

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗРИВУ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ 10 КВ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Розглянуто ферорезонансні процеси (ФРП) в електричних мережах 10 кВ з ізолюваною нейтраллю, які виникають між ємністю мережі відносно землі та нелінійною індуктивністю заземлених первинних обмоток трансформаторів напруги (ТН) у момент ліквідації замикання фази на землю в електромережі. Здебільшого ФРП в електричних мережах самочинно згасають за декілька періодів промислової частоти. Але за певного співвідношення ємнісного струму замикання мережі та параметрів трансформаторів напруги ФРП може бути стійким (довготривалим) і призводити до термічного пошкодження первинних обмоток ТН та іншого електрообладнання. Тривалість такого ФРП обмежується часом спрацювання засобів з його недопущення (зриву), а за відсутності таких в мережі — часом до моменту пошкодження ТН чи зміни конфігурації електромережі. Для зривання стійких ФРП та захисту ТН від пошкоджень використовують пристрої захисту, дія яких спрямована на під'єднання гасильного опору до обмотки «розімкненого трикутника» ТН. Такий принцип реалізовано, зокрема, в пристроях типу ПЗФ, які експлуатуються в електромережах 10–35 кВ вже понад 25 років. За роки експлуатації пристроїв ПЗФ зафіксовано випадки неефективного зривання ФРП в мережі. Такі події відбувалися через зміни конфігурації мережі та відповідно зміну кількості працюючих ТН, обладнаних пристроями ПЗФ.

Досліджено ФРП в електричних мережах 10 кВ з різною кількістю працюючих ТН та визначено діапазони ємнісних струмів замикання на землю за яких ФРП є стійким. Встановлено, що кількості ТН в мережах 10 кВ відповідає свій діапазон ємнісних струмів замикання на землю. Зі збільшенням кількості ТН в мережі розширюються діапазони ємнісних струмів замикання на землю, за яких виникають стійкі ФРП.

Запропоновано метод зриву стійких ФРП в електричних мережах 10 кВ та досліджено його ефективність. Суть методу ґрунтується на короткочасному увімкненні у нейтраль силового трансформатора активного опору. Запропонований метод зривання стійких ФРП в електричних мережах 10 кВ з ізолюваною нейтраллю, як показали дослідження, є ефективним незалежно від кількості ТН в мережі та їх типу, а також незалежно від того, чи встановлені на них пристрої зривання стійких ФРП чи відсутні. За результатами дослідження визначено оптимальне значення величини опору, підключення якого до нейтралі силового трансформатора призводить до зривання стійких ФРП. Розроблено принцип технічної реалізації розробленого методу «нейтраль силового трансформатора-резистор».

Ключові слова: ферорезонансний процес, електрична мережа з ізолюваною нейтраллю, трансформатор напруги.

Вступ

У розподільних електричних мережах 10 кВ України, які працюють з ізолюваною нейтраллю, виникають ферорезонансні процеси (ФРП) між ємністю мережі відносно землі та нелінійною індуктивністю заземлених первинних обмоток трансформаторів напруги. Збуренням ФРП, зазвичай, є процес ліквідації замикання фази на землю в електромережі. На ймовірність виникнення таких ФРП в мережі та тривалість їх протікання впливають такі фактори, як режим заземлення нейтралі електричної мережі, її ємнісний струм замикання на землю, кількість та тип ТН, їхня конструкція та параметри. Здебільшого ФРП в електричних мережах 10 кВ самочинно згасають за декілька періодів промислової частоти. Але за певного співвідношення ємнісного струму замикання на землю мережі та параметрів трансформаторів напруги (характеристик їхніх кривих намагнічування, конструкції магнітної системи, схеми сполучення первинних обмоток тощо) ФРП може бути стійким (довготривалим), внаслідок чого може відбуватися термічне пошкодження ТН та іншого електрообладнання.

Тривалість такого ФРП обмежується часом спрацювання засобів з його недопущення (зриву), а за відсутності таких в мережі — часом до моменту пошкодження трансформаторів напруги чи зміни конфігурації електромережі, тобто її ємності.

