

УДК 621.3.014.7

**В.М. АМБРОЗ, М.В. БАЗИЛЕВИЧ, Н.І. МАГУРЧАК,  
І.О. САБАДАШ** (канд. техн. наук, доцент)  
Національний університет "Львівська політехніка"  
[Mike\\_398500@yahoo.com](mailto:Mike_398500@yahoo.com)

## ПОТУЖНІСТЬ, РОЗСІЮВАНА ТРАНСФОРМАТОРОМ НАПРУГИ ЗА ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ

*Досліджено процеси пов'язані з розсіянням активної потужності трансформаторами напруги за однофазних замикань на землю. Встановлено розподіл її по обмотках, вплив різних факторів та видів замикань на характеристики потужності розсіювання.*

**Ключові слова:** однофазне замикання на землю, мережі з ізольованою нейтраллю, трансформатор напруги, ферорезонансні процеси.

**Постановка проблеми.** Мережі 6÷35 кВ в Україні та в більшості країн колишнього Радянського Союзу експлуатуються з ізольованою/компенсованою нейтраллю. 60÷70% усіх пошкоджень в мережах 6÷35 кВ пов'язані з виникненням однофазних замикань на землю (ОЗЗ). Під час ОЗЗ часто пошкоджується трансформатор напруги. Як правило вважають, що причиною пошкодження є ферорезонансний процес. Цей аварійний режим не супроводжується появою надструмів, оскільки під час аварії протікає невеликий ємнісний струм, однак часто мають місце пошкодження ТН. Поясненням цього є факт, що за ферорезонансу між індуктивністю трансформатора та ємністю мережі активна потужність, яку розсіює ТН, перевищує допустиму і відбувається термічний перегрів ізоляції з наступним її руйнуванням. Таке явище характерне для мереж зі струмом замикання 1–4 А. Однак, відзначають, що вихід з ладу ТН має місце і в мережах, струм ОЗЗ яких відрізнявся від цих значень.

Поглиблення знань про особливості розподілу розсіюваної потужності за ОЗЗ можуть бути основою як удосконалення існуючих ТН, так і створення нових ТН.

**Аналіз останніх досліджень.** В літературі, посвяченій цій проблемі, в основному наводяться теоретичні міркування. Сама ж проблема не освітлена в повній мірі. Недостатньо відображено або відсутня інформація про потужності, що розсіюється та їх залежність від координат режиму та параметрів навантаження ТН. Тому в стандарті [1] вказано тільки, що трансформатор повинен витримувати без пошкодження протягом 8 годин напруги з кратністю 1,9. Не вказано, як потужність, що розсіюється, розподіляється по обмотках, і чи залежить вона від струму замикання на землю.

**Викладення основного матеріалу.** Поставлена задача вирішувалась шляхом математичного моделювання режимів та процесів із подальшим аналізом отриманих результатів. На рис. 1 представлена схема мережі, що підлягає математичному моделюванню. Дослідження координат режимів в мережі проводилось програмним комплексом RE [2], що дозволяє створення в автоматизованому режимі математичної моделі мережі та отримання характеристик координат як перехідних процесів, так і усталених режимів.

В моделі мережі лінії електропередач представлено ланцюгово сполученими Т-подібними комірками, що враховують активні та реактивні опори, міжфазні та фазні ємності на землю, а також опір ізоляції на землю, який представлено відповідним лінійним опором.

Трансформатор представлено активними та реактивними опорами обмоток. Враховується коефіцієнт трансформації трансформатора та нелінійність характеристики намагнічення магнітопроводу.

Навантаження представлено активно-реактивними опорами, що еквівалентують потужності.

Задачею досліджень є визначення потужності, яка буде розсіюватися в різних обмотках ТН за різних величин ємності мережі та навантаження трансформатора за різних видів ОЗЗ.

Для реалізації поставленої мети досліджувались координати наступних режимів і процесів:

- нормальний режим експлуатації зі зміною навантаження ТН;
- режим усталеного ОЗЗ за різних величин струмів замикання;
- процес дугового замикання.

Дослідження нормального експлуатаційного режиму проводились з метою встановлення споживаної ТН потужності. Для цього визначалась спожита потужність кожною обмоткою за зміни навантаження ТН в межах від 30 Ом до 10000 Ом, що відповідає його зміні від максимально допустимого навантаження до режиму практично неробочого ходу.

