dot{E}_{A0}$  - ЕРС прямої, зворотної та нульової послідовностей фази А;

$\dot{I}_{a21}, \dot{I}_{a31}$  - струми прямої послідовності напівобмоток  $a_2$  і  $a_3$  відповідно;

$\dot{I}_{a22}, \dot{I}_{a32}$  - струми зворотної послідовності напівобмоток  $a_2$  і  $a_3$  відповідно;

$\dot{I}_{a20}, \dot{I}_{a30}$  - струми нульової послідовності напівобмоток  $a_2$  і  $a_3$  відповідно.

Із виразу (2.9) випливає:

$$\dot{U}'_A = -\dot{E}'_A + \dot{I}'_A \cdot z_1 ; \quad (2.12)$$

$$\dot{U}'_{A0} = -\dot{E}'_{A0} , \quad (2.13)$$

де  $\dot{E}'_A$  - сума ЕРС прямої та зворотної послідовностей обмотки вищої наруги фази А.

Із виразу (2.10) одержимо:

$$\dot{U}''_{a2} = \dot{E}'_A - \dot{I}''_{a2} \cdot z_2 ; \quad (2.14)$$

$$\dot{U}_{a20} = 0 = \dot{E}'_{A0} - \dot{I}''_{a20} \cdot z_2 , \quad (2.15)$$

де  $\dot{U}''_{a2}$  - сума напруг прямої і зворотної послідовності напівобмотки  $a_2$  ;

$\dot{I}''_{a2}$  - сума струмів прямої і зворотної послідовності напівобмотки  $a_2$  ;

$\dot{U}_{a20}$  - напруга нульової послідовності напівобмотки  $a_2$  .

Із виразу (2.11) одержимо:

$$\dot{U}''_{a3} = \dot{E}'_A - \dot{I}''_{a3} \cdot z_3 ; \quad (2.16)$$



$$\dot{U}_{a30} = 0 = \dot{E}_{A0} - \dot{I}_{a30} \cdot z_2, \quad (2.17)$$

де  $\dot{U}_{a3}''$  - сума напруг прямої і зворотної послідовності напівобмотки  $a_3$  ;

$\dot{I}_{a3}''$  - сума струмів прямої і зворотної послідовності напівобмотки  $a_3$  ;

$\dot{U}_{a30}$  - напруга нульової послідовності напівобмотки  $a_3$  .

На підставі виразів (2.12), (2.14), (2.16) складено схема заміщення трансформатора для струмів прямої і зворотної послідовностей, яка представлена на рис. 2.2.а. На підставі виразів (2.13), (2.15), (2.17) складено схема заміщення трансформатора для струмів прямої і зворотної послідовностей, яка представлена на рис. 2.2.б. Стрілками на схемі показані додатні напрямки струмів напруг та ЕРС.

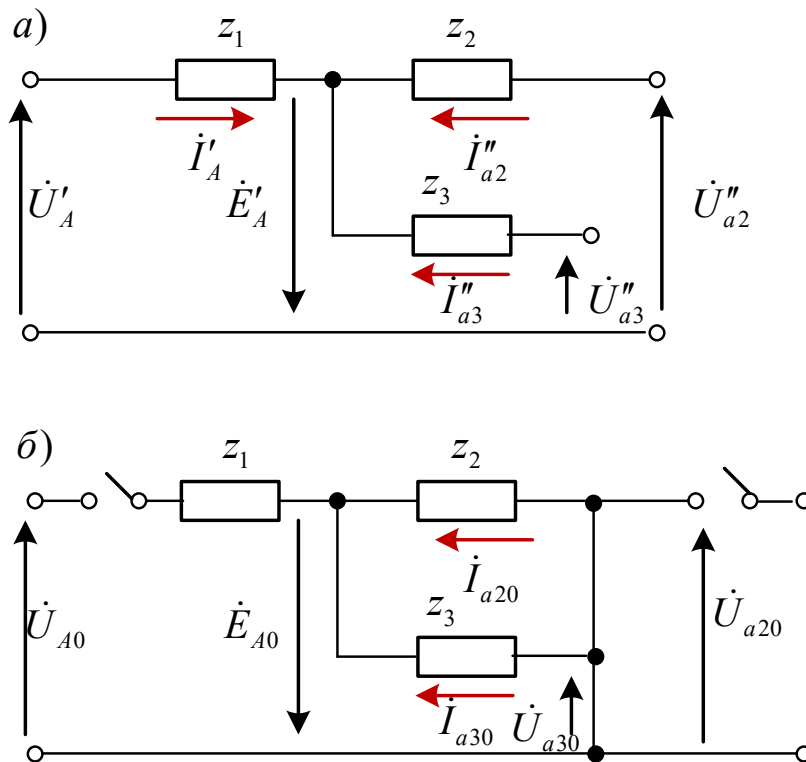


Рисунок 2.2 - Схеми заміщення трансформатора  $Y/\Delta$  з зигзагом:

- а) схема заміщення для струмів прямої та зворотно послідовностей; б)  
схема заміщення для струмів нульової послідовності

На підставі схеми заміщення трансформатора для струмів прямої та зворотної послідовностей (рис.2.2,а) буде справедливим наступний взаємозв'язок між первинними і вторинними напругами прямої та зворотної послідовностей:

$$\dot{U}'_A - \dot{I}'_A \cdot z_1 + \dot{I}''_{a2} \cdot z_2 = \dot{U}''_{a2}; \quad (2.18)$$

$$\dot{U}'_A - \dot{I}'_A \cdot z_1 + \dot{I}''_{a3} \cdot z_3 = \dot{U}''_{a3}. \quad (2.19)$$

Для складових нульової послідовності (рис.1. 2,б) одержим:

$$\dot{U}_{A0} + \dot{I}_{a20} \cdot z_2 = \dot{U}_{a20}; \quad (2.20)$$

$$\dot{U}_{A0} + \dot{I}_{a30} \cdot z_3 = \dot{U}_{a30}. \quad (2.21)$$

Обмотки трансформатора виконані таким чином, що струми нульової послідовності обтікають напівфази вторинних обмоток, розміщених на кожному зі стрижнів магнітопроводу, у протилежних напрямках. Сума магніторушійних сил, створюваних цими струмами, за умови симетричного виконання напівфаз, що дорівнює нулю. Тобто, магнітні потоки нульової послідовності в кожному зі стрижнів магнітопроводу дорівнюватимуть нулю:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_{a0} &= \dot{\Phi}_{a20} + \dot{\Phi}_{a30} \cdot e^{j180^\circ} = 0; \\ \dot{\Phi}_{b0} &= \dot{\Phi}_{b20} + \dot{\Phi}_{b30} \cdot e^{j180^\circ} = 0; \\ \dot{\Phi}_{c0} &= \dot{\Phi}_{c20} + \dot{\Phi}_{c30} \cdot e^{j180^\circ} = 0, \end{aligned} \quad (2.22)$$

де  $\dot{\Phi}_{a0}, \dot{\Phi}_{b0}, \dot{\Phi}_{c0}$  - магнітні потоки нульової послідовності в стрижнях магнітопроводу трансформатора фази а, в, с відповідно;

$\dot{\Phi}_{a20}, \dot{\Phi}_{b20}, \dot{\Phi}_{c20}$  - магнітні потоки нульової послідовності в стрижнях магнітопроводу, які створюються струмами нульової послідовності напівобмотками  $a_2, b_2, c_2$  відповідно;

$\dot{\Phi}_{a30}, \dot{\Phi}_{b30}, \dot{\Phi}_{c30}$  - магнітні потоки нульової послідовності в стрижнях магнітопроводу, які створюються струмами нульової послідовності напівобмотками  $a_3, b_3, c_3$  відповідно.

Отже, ЕРС, створювані потоками нульової послідовності в обмотках трансформатора, також дорівнюватимуть нулю:

$$\dot{E}_{A0} = 0; \dot{E}_{B0} = 0; \dot{E}_{C0} = 0. \quad (2.23)$$

З урахуванням виразу (2.13) одержимо:

$$\dot{U}_{A0} = 0. \quad (2.24)$$

З урахуванням (2.15) одержимо:

$$-\dot{I}_{a20} \cdot z_2 = 0 ,$$

з відкиля

$$\dot{I}_{a20} = 0 . \quad (2.25)$$

З урахуванням (2.17) одержимо:

$$-\dot{I}_{a30} \cdot z_3 = 0 ,$$

з відкиля

$$\dot{I}_{a30} = 0 . \quad (2.26)$$

З виразу (2.24) випливає, що в фазну систему напруг первинної сторони трансформатор не генерує складових нульової послідовності, і ця система є врівноваженою. З виразу (2.25) і (2.26) випливає, що фазні струми вторинної обмотки трансформатора не містять складових нульової послідовності. Отже, система фазних струмів є врівноваженою, тобто:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0 . \quad (2.27)$$