Для зривання стійких субгармонійних ФРП в мережі та недопущення термічного пошкодження трансформаторів напруги використовують пристрої захисту, дія яких спрямована на під'єднання гасильного опору до обмотки «розімкненого трикутника» ТН. Такий принцип реалізовано й у пристроях типу ПЗФ, які експлуатуються в електромережах 10–35 кВ вже понад 25 років. Разом з тим, в експлуатації зафіксовано випадки неефективного зривання ФРП в мережах за спрацювання пристроїв ПЗФ. Такі події відбувалися під час зміни конфігурації мережі та, відповідно, зміни кількості працюючих ТН, обладнаних пристроями ПЗФ.

З метою підвищення ефективності функціонування ЕМ 10 кВ з ізолюваною нейтраллю щодо недопущення у них небезпечних тривалих субгармонійних ФРП необхідно: дослідити особливості протікання таких процесів у електромережі 10 кВ з трансформаторами напруги різної кількості, різного типу, з пристроями захисту від ФРП і без них; розробити заходи ефективного зриву тривалих субгармонійних ФРП; дослідити вплив запропонованих заходів на характер перебігу ФРП в мережі.

Аналіз літературних джерел

Результати аналізу наукових публікацій показують, що ферорезонанс є складним нелінійним явищем, яке виникає в електричних мережах за взаємодії ємності елементів мережі з нелінійними індуктивними елементами магнітного типу, зокрема силовими трансформаторами, трансформаторами напруги. Під час ФРП виникають перенапруги, струмові коливання, нагрівається обладнання та може пошкоджуватися ізоляція, можливе хибне спрацювання релейного захисту, що знижує надійність роботи електричних мереж [1]–[6]. Особливості субгармонійних ФРП в мережах з ізолюваною нейтраллю: механізми виникнення ферорезонансу, вплив параметрів мережі на умови виникнення та протікання процесу; умови за яких пошкоджуються трансформатори напруги під час ФРП описані у роботах [5]–[7]. Одним з напрямків боротьби із субгармонійними ФРП в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю є ефективне обмеження його тривалості, яке включає своєчасне швидке розпізнавання ФРП та дію засобів на його зривання. Практичні аспекти розпізнавання ферорезонансу в експлуатаційних умовах розглянуто в [8]. У роботі [6] запропоновано новий підхід до виявлення ферорезонансних коливань у мережах середньої напруги на основі аналізу магнітного потоку в обмотці розімкненого трикутника трансформатора напруги. Цей алгоритм є надійним під час розпізнавання ФРП. У [9] досліджено ефективність різних методів обмеження ферорезонансних процесів, зокрема через застосування нелінійних резисторів, демпферних кіл та активного керування ТН. Автори дійшли висновку, що оптимальним є поєднання заходів апаратного характеру з алгоритмічним виявленням аномалій. Для недопущення виникнення чи зриву ферорезонансу в електричних мережах використовують пристрої захисту ТН (зриву ФРП в електромережі): ПЗФ [5], [8], [10], VT Guard [11], AFR 31 Smart Load [12], Ferro-Damp [13] тощо, а також антирезонансні та нерезонуючі трансформатори напруги [5].

Результати дослідження

ФРП досліджувалися у електромережі 10 кВ. Схема досліджуваної мережі 10 кВ, яка живиться від підстанції 110/35/10 кВ, показана на рис. 1а. Від шин 10 кВ підстанції відходять ЛЕП: Л — лінії до тупикових ТП; Л1 і Л2 — лінії відповідно до прохідних ТП1 і ТП2; Л3 і Л4 — лінії до тупикових ТП відповідно від ТП1 і ТП2. ТН в досліджуваній мережі встановлені: ТН1 — на шинах 10 кВ підстанції, яка живить мережу; ТН2 і ТН3 — на шинах 10 кВ відповідно ТП1 і ТП2. Для збурення ФРП в мережі на шин 10 кВ підстанції (рис. 1) моделювалося замикання фази на землю (К1) з подальшою його ліквідацією.

Дослідження субгармонійних ФРП в електричній мережі 10 кВ виконане з використанням цифрового комплексу REC [14], у якому сформовано трифазну модель мережі (рис. 1б). Елементи електричної мережі: джерело живлення, силовий трансформатор, шини розподільних установок підстанції, трансформатори напруги (дослідження виконано для ТН типу НТМИ, оскільки за результатами ґрунтовних досліджень [5] вони є найбільш схильними до утворення стійких ферорезонансних контурів в електромережах 10 кВ), ЛЕП представлено цифровими моделями, параметри яких обчислені відповідно до їх типу та конструкції. Для отримання адекватної картини перехідного процесу в електричній мережі у моделі використано активні опори, ємності фаз відносно землі і міжфазні ємності та трансформатори

напруги з відповідними параметрами їх магнітних систем [5], [8], [10].

