

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ ВИПРОБОВУВАНЬ ТРАНСФОРМАТОРА РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ ЗІ З’ЄДНАННЯМ ОБМОТКИ ВН ЗА СХЕМОЮ “ЗІРКА”

© Олійник М.Й., Никонець О.Л., Ліщак І.В., Мальцева Н.Г., 2010

Дослідженнями перенапруг на головній і поздовжній ізоляції на прикладі силового трансформатора напругою 20 кВ зі з’єднанням обмотки вищої напруги за схемою “зірка” на математичній моделі виявлено, що ізоляція трансформаторів, випробувана стандартними імпульсами напруги, не гарантує їх надійної роботи в експлуатаційних умовах. Показано, що норми випробувальних імпульсів для таких трансформаторів потрібно скоректувати за амплітудою і тривалістю.

**Results of overvoltage investigations on main and internal of power transformer with "star" HV winding connection and rated voltage 20 kV carried out by mathematical model have proved that the insulations tested by standard voltage surges do not guarantee its reliable operation. It is shown that the standards for test surges must be corrected with respect to magnitude and duration.**

### Постановка проблеми

Досвід експлуатації трансформаторів в розподільчих мережах 10/0,4 кВ [1] свідчить, що 55,2 % пошкоджень виникають у поздовжній (витковій) ізоляції як за дії внутрішніх, так і за дії імпульсних (атмосферних) перенапруг. Між традиційними науковими підходами до обґрунтування необхідного рівня ізоляції трансформаторів, які узагальнені в чинній нормативній базі [2–4], та досвідом їх експлуатації існує суперечність, яка полягає в неможливості пояснити причини масового пошкодження виткової ізоляції обмоток під дією внутрішніх перенапруг з боку мережі. Досвід показує, що з сукупності пошкоджень лише 15,6% припадає на головну ізоляцію [1].

З наведеного можна зробити висновок, що виткова ізоляція трансформаторів – це найслабша ланка, яка обумовлює необхідність поглибленого вивчення взаємозв’язків між електричними процесами в ізоляції та електромагнітними процесами в обмотках трансформатора.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У [5] синтезована математична модель трифазного трансформатора 20/0,4 кВ потужністю 20 кВ·А, яка адекватно відтворює перехідні електромагнітні процеси в реальному трансформаторі за дії внутрішніх перенапруг з різними частотами вільної складової. За допомогою моделі досліджено вплив частоти вільної складової внутрішніх перенапруг на характер електромагнітних процесів у поздовжній (витковій) і головній ізоляції трансформатора. Доведено, що для кожного з можливих розрахункових режимів існує діапазон небезпечних частот, за яких на елементи ізоляції діють перенапруги, величина яких перевищує допустимі значення. Досліджені внутрішні перенапруги, що діють на поздовжню і головну ізоляцію трансформатора за умови збігу частот вільної складової перенапруг мережі з резонансними частотами трансформатора для розрахункового режиму. Показано, що значення перенапруг на поздовжній ізоляції можуть перевищувати допустимі, а явище внутрішнього резонансу – основна причина пошкодження трансформаторів в експлуатації.

Залишились не з’ясованими причини пошкодження поздовжньої (виткової) ізоляції за дії імпульсних перенапруг.

### Задача досліджень

За допомогою створеної у [5] математичної моделі проаналізувати достатність нормованих чинними нормативними документами [2] імпульсних випробовувань для трансформатора зі схемою з'єднання обмоток “зірка–зірка” з повною ізоляцією нейтралі обмотки ВН за наявності і відсутності нейтрального виводу.

### Виклад основного матеріалу досліджень

Модель трансформатора для дослідження внутрішніх перенапруг була синтезована на базі отриманих на реальному об'єкті частотних характеристик трансформатора в діапазоні 20 Гц – 150 кГц. Період коливань синусоїди з частотою 150 кГц становить 6,7 мкс, тобто співмірний з тривалістю можливих (зокрема стандартних) імпульсних дій. Отже, синтезована модель дає змогу отримати достовірні кількісні характеристики впливу на елементи ізоляції не тільки внутрішніх, але й імпульсних перенапруг мережі.