## **2.2 Несиметричні режими роботи силових трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток Y/Y<sub>0</sub>**

Трифазні трансформатори зі схемами з'єднання обмоток Y/Y<sub>0</sub> зазвичай використовуються як трансформатори понижувальних підстанцій при живленні трифазних та однофазних споживачів і практично завжди працюють з тими чи іншими відхиленнями від симетрії. Ці відхилення зростають із зростанням потужності однофазних споживачів і виходять особливо більшими в аварійних несиметричних режимах. Несиметрична робота трансформаторів може бути пов'язана як з несиметрією підведеної напруги, так і несиметрією навантаження. Перша й друга причина призводить до несиметрії вторинної напруги трансформаторів, що позначається на якості електропостачання споживачів. Для самого трансформатора несиметрична робота може бути небезпечною щодо перевантаження окремих обмоток, а також надмірних підвищень фазних напруг та насичення магнітопроводу.

В інженерній практиці аналіз несиметричних режимів трифазних трансформаторів зазвичай проводиться на основі методу симетричних складових. Основною перевагою даного підходу є можливість використання схем заміщення наведеного трансформатора для струмів різних послідовностей та проведення розрахунків за допомогою простих аналітичних формул. При цьому аналіз багатьох несиметричних режимів може бути здійснений за параметрами трансформаторів, взятих із довідника. І хоча розрахунок несиметричних режимів трансформаторів методом симетричних складових застосовується досить давно [5, 8], деякі з режимів, що зустрічаються на практиці, розглянуті в технічній літературі недостатньо докладно. Це відноситься, перш за все, до режимів, що виникають при неповнофазних відключення або включення трансформаторів, а також при їх пофазній комутації.

Далі на основі методу симетричних складових розглянуті несиметричні та неповнофазні режими роботи трифазних трансформаторів при з'єднанні обмоток за схемою  $Y/Y_0$ .

При дослідженні несиметричних режимів, як і в [5, 6], вважатимемо, що кількість витків первинної та вторинної обмоток однаково, т. б. коефіцієнт трансформації фазних напруг дорівнює одиниці. Це порушує спільності міркувань, але дозволяє писати штрихів, відповідних наведеним величинам. Оскільки схема заміщення трансформатора однакова для струмів прямої та зворотної послідовностей, то при аналізі несиметричних режимів можна не розглядати окремо струми та напруги цих послідовностей, а брати їхню суму [5]. При з'єднанні обмоток трансформатора за схемою  $Y/Y_0$  (рис. 2.3) струми нульової послідовності можуть протікати лише у вторинній обмотці. При цьому фазні напруги та струми трансформатора можна представити в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{\dot{U}}_A + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_a &= \underline{\dot{U}}_a + \underline{U}_{a0}; \\ \underline{U}_B &= \underline{\dot{U}}_B + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_b &= \underline{\dot{U}}_b + \underline{U}_{A0}; \\ \underline{U}_C &= \underline{\dot{U}}_C + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_c &= \underline{\dot{U}}_c + \underline{U}_{A0}; \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{\dot{I}}_A; & \underline{I}_a &= \underline{\dot{I}}_a + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_B &= \underline{\dot{I}}_B; & \underline{I}_b &= \underline{\dot{I}}_b + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_C &= \underline{\dot{I}}_C; & \underline{I}_c &= \underline{\dot{I}}_c + \underline{I}_{a0}, \end{aligned}$$

де  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C, \underline{\dot{I}}_A, \underline{\dot{I}}_B, \underline{\dot{I}}_C$  – комплексні первинні фазні напруги та струми трансформатора прямої та зворотної послідовностей;

$\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c, \underline{\dot{I}}_a, \underline{\dot{I}}_b, \underline{\dot{I}}_c$  – комплексні вторинні фазні напруги та струми трансформатора прямої та зворотної послідовностей;  $\underline{U}_{A0}$  – комплексна первинна фазна напруга нульової послідовності;  $\underline{U}_{a0}, \underline{I}_{a0}$  – комплексні вторинні фазні напруги та струм нульової послідовності.

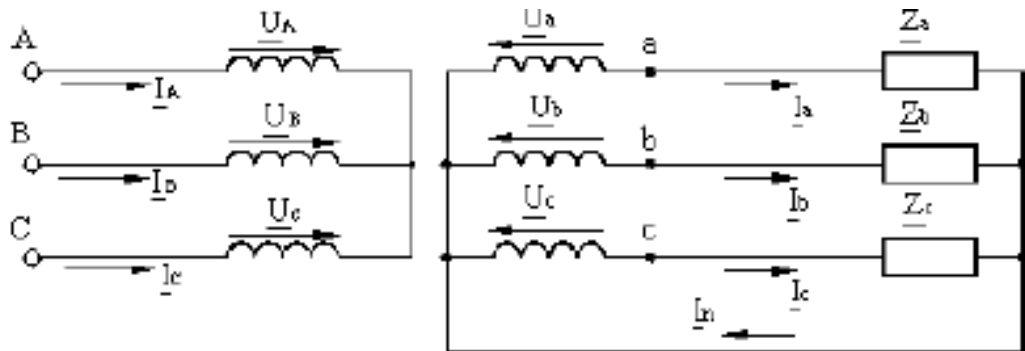


Рисунок 2.3.- Загальний випадок несиметричної роботи трансформатора зі статичним навантаженням