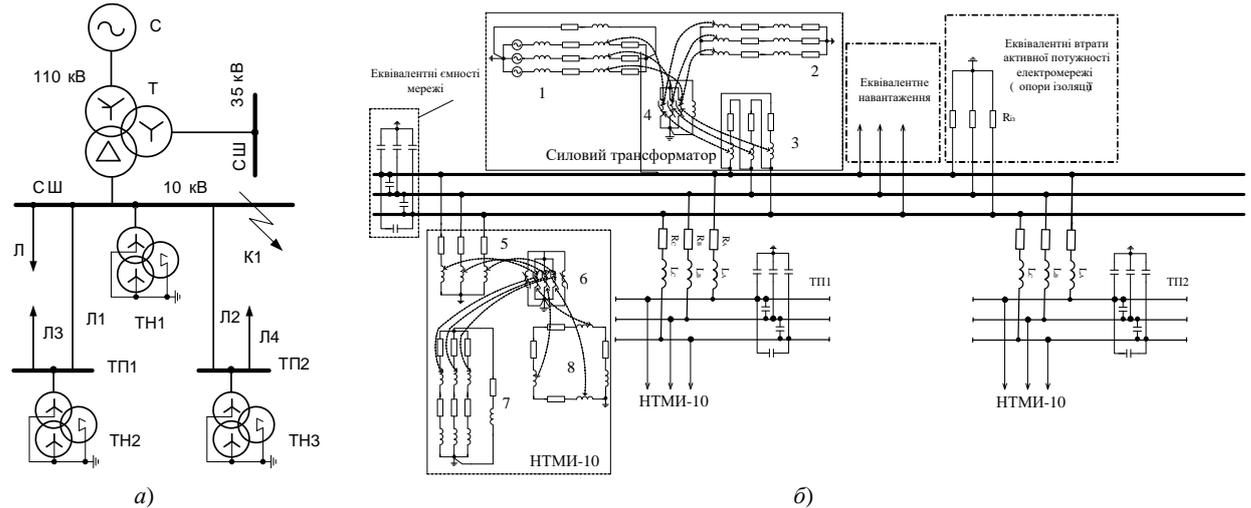


Рис. 1. Схеми: *а* — досліджуваної електричної мережі; *б* — її трифазна розрахункова модель;

1 — еквівалентна розрахункова схема ЕРС енергосистеми з первинною обмоткою силового трансформатора Т з втратами в обмотці, баку, оливі, повітрі тощо; 2 — еквівалентна розрахункова схема вторинної обмотки силового трансформатора, з'єднаної в зірку, що живить навантаження 35 кВ; 3 — третинна обмотка силового трансформатора, з'єднана в трикутник, що живить шини 10 кВ; 4 — еквівалентна електрична схема магнітної системи силового трансформатора; 5 — еквівалентні схеми первинних обмоток відповідних трансформаторів напруги; 6 — еквівалентні електричні схеми магнітопроводів відповідних ТН; 7 — еквівалентні схеми вторинних обмоток ТН з навантаженням та гілками, що імітують втрати в обмотках, баці, оливі, повітрі тощо; 8 — схеми вторинних обмоток ТН, з'єднаних у розімкнений трикутник, з навантаженням

В досліджуваній електричній мережі 10 кВ з ізолюваною нейтраллю за різної кількості ТН та структури електромережі ФРП можуть бути короточасними (нестійкими), які через деякий час після їх виникнення згасають (рис. 2*а*) або тривалими, які здебільшого призводять до пошкодження ТН (рис. 2*б*).