Миттєві значення розсіюваної потужності обмотки визначалися згідно:

$$P_{\text{роз}}(t) = R \cdot i(t)^2 \quad (1)$$

де R- активний опір обмотки, Ом;  $i(t)$  – миттєві значення струму, А.

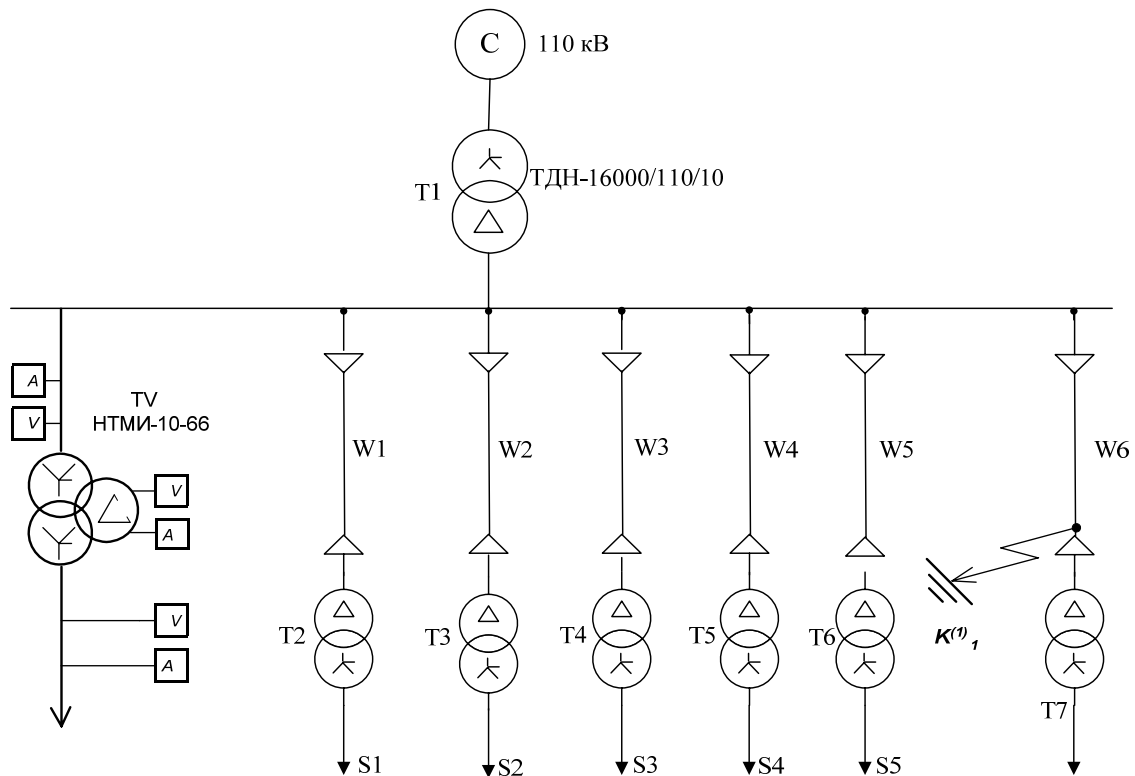


Рисунок 1 – Схема мережі.

В результаті отримано, що за зміни величини навантаження у вказаних межах, потужність розсіювання обмотками має наступні значення: одна обмотка вищої напруги розсіює потужність в межах  $1 \cdot 10^{-5} \pm 0,03$  Вт; одна обмотка сторони нижчої напруги розсіює потужність в межах  $1 \cdot 10^{-5} \pm 0,227$ . Це добре узгоджується з даними, описаними у [3].