Оскільки опір намагнічуючої гілки  $\underline{Z}_m$  схеми заміщення для струмів прямої та зворотної послідовності набагато більше активних та індуктивних опорів розсіювання, то при розрахунках для цих послідовностей можна використовувати Г-подібну схему заміщення трансформатора (рис. 1.4), де  $\underline{Z}_k$  – опір короткого замикання. При цьому для струмів прямої і зворотної послідовностей струмами, що намагнічують, можна знехтувати і вважати, що

$$\underline{\dot{I}}_A = \underline{\dot{I}}_a; \quad \underline{\dot{I}}_B = \underline{\dot{I}}_b; \quad \underline{\dot{I}}_C = \underline{\dot{I}}_c. \quad (2.29)$$

Як відомо, опір намагнічує гілки  $\underline{Z}_{m0}$  у схемі заміщення нульової послідовності залежить від конструкції сердечника трансформатора. У групових та бронестрижневих трансформаторах  $\underline{Z}_{m0} \approx \underline{Z}_m$ , а в тристрижневих –  $\underline{Z}_{m0} \approx (7 \div 15) \underline{Z}_k$  та набагато менше  $\underline{Z}_m$ . В інженерних розрахунках струмів нульової послідовності може бути використана схема заміщення, наведена на

рис.2.4, при цьому величина  $Z_k$  повинна бути взята такою так само, як і в схемі на рис. 2.3 [5].

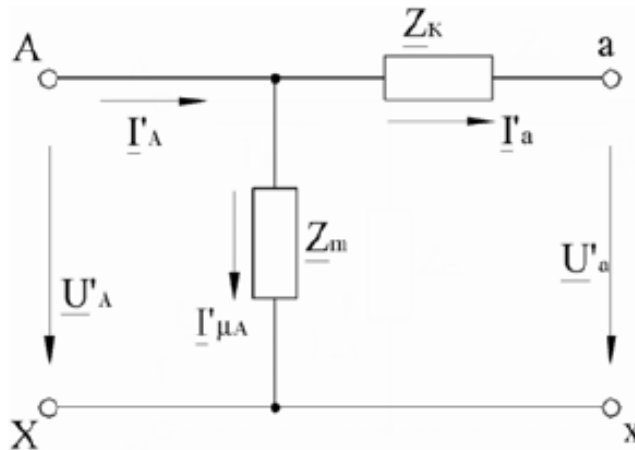


Рисунок 2.4 - Схема заміщення трансформатора для струмів прямої та зворотної послідовностей

Первинна та вторинна напруга нульової послідовності в даному випадку дорівнюватимуть між собою і можуть бути виражені через струм нульової послідовності за формулою

$$\underline{U}_{A0} \approx \underline{U}_{a0} \approx \underline{I}_{\mu 0} \cdot \underline{Z}_{m0} = -\underline{I}_{a0} \cdot \underline{Z}_{m0}. \quad (2.30)$$

**Повнофазна робота трансформатора при несиметричному статичному навантаженні.**

З обліком приєднаного статичного навантаження для вторинних фазних напруг будуть справедливі наступні рівняння (рис. 2.3):

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \dot{U}'_a + \underline{U}_{a0} = \dot{U}'_A - \dot{I}_a \cdot \underline{Z}_k - \underline{I}_{a0} \cdot \underline{Z}_{m0} = (\dot{I}_a + \underline{I}_{a0}) \cdot \underline{Z}_a; \\ \underline{U}_b &= \dot{U}'_b + \underline{U}_{a0} = \dot{U}'_B - \dot{I}_b \cdot \underline{Z}_k - \underline{I}_{a0} \cdot \underline{Z}_{m0} = (\dot{I}_b + \underline{I}_{a0}) \cdot \underline{Z}_b; \\ \underline{U}_c &= \dot{U}'_c + \underline{U}_{a0} = \dot{U}'_C - \dot{I}_c \cdot \underline{Z}_k - \underline{I}_{a0} \cdot \underline{Z}_{m0} = (\dot{I}_c + \underline{I}_{a0}) \cdot \underline{Z}_c. \end{aligned} \quad (2.31)$$