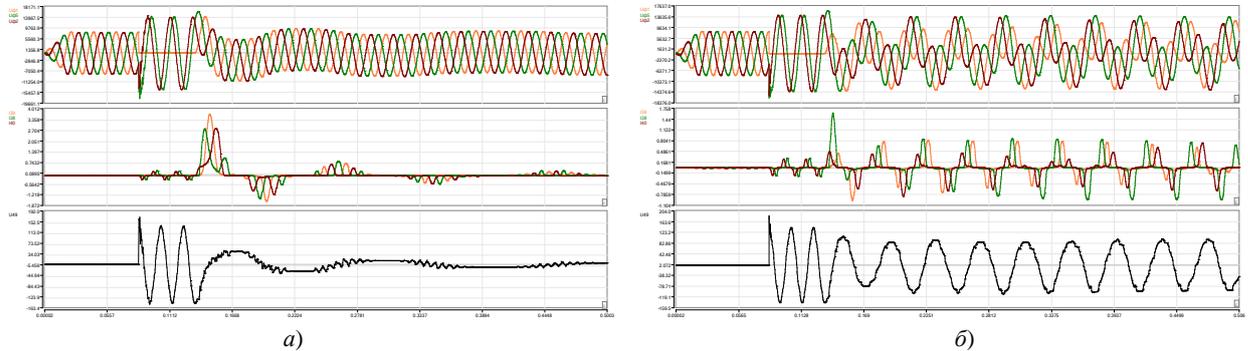


Рис. 2. Фазні напруги, струми первинних обмоток та напруга обмотки розімкненого трикутника

ТН типу НТМИ-10 за: *а* — ємнісного струму замикання на землю 10 А (нестійкий ФРП);

б — ємнісного струму замикання на землю 1,5 А (стійкий ФРП)

Тривалим ФРП відповідають певні умови, а саме значення ємнісного струму замикання на землю мережі. Встановлено, що залежно від кількості ТН в мережі ці значення можуть бути різні. За результатами моделювання визначено діапазони ємнісних струмів замикання на землю мережі з ТН типу НТМИ-10, за яких субгармонійний ФРП з частотою 25 Гц є стійким (табл. 1).

Таблиця 1

Діапазони ємнісних струмів замикання на землю, за яких виникають стійкі ФРП за різної напруги мережі

Кількість ТН	0,9U _{ном}		U _{ном}		1,2U _{ном}	
	від	до	від	до	від	до
1	0,35	2,3	0,4	2,55	0,45	2,85
2	0,7	4,6	0,8	5,1	0,9	5,7
3	1,05	6,9	1,2	7,65	1,35	8,55

Кожній кількості ТН в мережах 10 кВ відповідає свій діапазон ємнісних струмів замикання на землю. Зі збільшенням кількості трансформаторів напруги в мережі розширюються діапазони ємнісних струмів замикання на землю, за яких виникають стійкі ФРП. Так, в ЕМ 10 кВ з ТНКІ типу НТМИ-10 за номінальної напруги мережі одному трансформатору напруги відповідає діапазон ємнісних струмів замикання на землю від 0,4 А до 2,55 А, а трьом ТН — від 1,2 А до 7,65 А. Зміна напруги мережі також впливає на діапазон ємнісних струмів замикання на землю, за яких ФРП стійкий. Зростання напруги мережі призводить до розширення діапазону струмів. В межах зміни напруги мережі від $0,9 U_{\text{ном}}$ до $1,2 U_{\text{ном}}$ діапазони струмів трьох ТН перекриваються, тобто є значення струмів замикання на землю мережі (від 1,35 А до 2,85 А), за яких ФРП може бути стійким як з одним ТН, з двома ТН, так і з трьома ТН. Під час експлуатації коливання напруги в мережах 10 кВ та зміни конфігурації мережі (включення, відключення ЛЕП), які призводять до зміни ємнісного струму замикання на землю мережі, ФРП має випадковий характер і визначає яким він буде — стійкий, чи самочинно згасатиме.

Для зриву стійкого ФРП в мережі дієвим є використання пристроїв ПЗФ, які під'єднують до виводів обмотки розімкнений трикутник ТН [5]. Дія пристрою практично за 4—5 періодів промислової частоти відновлює нормальний режим мережі (рис. 3).