Згідно з [2] внутрішня ізоляція відносно «землі» та між фазами досліджуваного трансформатора класу напруги 20 кВ, повинна витримувати прикладені до кожного лінійного виводу по черзі напругу повного імпульсу величиною 125 кВ та зрізаного імпульсу 150 кВ. Окрім наведених вище дій для трансформаторів з виведеною нейтраллю обмотки ВН тим самим діям необхідно піддавати ізоляцію нейтралі. Якщо нейтраль обмотки ВН не виведена, то внутрішня ізоляція трансформатора напругою 20 і 35 кВ додатково повинна витримати напругу повного грозового імпульсу 105 і 140 кВ відповідно, прикладену до трьох електрично з'єднаних між собою лінійних виводів. Під час додаткових випробувань внутрішньої ізоляції трансформаторів номінальною напругою 3–15 кВ без нейтрального виводу значення напруги випробувального імпульсу не зменшують.

Ізоляція обмоток НН з номінальною напругою нижче ніж 3 кВ повинна випробовуватися лише однохвилинною змінною напругою промислової частоти [2].

Під час випробовувань трансформатора без виводу нейтралі обмотки ВН імпульсна напруга прикладається до одного з виводів обмотки [3], а решту виводів обмотки ВН уземлюють (рис. 1, *a-1*).

Значення перенапруг в обмотці ВН трансформатора під час випробовування залежать також від схеми з'єднань обмоток НН [3]. За твердженням [3] найбільші перенапруги в обмотках ВН виникають тоді, коли обмотки НН замкнуті накоротко та уземлені. Така схема з'єднань обмоток НН загальноприйнята за імпульсних випробувань обмоток ВН. Приєднання кабельних ліній до виводів обмотки НН стосовно впливу на перенапруги в обмотці ВН трансформатора еквівалентне уземленню виводів НН [3].

Варто зауважити, що умови роботи трансформаторів з виведеною нейтраллю обмотки ВН під час експлуатації нічим не відрізняються від умов роботи трансформаторів, у яких нейтраль не виведена. Однак умови імпульсних випробувань за [2] відрізняються радикально. У випадку трансформатора з виведеною нейтраллю обмотки ВН, встановленим у [2], імпульсним діям підлягає кожний з виводів обмотки ВН та кожна з обмоток ВН окремо (рис. 1, *б-1*).

Для трансформатора без виведеної нейтралі обмотки ВН встановленим у [2] діям підлягають комбінації послідовно та паралельно з'єднаних обмоток ВН (рис. 1, *a-1*), що значно зменшує значення випробувальної напруги на кожній фазі обмотки ВН.

На думку розробників [2] та автора [3], цей недолік має бути скомпенсований застосуванням схеми рис. 1, *a-2*. У мережах 6–35 кВ перенапруги з амплітудою, що дорівнює чи співмірна з розрахунковою, можуть виникати одночасно на виводах трьох фаз. За даними [3] дія хвилі одночасно на три фази обумовлює значно більші коливання потенціалу нейтралі порівняно з дією хвилі такої самої амплітуди на одну фазу. Потенціал нейтралі може значно перевищити амплітуду хвилі, що одночасно діє на три фази обмотки ВН.

З врахуванням вище наведеного огляду нормативної бази [2] та коментарів до неї [3], проаналізуємо процеси, що відбуваються в конкретному трансформаторі, за дії на нього стандартних імпульсних хвиль перенапруги. Під час досліджень використана модель трансформатора, обґрунтована у [5]. Дослідження проведені з використанням цифрового комплексу RE [6]. На рис. 2 наведені цифрові напруги на елементах ізоляції трансформатора за дії повної стандартної хвилі на з'єднанні

між собою виводи обмоток фаз А, В і С (рис. 2, а). Лінійні виводи обмотки НН трансформатора не закорочені. На фронті стандартної хвилі напруга розподілилася між головною ізоляцією нейтралі і поздовжньою ізоляцією обмоток ВН у співвідношенні 68 та 32 %.