При з'єднанні первинної обмотки трансформатора за схемою Y вважатимуться відомими лінійні напруги  $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ , тоді первинні фазні напруги прямої та зворотної послідовностей  $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  визначаються за формулами [5]

$$\dot{U}'_A = \frac{1}{3}(\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}), \quad \dot{U}'_B = \frac{1}{3}(\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB}), \quad \dot{U}'_C = \frac{1}{3}(\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC}). \quad (2.32)$$

Згідно (2.32), при симетричних первинних лінійних напруг фазні напруги  $\underline{\dot{U}}_A, \underline{\dot{U}}_B, \underline{\dot{U}}_C$  є симетричною системою напруг прямої послідовності.

Перетворюючи (2.31), отримаємо у загальному вигляді систему рівнянь щодо невідомих струмів:

$$\underline{\dot{U}}_A = \underline{\dot{I}}_a \cdot \underline{Z}_A + \underline{I}_{a0} \cdot \underline{Z}_{a0}; \quad \underline{\dot{U}}_B = \underline{\dot{I}}_b \cdot \underline{Z}_B + \underline{I}_{a0} \cdot \underline{Z}_{b0}; \quad \underline{\dot{U}}_C = \underline{\dot{I}}_c \cdot \underline{Z}_C + \underline{I}_{a0} \underline{Z}_{c0}, \quad (2.33)$$

де

$$\begin{aligned} \underline{Z}_A &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_k; & \underline{Z}_B &= \underline{Z}_b + \underline{Z}_k; & \underline{Z}_C &= \underline{Z}_c + \underline{Z}_k; \\ \underline{Z}_{a0} &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_{m0}; & \underline{Z}_{b0} &= \underline{Z}_b + \underline{Z}_{m0}; & \underline{Z}_{c0} &= \underline{Z}_c + \underline{Z}_{m0}. \end{aligned}$$

Із рішення (2.32) випливає:

$$\underline{\dot{I}}_a = \underline{I}_A = \frac{\underline{\dot{\Delta}}_a}{\Delta_2}; \quad \underline{\dot{I}}_b = \underline{I}_B = \frac{\underline{\dot{\Delta}}_b}{\Delta_2}; \quad \underline{\dot{I}}_c = \underline{I}_C = \frac{\underline{\dot{\Delta}}_c}{\Delta_2}; \quad \underline{I}_{a0} = \frac{\underline{\Delta}_0}{\Delta_2}, \quad (2.34)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \underline{Z}_A \underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_A \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_C \underline{Z}_{a0}; \\ \underline{\dot{\Delta}}_a &= \underline{\dot{U}}_A (\underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0}) - \underline{\dot{U}}_B \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} - \underline{\dot{U}}_C \underline{Z}_B \underline{Z}_{a0}; \\ \underline{\dot{\Delta}}_b &= \underline{\dot{U}}_B (\underline{Z}_A \underline{Z}_{c0} + \underline{Z}_C \underline{Z}_{a0}) - \underline{\dot{U}}_A \underline{Z}_C \underline{Z}_{b0} - \underline{\dot{U}}_C \underline{Z}_A \underline{Z}_{b0}; \\ \underline{\dot{\Delta}}_c &= \underline{\dot{U}}_C (\underline{Z}_A \underline{Z}_{b0} + \underline{Z}_B \underline{Z}_{a0}) - \underline{\dot{U}}_A \underline{Z}_B \underline{Z}_{c0} - \underline{\dot{U}}_B \underline{Z}_A \underline{Z}_{c0}; \\ \underline{\Delta}_0 &= \underline{\dot{U}}_A \underline{Z}_B \underline{Z}_C - \underline{\dot{U}}_B \underline{Z}_C \underline{Z}_A - \underline{\dot{U}}_C \underline{Z}_B \underline{Z}_A. \end{aligned}$$