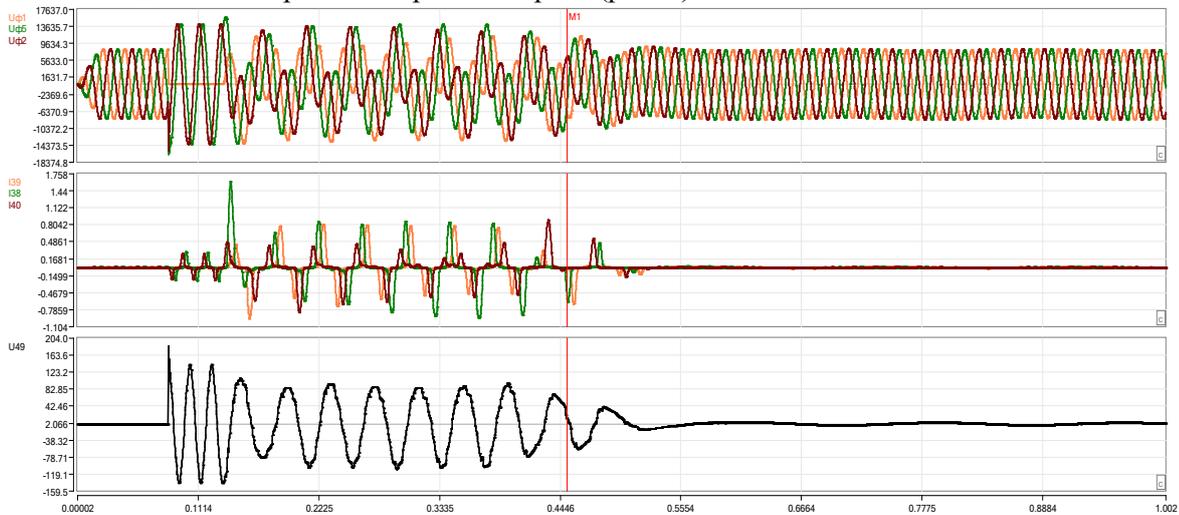


Рис. 3. ФРП під час спрацювання пристрою ПЗФ в момент часу $M1$

Результати моделювання ФРП в електричних мережах 10 кВ з групою ТН показали, що причиною неуспішного зривання стійкого ФРП можуть бути: зміна конфігурації мережі; зміна кількості функціонуючих ТН; встановлення в мережі ТН з пристроями ПЗФ та ТН без пристроїв ПЗФ. Поза тим, особливістю тривалого ФРП в електричних мережах 10 кВ з групою ТН, обладнаних пристроями ПЗФ, є те, що для успішного його зривання повинні синхронно спрацювати усі пристрої ПЗФ, причому ними мають бути обладнані щонайменше 80 % всіх трансформаторів напруги в електрично зв'язаній мережі. Якщо ця умова не виконується, то ферорезонансний процес не зривається (рис. 4).

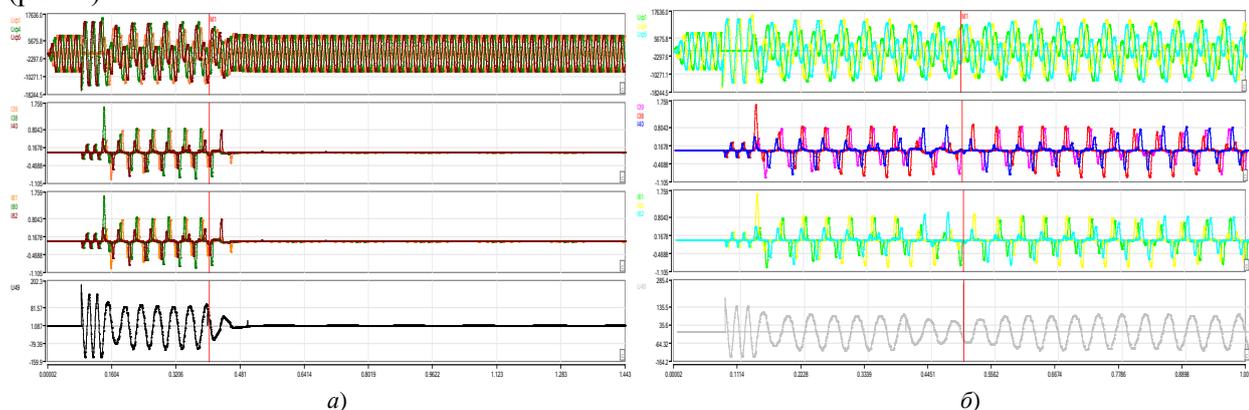


Рис. 4. Фазні напруги, струми первинних обмоток та напруга обмотки розімкненого трикутника під час роботи в мережі двох ТН типу НТМИ-10 з пристроями ПЗФ: *а* — за синхронного спрацювання двох ПЗФ (ФРП усунуто); *б* — за спрацювання одного ПЗФ (ФРП продовжується)