За усталеного замикання на землю визначалися потужності розсіювання обмоток за зміни величини струму ОЗЗ від 1 до 20 А. Встановлено, що струм замикання на землю практично не впливає на потужності, які розсіюють обмотки. За зменшення опору навантаження від 10000 Ом до 30 Ом, потужність, що протікає обмоткою вищої напруги фази В збільшується від 158 Вт до 520 Вт, а фази С – від 46 Вт до 522 Вт. Потужність, що протікає основними обмотками нижчої напруги фази В збільшується від 10,5 до 337 Вт, а фази С – від 0,3 до 321 Вт. Потужність, що протікає обмотками, що ввімкнені в «розімкнутий трикутник» фази В змінюється в межах (4,6  $\div$  156 Вт, фази С – від 0,5 до 157 Вт. При цьому також зростають потужності, які розсіюють обмотки: для фази В обмотки вищої напруги ці значення знаходяться в межах від 27,4 Вт до 34,17 Вт, а фази С – від 29,5 Вт до 33 Вт. Для обмоток нижчої напруги розсіювана потужність буде для фази В змінюватися в межах від 0,005 до 3,3 Вт, а фази С – від 0,003 до 3,1 Вт. Потужність, яка розсіюється в обмотках, що зібрані в «розімкнутий трикутник» змінюється в межах 0,006  $\div$  3,7 Вт.

Як видно з наведених даних, розсіювана потужність не однаково розподіляється по обмотках ТН. Найбільшу потужність розсіюють обмотки сторони вищої напруги, а обмотки, що утворюють розімкнутий трикутник та нижчу сторону трансформатора, розсіюють значно менші потужності. Це суперечить описаним в літературі явищам перегріву обмоток трансформатора, за якого обмотки нижчої напруги нагріваються значно сильніше ніж обмотки вищої напруги [3]. А, як відомо, перегрів залежить від двох величин: потужності розсіювання обмотки і від величини теплового опору системи «обмотка – оточуюче середовище».

Також встановлено, що зміна величини навантаження має більший відносний вплив на потужність, яка розсіюється обмотками сторони нижчої напруги, ніж обмотками вищої. За зменшення навантаження з 60 до 30 Ом обмотки нижчої сторони збільшують розсіювану потужність з 0,8 до 3,2 Вт, обмотки «розімкнутого трикутника» збільшують розсіювану потужність з 1 Вт до 3,5 Вт а для обмоток вищої напруги ця потужність збільшується з 31,5 до 34 Вт. Навіть при ненавантаженому трансформаторі обмотки сторони вищої напруги розсіюють потужність порядку 29 Вт кожна. Тобто вплив нелінійної характеристики магнітної системи трансформатора необхідно враховувати навіть в режимі неробочого ходу.

На нашу думку, найцікавіші результати отримано за моделювання дугового замикання на землю. Виникнення дуги імітувалось, згідно гіпотези Н.Н. Белякова і Ч.М. Джуварли, зміною опору ізоляції на нульове значення в момент проходження напругою максимального значення. Одноразове спалахування та погасання

дуги відбувалося за гіпотезою [4]. Даний експеримент проводили за струму ОЗЗ 20 А та різних значень навантаження ТН.

Досліди проводили для різних значень сумарної потужності навантаження ТН. Цю потужність ми міняли за допомогою зміни навантаження трансформатора, відповідно 10000 Ом, 60 Ом, 30 Ом. Ця потужність задавалась для роботи ТН в режимі, близькому до неробочого ходу, роботі з класом точності 3 і в режимі граничної потужності відповідно.

На рис. 2 наведено графіки миттєвих активних потужностей обмоток.