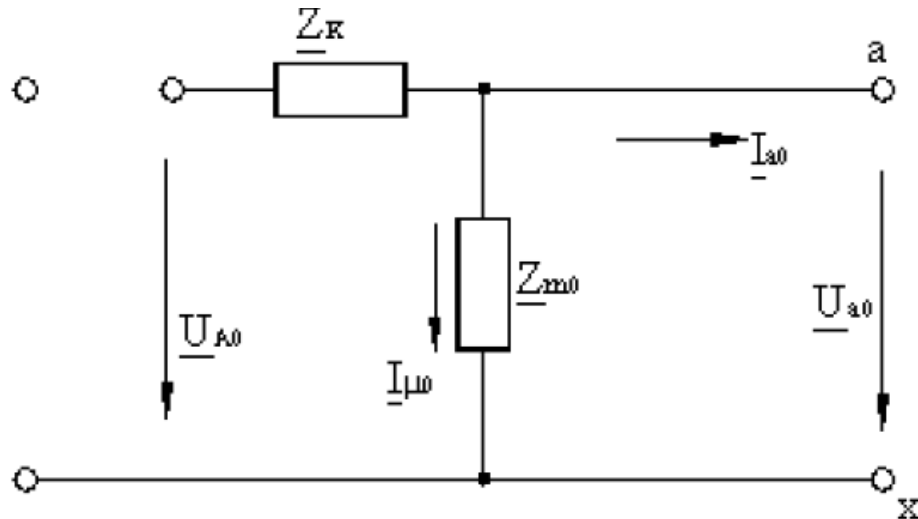


Рисунок 2.5 - Схема заміщення трансформатора для струмів нульової послідовності

У разі групового чи бронестрижневого трансформатора, у якого  $\underline{Z}_{m0} \approx \underline{Z}_m$  і набагато більше опорів  $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$  (2.34) слідує:

$$\underline{I}_{a0} \approx 0;$$

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{A0} = \underline{U}_{a0} &\approx \frac{\dot{U}_A \underline{Z}_B \underline{Z}_C + \dot{U}_B \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \dot{U}_C \underline{Z}_B \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C} ; \\
I_a &\approx \frac{\dot{U}_A (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) - \dot{U}_B \underline{Z}_C - \dot{U}_C \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C} ; \\
I_b &\approx \frac{\dot{U}_B (\underline{Z}_A + \underline{Z}_C) - \dot{U}_A \underline{Z}_C - \dot{U}_C \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C} ; \\
I_c &\approx \frac{\dot{U}_C (\underline{Z}_B + \underline{Z}_A) - \dot{U}_A \underline{Z}_B - \dot{U}_B \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_B \underline{Z}_C} .
\end{aligned} \tag{2.35}$$

Таким чином, цей випадок аналогічний несиметричній роботі трансформатора при обриві нейтрального проводу, при цьому величина  $\underline{U}_{a0}$  приблизно дорівнює напрузі усунення нейтралі  $\underline{U}_n$ .

У випадку тристержневого трансформатора, працюючого в режимі, близькому до холостого ходу, у якого опори  $\underline{Z}_{m0}$  і  $\underline{Z}_\kappa$  набагато менше опорів навантаження  $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$  будемо мати:

$$\underline{U}_{a0} \approx 0 ; \quad I_a \approx \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} ; \quad I_b \approx \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} ; \quad I_c \approx \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} . \tag{2.36}$$

Згідно (2.36), в даному випадку, незважаючи на наявність неврівноважених струмів нульової послідовності у вторинній обмотці, фазна напруга трансформатора і приймача при симетрії лінійних напруг і несиметричного навантаження залишаються практично симетричними.

З наведених вище співвідношень випливає, що в групових і бронестрижневих трансформаторах з'єднання обмоток  $Y/Y_0$  сильне спотворення системи фазних напруг трансформатора і приймача виникає вже при незначних за значенням струмах нульової послідовності. Тому з'єднання  $Y/Y_0$  таких трансформаторів зазвичай не застосовується. У тристрижневих трансформаторів зі з'єднанням обмоток  $Y/Y_0$  спотворення системи фазної напруги за наявності струмів нульової послідовності набагато менше, оскільки  $\underline{Z}_{m0} \ll \underline{Z}_m$ . У нашій країні такі трансформатори випускаються потужністю до 6000 кВА, причому потрібно, щоб струм у нульовому проводі не перевищував



25 % номінального струму [7]. Тоді струм нульової послідовності не буде перевищувати  $25 : 3 = 8,3$  % номінального струму.

### **Вимкнення (обрив) лінійного проводу А із боку живлення.**

В даному режимі до трансформатору буде підводитися однофазна лінійна напруга  $\underline{U}_{BC}$ . При цьому

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{a0}; \quad \underline{I}_B - \underline{I}_b = -\underline{I}_C = -\underline{I}_c. \quad (2.37)$$

Лінійну напругу  $\underline{U}_{BC}$  можна виразити через вторинні фазні напруги та струми навантаження:

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{U}_b + \underline{I}_b \cdot \underline{Z}_k - \underline{U}_c - \underline{I}_c \cdot \underline{Z}_k = \underline{U}_{bc} + 2\underline{I}_b \cdot \underline{Z}_k. \quad (2.38)$$