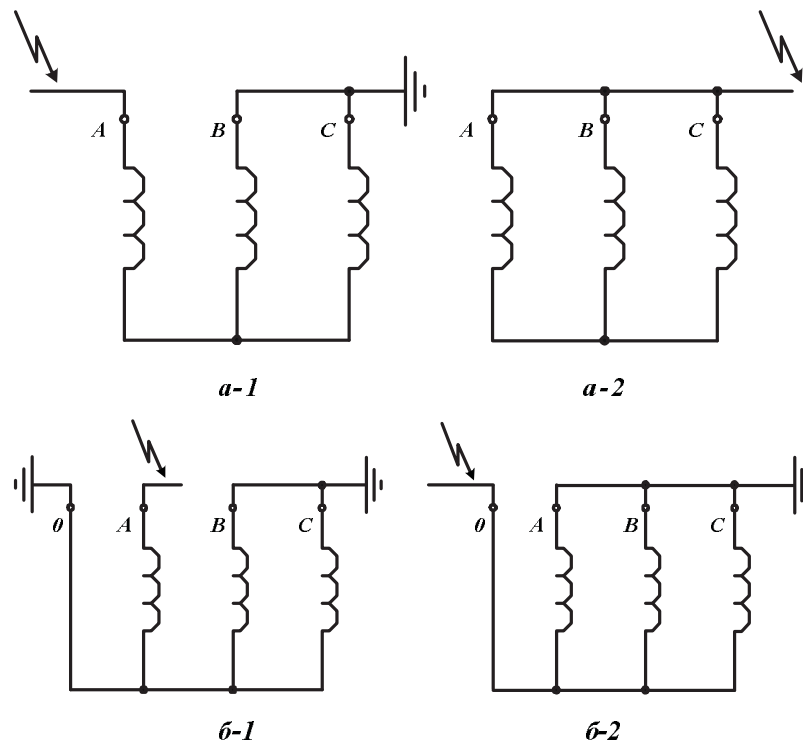


Рис. 1. Схема з'єднання обмотки ВН трансформатора під час імпульсних випробувань: а – трифазного трансформатора без виводу нейтралі; б – трифазного трансформатора з виведеною нейтраллю обмотки ВН

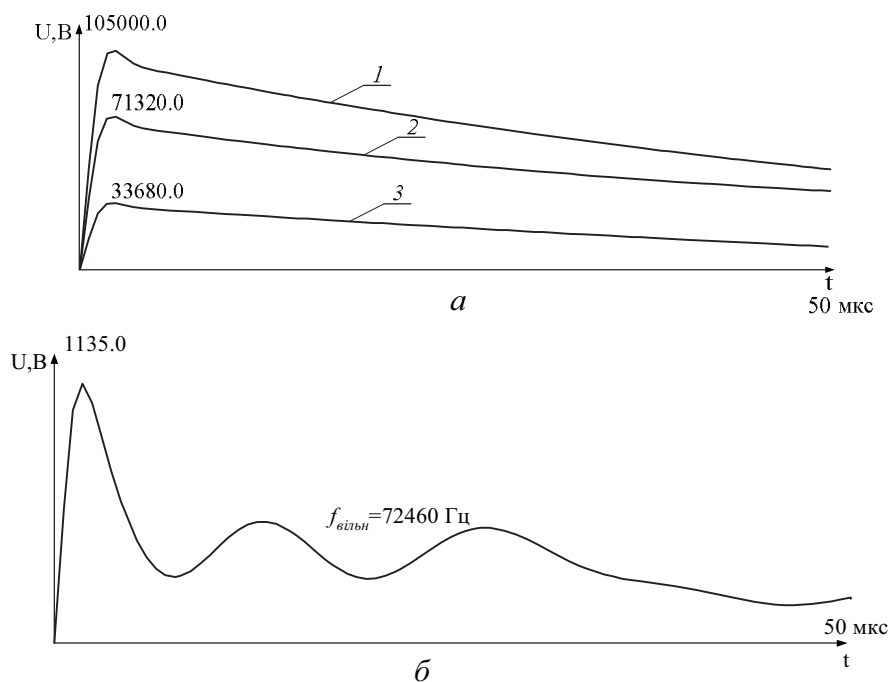


Рис. 2. Напруга на елементах ізоляції трансформатора без виводу нейтралі обмотки ВН під час його імпульсних випробувань повною хвилею, що подається на з'єднанні між собою лінійні виводи фаз А, В і С: а) 1 – напруга імпульсу; 2 – напруга в нейтралі обмотки ВН; 3 – напруга на обмотках ВН; б) – напруга на розімкнених лінійних виводах обмотки НН

Напруга на обмотках НН в 3,5 раза перевищила номінальне значення, хоча напруга на обмотках ВН перевищила номінальне значення тільки в два рази. Протягом 50 мкс дії випробувального імпульсу на обмотках ВН та у нейтралі напруги поступово зменшуються, а в напрузі обмоток НН на загасаючу аперіодичну складову накладається змінна напруг з частотою вільних коливань 72460 Гц (рис. 2, б).