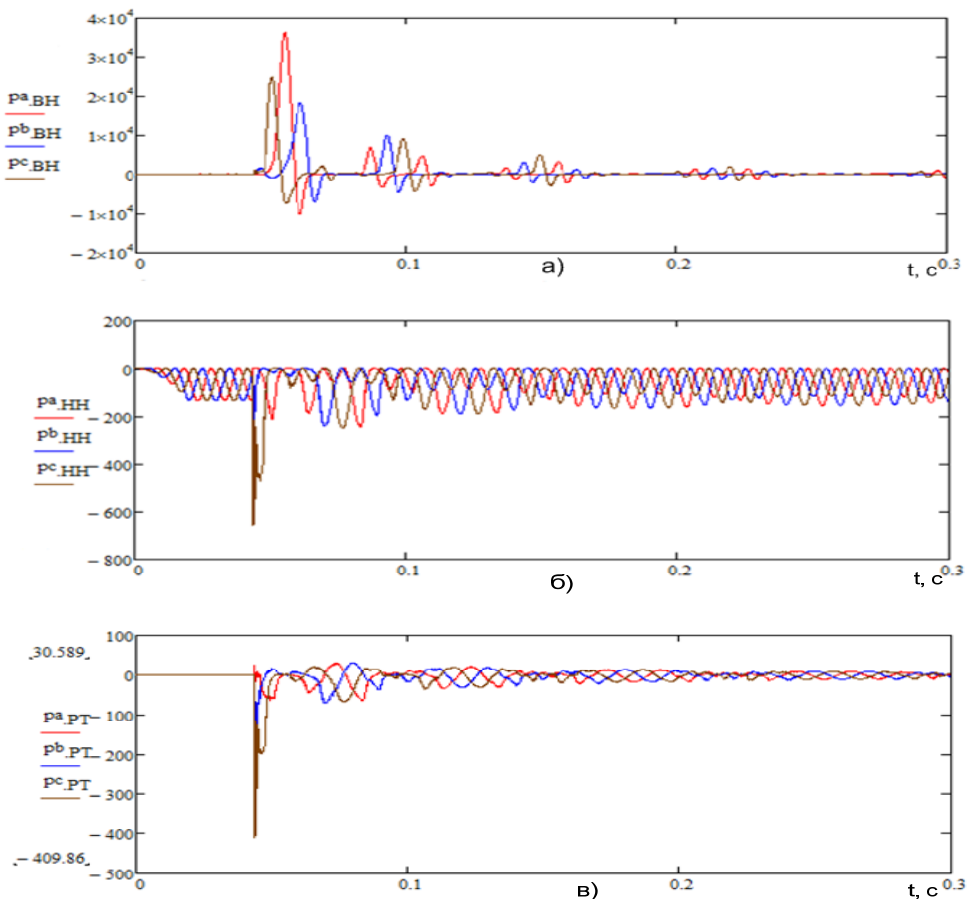


Рисунок 2 – Миттєві значення потужностей, що протікають обмотками: а) вищої напруги; б) нижчої напруги; в) “розімкнутий трикутник”.

Потужності, що розсіювалися, були обчислені на основі графіків миттєвих струмів за формулою (1). Дані розрахунку приведені на рис. 3. З рис. 3 видно, що миттєві значення активної потужності, що розсіюється під час перехідного процесу в обмотках сторони вищої напруги суттєво перевищує (до 10000 раз) втрати в обмотках сторони нижчої напруги та сторони “розімкнутий трикутник”. Для чисто активного навантаження активна потужність, що виділяється на обмотках сторони нижчої напруги пропорційна потужності, яка виділяється на навантаженні як під час усталеного режиму, так і під час перехідного процесу. Відношення цієї потужності до потужності навантаження пропорційне відношенню активних опорів обмотки та навантаження.

З рис. 4 видно, що графік миттєвих значень активної потужності, яку розсіює трансформатор, має вигляд хвилювих пакетів розділених “безструмовими” паузами. Під час хвилювого пакету максимальне амплітудне значення розсіюваної активної потужності складає декілька тисяч Вт (до 10 тисяч), а під час “безструмової” паузи – декілька десятків Вт. Графік втрат активної потужності має несинусоїдальний характер. Поява такого хвилювого пакету зумовлена насиченням магнітопроводу трансформатора під дією вимушеної і вільної складової. Під час “безструмової” паузи магнітопровід трансформатора ненасичений, значення струму через нього незначне, відповідно значення втрат активної потужності мале (але не нульове). Трансформатор в цьому випадку працює на лінійній ділянці кривої намагнічування. Під час хвилювого пакету різко зростає значення розсіюваної потужності. Хвилювий пакет складається з імпульсів активної потужності синусоїдальної форми. Ці імпульси зміщені відносно лінії нуля і їх амплітуда змінюється. Максимальне значення імпульсів розсіюваної потужності хвилювого пакету зменшується з номером пакету – внаслідок активних втрат в контурі “ємність мережі – індуктивність трансформатора”. Імпульси потужності мають частоту 150 Гц. Ця частота не залежить ні від опору навантаження, ні від ємності мережі.