З урахуванням приєднаного навантаження вторинну лінійну напругу  $\underline{U}_{bc}$  можна подати у вигляді

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = (\underline{I}_b + \underline{I}_{a0}) \cdot \underline{Z}_b - (\underline{I}_c + \underline{I}_{a0}) \cdot \underline{Z}_c = \underline{I}_b \cdot (\underline{Z}_b + \underline{Z}_c) + \underline{I}_{a0} (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c). \quad (2.39)$$

Підставивши вираз (2.39) в (2.38) одержимо:

$$\underline{U}_{BC} = \underline{I}_b (\underline{Z}_b + \underline{Z}_c + \underline{Z}_k) - \underline{I}_{a0} (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c). \quad (2.40)$$

Для напругу нульової послідовності справедливе рівняння

$$\underline{U}_{a0} = \frac{1}{3} (\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c) = \frac{1}{3} (\underline{I}_b \underline{Z}_b + \underline{I}_a \underline{Z}_a + \underline{I}_c \underline{Z}_c). \quad (2.41)$$

Прирівнявши праві частини рівняння (2.41) та (2.28) та враховуючи (2.37) одержимо:

$$\underline{I}_{a0} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = (\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 3\underline{Z}_{m0}) + \underline{I}_b \cdot (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c) = 0. \quad (2.42)$$

Із спільного рішення (2.40) та (2.42) одержимо

$$\begin{aligned} \underline{I}_b = \underline{I}_c &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\Delta} (\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 3\underline{Z}_{m0}); \\ \underline{I}_{a0} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\Delta} (\underline{Z}_b - \underline{Z}_c), \end{aligned} \quad (2.43)$$

де

$$\Delta = \underline{Z}_a \underline{Z}_b + \underline{Z}_a \underline{Z}_c + 4\underline{Z}_c \underline{Z}_b + 2\underline{Z}_k (\underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \underline{Z}_c) + 3\underline{Z}_{m0} (\underline{Z}_b + \underline{Z}_c + 2\underline{Z}_k).$$

### **Вимкнення (обрив) нейтралі вторинної обмотки.**

В даному режимі струми та напруги нульової послідовності у трансформаторі будуть відсутні, і аналіз цього режиму можна виконувати, не

розкладаючи струми та напруги фаз на симетричні складові. При цьому первинні фазні напруги

$$\underline{U}_A = \underline{\dot{U}}_A, \quad \underline{U}_B = \underline{\dot{U}}_B, \quad \underline{U}_C = \underline{\dot{U}}_C$$

пов'язані з лінійними напругами відношеннями (2.31).

При з'єднанні обмоток за схемою Y/Y будуть справедливі такі співвідношення:

$$\underline{U}_a = \underline{\dot{U}}_a = \underline{U}_A - \underline{I}_a \underline{Z}_k; \quad \underline{U}_b = \underline{\dot{U}}_b = \underline{U}_B - \underline{I}_b \underline{Z}_k; \quad \underline{U}_c = \underline{\dot{U}}_c = \underline{U}_C - \underline{I}_c \underline{Z}_k; \quad (2.44)$$

$$\underline{I}_A = \underline{\dot{I}}_A = \underline{I}_a = \underline{\dot{I}}_a; \quad \underline{I}_B = \underline{\dot{I}}_B = \underline{I}_b = \underline{\dot{I}}_b; \quad \underline{I}_C = \underline{\dot{I}}_C = \underline{I}_c = \underline{\dot{I}}_c. \quad (2.45)$$

Складемо рівняння для вторинного ланцюга (рис.2.3) відповідно до законів Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a - \underline{U}_b &= \underline{I}_a \cdot \underline{Z}_a - \underline{I}_b \cdot \underline{Z}_b; & \underline{U}_b - \underline{U}_c &= \underline{I}_b \cdot \underline{Z}_b - \underline{I}_c \cdot \underline{Z}_c; \\ \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c &= 0. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Виразимо вторинні фазні напруження трансформатора через первинні (2.44). Тоді рішення (2.46) щодо струмів матиме такий вигляд:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_A = \frac{\Delta_{a1}}{\Delta_1}; \quad \underline{I}_b = \frac{\Delta_{b1}}{\Delta_1}; \quad \underline{I}_c = \frac{\Delta_{c1}}{\Delta_1}, \quad (2.47)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \underline{Z}_A \underline{Z}_B + \underline{Z}_A \underline{Z}_C + \underline{Z}_C \underline{Z}_B; \\ \Delta_{a1} &= \underline{U}_A (\underline{Z}_B + \underline{Z}_C) - \underline{U}_B \underline{Z}_C - \underline{U}_C \underline{Z}_B; \\ \Delta_{b1} &= \underline{U}_B (\underline{Z}_A + \underline{Z}_C) - \underline{U}_A \underline{Z}_C - \underline{U}_C \underline{Z}_A; \\ \Delta_{c1} &= \underline{U}_C (\underline{Z}_A + \underline{Z}_B) - \underline{U}_A \underline{Z}_B - \underline{U}_B \underline{Z}_A; \\ \underline{Z}_A &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_k; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_b + \underline{Z}_k; \quad \underline{Z}_C = \underline{Z}_c + \underline{Z}_k. \end{aligned}$$