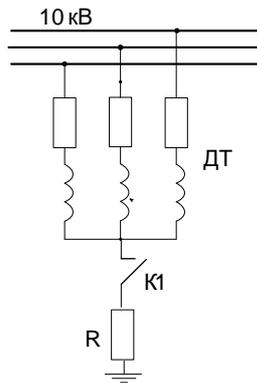


Рис. 5. Схема приєднання резистора до нейтралі первинних обмоток додаткового силового трансформатора

Для гарантованого зриву стійких ферорезонансних процесів запропоновано метод, суть якого ґрунтується на короткочасному ввімкненні у нейтраль первинної обмотки додаткового силового трансформатора (ДТ) активного опору R (рис. 5). Запропонований метод зриву стійких ФРП, як показали дослідження, є ефективним незалежно від кількості ТН в мережі та їх типу, а також незалежно від того, чи встановлені на них пристрої захисту ТН, чи відсутні. За результатами дослідження встановлено, що величина опору R (рис. 5), не повинна перевищувати 25 кОм. Під час нормальної роботи електромережі нейтраль первинної обмотки трансформатора розземлена. З появою у мережі ФРП контакт $K1$ замикається і в нейтраль первинної обмотки трансформатора вмикається резистор R на час 0,2 с, чого достатньо для згасання ФРП. Характер зміни координат режиму буде аналогічним до показаного на рис. 4а.

Висновки

1. За результатами дослідження встановлено, що збільшення кількості ТН в ЕМ 10 кВ розширює діапазон ємнісних струмів замикання на землю мережі, за яких субгармонійний ФРП є стійким. При цьому існує діапазон ємнісних струмів замикання на землю мережі від 1,35 А до 2,85 А, за яких ФРП може бути стійким як з одним ТН, з двома ТН, так і з трьома ТН, що необхідно враховувати під час зміни схеми мережі.

2. Аналіз літературних джерел та виконані дослідження підтвердили недосконалість заходів та засобів, які використовуються в експлуатації для зриву ферорезонансних процесів в електричних мережах 10 кВ. Зокрема встановлено, що необхідно оснащувати практично всі ТН електричної мережі однотипними пристроями захисту від ФРП, чого важко досягнути у реальних електричних мережах.

3. Запропоновано метод зриву стійких субгармонійних ФРП, який, як показали результати цифрового моделювання, ефективно зриває стійкі ФРП в електромережах 10 кВ незалежно від кількості ТН та їх типу. При цьому немає потреби у додатковому використанні пристроїв захисту ТН від ФРП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] "Resonance and Ferroresonance in Power Networks," *CIGRE Technical Report 569*, 2014 [Electronic resource]. Available: <https://www.scribd.com/document/513700815/ELT-272-9>.
- [2] H. Radmanesh, and Hamid F. Seyed, "Analyzing Ferroresonance Phenomena in Power Transformers Including Zinc Oxide Arrester and Neutral Resistance Effect," *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/525494>.
- [3] R. Martínez, M. Manana, et al., "Ferroresonance Phenomena in Medium-Voltage Isolated-Neutral Grids: A Case Study," *IET Renewable Power Generation*, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5231>.
- [4] M. Kutija, and L. Pravica, "Effect of Harmonics on Ferroresonance in Low Voltage Power Factor Correction System—A Case Study," *Appl. Sci.*, no. 11, pp. 4322, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11104322>.
- [5] А. В. Журахівський, З. М. Бахор, О. І. Ганус, П. П. Говоров, і А. Я. Яцейко, *Ферорезонансні процеси та захист трансформаторів напруги в електричних мережах 6–35 кВ*, моногр. Львів, Україна: Вид-во Львівської політехніки, 2019, 324 с.
- [6] K. Solak, W. Rebizant, and M. Kereit, "Detection of Ferroresonance Oscillations in Medium Voltage Networks," *Energies*, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13164129>.
- [7] Z. Bakhov, A. Yatseiko, and R. Ferensovych, "Assessment of Ferroresonance Processes in Schemes of 6–35 kV Electrical Grids on the Basis of Reliability Analysis," *Energy Engineering and Control Systems*. 2020. <https://doi.org/10.23939/jeecs2020.02.137>.
- [8] А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, і Р. Я. Масляк, «Ферорезонансні процеси на частоті мережі та пристрої захисту від них.» *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, № 834, с. 6–13, 2015.
- [9] W. Kraszewski, and P. Syrek, "Methods of Ferroresonance Mitigation in Voltage Transformers," *Energies*. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15249516>.
- [10] А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, і Р. Я. Масляк, «Захист електричних мереж 6–35 кВ від ферорезонансних процесів.» *Технічна електродинаміка*, № 5, с. 70–76, 2013.
- [11] ABB. *VT Guard Pro, solution for ferroresonance elimination*. Zurich: ABB, 2020. [Electronic resource]. Available: <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/instrument-transformers-and-sensors-id/products/iec-indoor-voltage-transformers/ferroresonance-elimination-vt-guard-pro>.
- [12] KMB Systems. *AFR 31 Smart Load – Active Load for Elimination of Ferroresonance*. Brno: KMB Systems, 2019. [Electronic resource]. Available: <https://www.kbh.cz/en/p/af-31>.
- [13] ElektroAtlas. *Ferro-Damp voltage transformer protection device against ferroresonance*. Kyiv: ElektroAtlas, 2021. [Electronic resource]. Available: <https://elektroatlas.com.ua/power-equipment-en/devices-for-network-protection-en/ferro-damp-tool-df-1-en-1>.
- [14] О. М. Равлик, і Н. О. Равлик, «Програмний комплекс «REC» для аналізу процесів в електричних мережах, системах їх захисту й автоматики.» Свідectво про реєстр. авт. права на твір, № 62351, 2015.