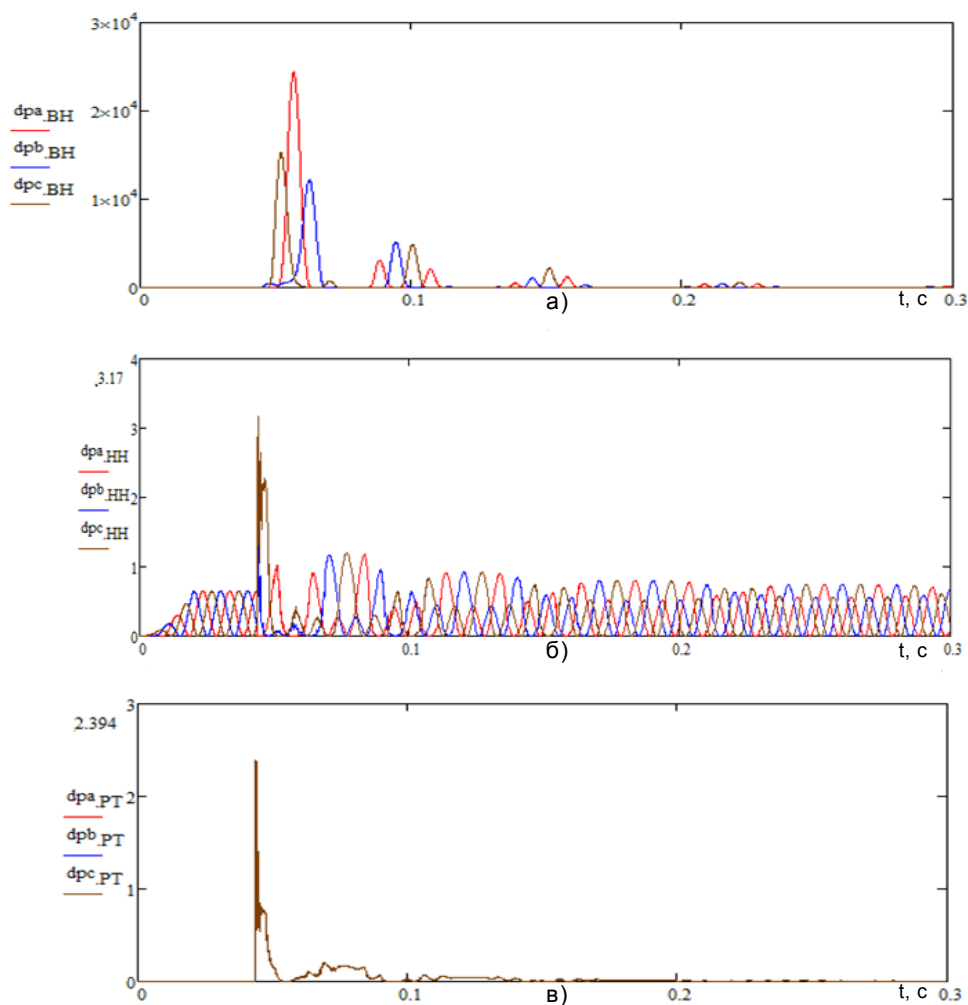


Рисунок 3 – Миттєві значення потужностей, які розсіюють обмотки: а) -вищої напруги; б) нижчої напруги; в) – “розімкнутий трикутник”.