Після загасання прикладеної повної хвилі коливні перехідні процеси в трансформаторі продовжуються (рис. 3). На вільний коливний процес в обмотках НН з частотою 72460 Гц накладається інший перехідний процес з частотою коливань 1590 Гц, який охоплює всі обмотки та головну ізоляцію нейтралі трансформатора, а амплітуди напруг на елементах ізоляції приблизно дорівнюють амплітудам номінальних напруг.

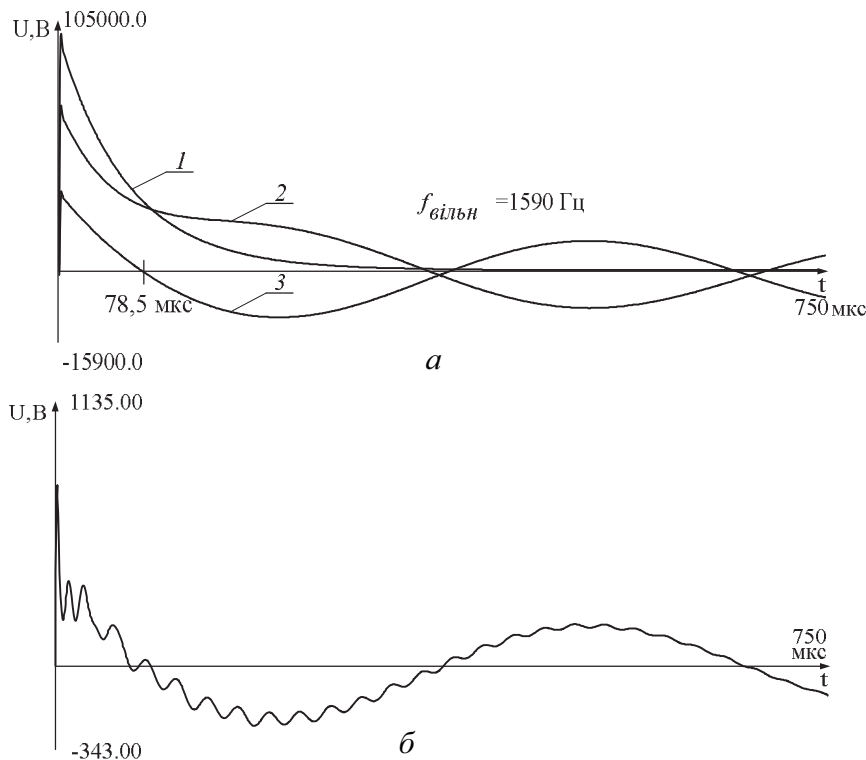


Рис. 3. Напруга на елементах ізоляції трансформатора без виводу нейтралі обмотки ВН під час його імпульсних випробувань повною хвилею, що подається на з'єднанні між собою лінійні виводи фаз А, В, С: а) 1 – напруга імпульсу; 2 – напруга в нейтралі обмотки ВН; 3 – напруга на обмотках ВН; б) – напруга на розімкнених лінійних виводах обмотки НН

Після зниження напруги прикладеного стандартного імпульсу практично до нуля, вільні складові напруги на головній ізоляції нейтралі і обмоток ВН майже однакові та коливаються у протифазі, що можливе за наявності резонансних явищ у електромагнітній системі трансформатора. Внаслідок цього змінюються швидкості зниження напруг на поздовжній і головній ізоляції трансформатора. У момент зниження напруги на обмотках ВН до нуля (час 78,5 мкс), напруга у нейтралі (на головній ізоляції нейтралі) дорівнює напрузі випробувального імпульсу (близько 27,55 кВ).