Вирази (2.47) дозволяють визначати фазні струми трансформатора при відомих первинних фазних напруг трикутника. Оскільки (2.47) не входить величина  $Z_{m0}$ , то ці вирази справедливі як для тристрижневих, так і для групових та бронестрижневих трансформаторів.

## Висновки по другому розділу

В результаті теоретичного аналізу отримано схеми заміщення трансформатора  $Y/\Delta$  із зигзагом для струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Доведено здатність трансформатора при несиметричному характері навантаження забезпечувати симетрію напруг на первинній та на вторинній сторонах внаслідок компенсації потоків нульової послідовності у стрижнях магнітопроводу. При цьому магнітна система трансформатора буде врівноваженою.

## ВИСНОВКИ

В результаті теоретичного аналізу отримано схеми заміщення трансформатора  $Y/\Delta$  із зигзагом та  $Y/Y_n$  для струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Проведений аналіз дозволив отримати вирази для визначення струмів та напруг первинної та вторинної сторін трансформатора, що доводять, що спотворення системи напруг обумовлено лише неоднаковою величиною падіння напруги в окремих фазах на опорах зворотної послідовності. Однак таке спотворення незначно і трансформатор може цілком успішно працювати на несиметричне навантаження, підтримуючи високий рівень якості напруги.

Визначено, що правильний вибір схеми з'єднання трансформаторів дуже важливий як для споживача, так і для організацій, що експлуатують, і енергетичної системи країни в цілому. Трансформатор  $Y/Z_n$  дозволяє жити потужних однофазних споживачів без погіршення якості електричної енергії та ризику аварії, а також значно знизити втрати електричної енергії, правильно вибрати захист трансформатора від однофазних коротких замикань, підвищити надійність електроустановки в цілому, збільшити резерв потужності за рахунок зниження додаткових втрат, що виникають у розподільчих трансформаторах.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 50160:2014. «ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗАГАЛЬНОЇ ПРИЗНАЧЕНОСТІ» (EN 50160:2010, IDT)
2. Будзько І.А. Електропостачання сільського господарства: Навчальний посібник для вузів/І.А. Будзько, Н.М.Зуль / За редакцією І.А. Будзько. - М: Агропромиздат, 1990. – 496 с.
3. Васютінський СБ. Питання теорії та розрахунку трансформаторів/СБ. Васютінський. - Л.: Енергія, 1970, 432 с/
4. Трифазний трансформатор: патент 2244 Респ. Білорусь, МКП7 Н01F 30/12 / А.П.Сердешков, Г.І. Янукович, Є.А.Сердешнов, Д.Г. Янукович; заявник УО БДАТУ, -№950299; заявл. 09.06. 95; опубл. 30.09.98// Афційни бюл. / Нац. центр штеллектуал. Власності.-1998-№3 (18).-С.216-217.
5. Петров Г.М. Трансформатори. - М.: ОНТІ, 1994.
6. Васютінський С.Б. Питання теорії та розрахунку трансформаторів. - Л.: Енергія, 1970.
7. Вольдек А.І. Електричні машини: Підручник для вишів. - Л.: Енергія, 1974.
8. Мартинов В.А. Розрахунок неповнофазних режимів роботи трифазни трансформаторів// Електрика. -2003. - № 9. - С. 54-61; № 10. - С. 17-24.
9. П.М. Тихомиров. Розрахунок трансформаторів. Вид. П'яте. Москва енергоатоміздат, 1986 р.
10. Безсонов Л.А. Теоретичні основи електротехніки: Електричні ланцюги. Підручник для студентів електротехнічних, енергетичних та приладобудівних спеціальностей вишів. -9-е вид., Перероб. та дод. - М.: Вищ. шк., 1996. - 623с.
11. ГОСТ 52719-2007. Трансформатори силові. Загальні технічні умови
12. Журнал «Новини електротехніки» №4 (52) 2008, «СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ 10(6)/0,4 КВ. ОБЛАСТИ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ СХЕМ СПОЛУКИ ОБМОТОК».