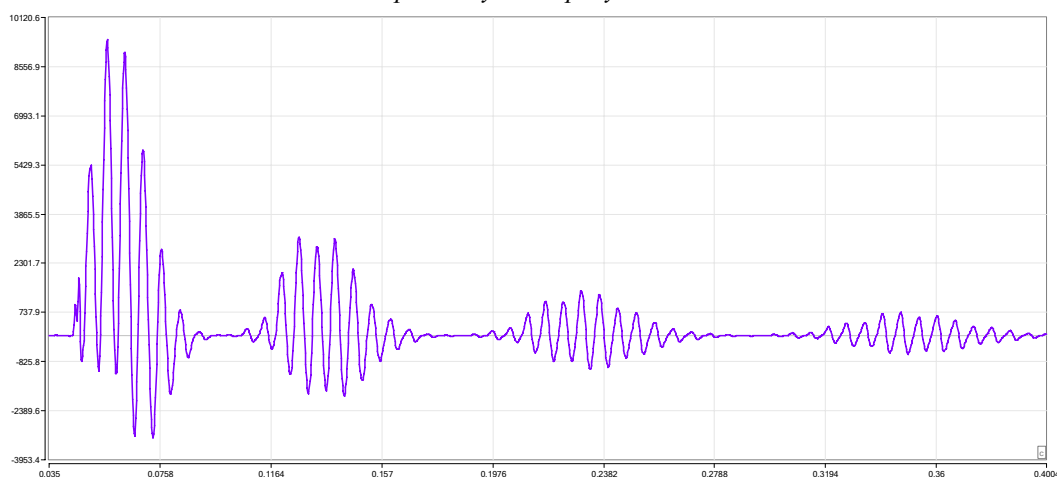


Рисунок 4 – графік миттєвих значень активної потужності (сумарний), яку розсіюють обмотки ТН. Струм замикання на землю 20 А, опір навантаження – 10000 Ом.

Навантаження на величину максимального значення розсіюваної потужності практично не впливає, різниця не перевищує 10 % за зміни опору навантаження від 10000 до 30 Ом. Найбільшу амплітуду розсіювана потужність завжди має під час першого хвильового пакету.

З рис. 5 видно, що амплітуда коливань швидко зменшується з номером коливання і ця міра зменшення прямо залежить від опору навантаження. Зі зменшенням опору навантаження відношення максимальних амплітуд першого та другого хвильових пакетів збільшується – затування в контурі зростає за зменшення опору навантаження. Ці результати характеризують перехідний процес, але не дають можливості порівняти, яку

потужність розсіює трансформатор напруги в різних режимах. Для цього аналізуємо втрати активної енергії, що її розсіює трансформатор. Для порівняння з усталеним режимом визначаємо середнє значення потужності, що розсіюється. Середнє значення визначали на основі втрат активної енергії в ТН за певний часовий інтервал:

$$P_{\text{середнє}} = \frac{W_A}{t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}}} = \frac{1}{t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}}} \cdot \int_{t_{\text{поч}}}^{t_{\text{ноч}}} \sum_{i=1}^9 P_{\text{розі}}(t) dt \quad (2)$$

Таблиця 1 – Енергія та середня активна потужність, яку розсіює ТН за різний часовий інтервал за струму замикання на землю 20 А

	1 період			2 періоди			3 періоди		
	величина опору навантаження, Ом			величина опору навантаження, Ом			величина опору навантаження, Ом		
	30	60	10000	30	60	10000	30	60	10000
Розсіяна енергія, Дж	60,19	59,70	61,78	72,78	71,94	73,77	71,82	70,93	72,78
Розсіяна потужність, Вт	3000,4	2985,1	3089	1819,6	1799	1844	1197	1182,1	1213

Продовження табл. 1

	4 періоди			5 періодів			Усталений режим замикання		
	величина опору навантаження, Ом			величина опору навантаження, Ом			величина опору навантаження, Ом		
	30	60	10000	30	60	10000	30	60	10000
Розсіяна енергія, Дж	74,48	73,98	76,79	84,16	84,28	88,15	–		
Розсіяна потужність, Вт	930,96	924,71	959,95	841,58	842,76	881,48	69,484	68,274	61,808

Аналізуючи дані, наведені в табл. 1, можна зробити висновок, що за однократного пробою найбільша енергія виділяється саме в перші 20 мС перехідного процесу. Далі розсіяна енергія збільшується незначно. Відповідно середнє значення розсіюваної потужності зменшується – тобто ТН встигне охолотитися (за умови відсутності тривалого дугового замикання). Порівнюючи середні значення розсіюваних потужностей, можна зробити висновок, що за дугового ОЗЗ ці значення набагато (в десятки разів) більші, ніж за усталеного режиму замикання на землю, відповідно – за дугового ОЗЗ буде найбільший перегрів ТН і найбільша ймовірність його пошкодження.

**Висновки.** 1. В нормальному експлуатаційному режимі потужність розсіювання обмоток вищої та нижчої напруги є незначною і залежить тільки від навантаження.

2. В режимі усталеного ОЗЗ потужність розсіювання обмотками трансформатора не залежить від величини струму ОЗЗ, але залежить від навантаження.