На рис. 4 наведені результати математичного експерименту для випадку, коли лінійні виводи трьох фаз обмотки НН електрично з'єднані між собою і уземлені, що відповідає умовам типових випробувань. У цьому разі частота вільних коливань дорівнює 5100 Гц, тобто збільшилася порівняно з частотою таких коливань у разі розімкнених виводів цієї обмотки. Амплітуда перенапруг на обмотках ВН на початковій стадії перехідного процесу в два рази перевищує амплітуду номінальної напруги обмоток ВН. Передбачуваного збільшення потенціалу нейтралі обмотки ВН до значень, що перевищують амплітуду стандартного імпульсу в експерименті не відбулося. Але з рис. 4 (крива 2) бачимо, що в момент часу  $t=62,8$  мкс його значення (59470 В) в 1,5 ра-

за перевищує значення напруги прикладеного стандартного імпульсу (40940 В). Протягом зазначеного часу дії випробувального імпульсу значення прикладеної напруги істотно зменшилося (з 105 до 41 кВ), а потенціал нейтралі змінився мало (з 72 до 59,5 кВ). Швидкість зміни напруги обмотки ВН збільшилася порівняно з дослідом з розімкненими обмотками НН (перше зниження до нуля напруги обмотки ВН настає через 41,8 мкс). Поточний потенціал нейтралі залежить від зміни напруги на обмотках ВН. Чим швидше ця напруга знижується, тим у кожний момент часу більшим є значення потенціалу нейтралі і може перевищувати поточне значення напруги прикладеного випробувального імпульсу.

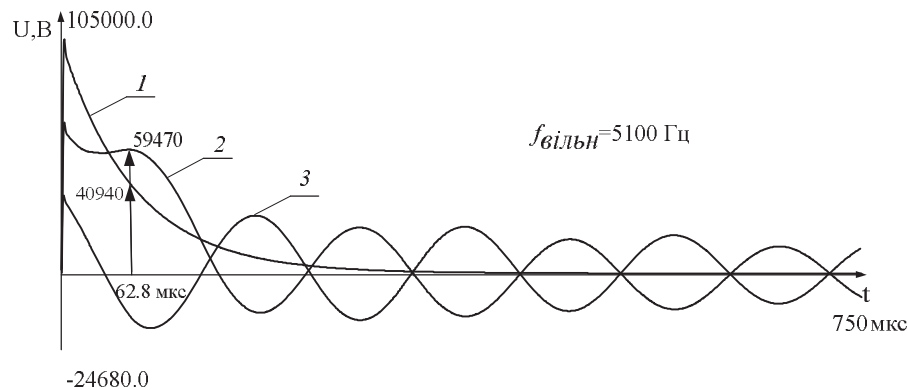


Рис. 4. Напруга на елементах ізоляції трансформатора без виводу нейтралі обмотки ВН під час його імпульсних випробувань повною хвилею, що подається на з'єднанні між собою лінійні виводи фаз А, В і С (обмотки НН закорочені):

1 – напруга імпульсу; 2 – напруга в нейтралі обмотки ВН; 3 – напруга на обмотках ВН

### Висновки

1. Режим роботи обмотки НН під час імпульсних випробувань трансформатора істотно впливає на умови роботи як головної, так і виткової (поздовжньої) ізоляції.
2. Напруга нейтралі під час випробування трансформатора стандартним імпульсом виявилася значно меншою від напруги прикладеного імпульсу, яка розподіляється між поздовжньою і головною ізоляціями трансформатора. Швидкість зміни напруги на поздовжній і головній ізоляції відрізняється від заданої швидкості зміни напруги прикладеного стандартного випробувального імпульсу.
3. Імпульсні випробування ізоляції трансформаторів зі з'єднанням обмотки ВН за схемою “зірка” без виведеної нейтралі за нормами стандарту не гарантують надійної їх експлуатації.
4. Норми випробувальних напруг для трансформаторів зі з'єднанням обмотки ВН за схемою “зірка” без виведеної нейтралі повинні бути скоректовані як за амплітудою імпульсної хвилі, так і її тривалістю.

Ахметшин Р.С., Рыбаков Л.М. Технические средства диагностирования силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на основе частотных характеристик // *Электричество*. – М.: 2005. – № 5. 2. ГОСТ 1516.3–96. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины, 1999. 3. Сапожников А.В.. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с. 4. ГОСТ 1516.2-97. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины. 1999. – 32 с. 5. Конторович Л.Н., Молнар М.М., Никонець О.Л. Математична модель трифазного трансформатора для частот вільної складової внутрішніх перенапруг мережі. // *Новини енергетики*. – 2010. – № 3. 6. Равлик О.М., Гречин Т.М., Іванюк В.С. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики (програма RE) // *Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка"*. – 1997. – № 340. – С. 96–101.