3. В режимі усталеного ОЗЗ потужність, яку розсіюють обмотки сторони вищої напруги набагато більша, ніж та, яку розсіюють обмотки нижчої напруги та “розімкнутий трикутник”.

4. За одиничного дугового замикання на землю розсіяна потужність в десятки разів більша ніж в нормальному режимі. Для всього трансформатора ця потужність має вигляд хвильових пакетів, інтенсивність яких швидко затухає.

5. Найбільший вплив на величину розсіяної потужності мають параметри обмоток вищої напруги та крива намагнічення магнітопроводу.

6. Слід вважати, що режим дугового замикання на землю є особливо небезпечний для ТН, тому що має місце виділення значної енергії в обмотках за кожного пробиття і наступного відновленням ізоляції.

7. Для унеможливлення пошкодження трансформатора напруги за дугового замикання необхідно відключати приєднання з ОЗЗ або трансформатор напруги.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт.

2. Ravlyk A., Gretchyn T. Digital complex for modelling of transient processes in electric circuit// III Symp. Proc. “Metody matematyczne w elektroenergetyce”. Zakopane. – 1993.–P.17–20.

3. И.М. Сирота. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. “ Киев: Наукова думка, 1983. – 268с. 4

4. Гиндулин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.А. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ. — Москва: Энергоатомиздат, 1989. — 234 с.

## REFERENCES

1. GOST 1983-2001. *Transformatory naprjagenija. Obschie tehniicheskie uslovija. Meggosudarstvennyj standart.* [Voltage transformers. General specification. International standart]
2. Ravlyk A., Gretchyn T. Digital complex for modelling of transient processes in electric circuit// III Symp. Proc. "Metody matematyczne w elektroenergetyce". Zakopane. – 1993.–P.17–20.
3. I.M. Sirota. *Transformatory i filtry naprjagenija i toka nulevoj posledovatelnosti.* Kyiv: Naukova dumka, 1983. 268p.
4. Gindulin F.A., Goldshtejn V.G., Dulzon A.A., Halilov F.A. *Perenaprjagenija v setjah 6-35 kV.* [Overvoltages in 6-35 kV power supplies]. Moskva: Energoatomizdat, 1989. 234 p.

Надійшла до редакції 25.03.2013

Рецензент: М.В. Гребченко

В.М. АМБРОЗ, М.В. БАЗИЛЕВИЧ, Н.И. МАГУРЧАК, И.О. САБАДАШ  
Национальный университет «Львовская политехника»

**Мощность, рассеиваемая трансформатором напряжения во время однофазного замыкания на землю.** Исследованы процессы связанные с рассеиванием активной мощности трансформаторами напряжения во время однофазных замыканий на землю. Установлено ее распределение по обмотках, влияние различных факторов та видов замыканий на характеристики рассеиваемой мощности.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю, сети с изолированной нейтралью, трансформатор напряжения, феррорезонансные процессы.

V. AMBROZ, M. BAZYLEVYCH, N. MAGURCHAK, I. SABADASH  
National university "Lvivska polytechnika"

**Power Dissipated by Voltage Transformer During Single-Phase Ground Fault.** The processes associated with scattering active power voltage transformer for single phase earth fault. Established its distribution in the windings, the influence of different factors and types of faults on the characteristics of power dissipation. In normal operational mode scattering power winding higher and lower voltage is low and depends on the load. In steady-state mode single phase ground fault power transformer windings scattering depends on the current single phase ground fault, but depends on the load. In steady-state mode single phase ground fault power, which scatter winding side higher voltage is much larger than that dissipate low voltage winding and "unlock triangle." For single arc fault to earth scattered power is ten times higher than normal. For all this power transformer has the form of wave packets, the intensity of which quickly fades. The biggest impact on the value of dissipated power parameters have higher voltage windings and magnetic core magnetization curve. It is anticipated that the regime arc fault the ground is particularly dangerous for TN because there is a large selection of energy in the windings for each penetration and subsequent recovery isolation. To safeguard damaging voltage transformer for arc fault should be turned off from joining single phase ground fault or voltage transformer.

**Key words:** single-phase ground fault, supply with non-grounded neutral, voltage transformer, ferreazonans processes.