Рекомендована оргкомітетом міжнародної науково-технічної конференції
«Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)»

Стаття надійшла до редакції 28.11.2025

Бахор Зіновій Михайлович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: zinovii.m.bakhor@lpnu.ua ;

Яцейко Андрій Ярославич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики та систем управління, e-mail: andrii.y.yatseiko@lpnu.ua .

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Z. M. Bakhor¹
A. Ya. Yatseiko¹

Improvement of the System for Suppressing Ferroresonant Processes in 10 kV Electrical Grids

¹Lviv Polytechnic National University

Ferroresonant processes (FRP) in 10 kV electrical grids with isolated neutral are considered. These processes occur between the network's capacitance to ground and the nonlinear inductance of the grounded primary windings of voltage transformers (VT) at the moment of eliminating a single-phase earth fault in the network. In most cases, FRPs in electrical networks are self-extinguishing within several cycles of the power frequency. However, under certain ratios of the network's capacitive earth-fault current and the voltage transformer parameters, the FRP can become stable (long-lasting) and cause thermal damage to the primary windings of VTs and other electrical equipment.

The duration of such FRPs is limited by the operation time of the devices designed to prevent (suppress) them, or, in their absence, by the time until VT damage occurs or the network configuration changes. To suppress stable FRPs and protect VTs from damage, protection devices are used, their action is directed on the connection of a damping resistor to the open-delta winding of the VT. This principle has been implemented, in particular, in PZF-type protection devices, which have been in operation in 10–35 kV electrical grids for more than 25 years. Over the years of PZF operation, cases of ineffective suppression of FRPs in networks have been recorded. Such events occurred due to changes in the network configuration and, accordingly, the number of operating VTs equipped with PZF devices.

FRPs were studied in 10 kV radial electrical grids with different numbers of operating VTs, and the ranges of capacitive earth-fault currents at which FRPs are stable were determined. It has been established that each number of VTs in 10 kV networks corresponds to its own range of capacitive earth-fault currents. As the number of VTs in the grid increases, the ranges of capacitive earth-fault currents at which stable FRPs occur also expand.

Method for suppressing stable FRPs in 10 kV electrical grids has been proposed, and its effectiveness has been investigated in grids with the isolated neutral. The essence of the method is based on the short-term connection of an active resistor to the neutral of a power transformer. The proposed method for suppressing stable FRPs in 10 kV isolated-neutral electrical networks, as the studies have shown, is effective regardless of the number and type of VTs in the network, as well as regardless of whether FRP suppression devices are installed or absent. Based on the results of the study, the optimal resistance value was determined, the connection of which to the neutral of the power transformer leads to the suppression of stable FRPs. Principle for the technical implementation of the developed "power transformer neutral-resistor" method has been developed.

Keywords: ferroresonant process, electrical network with isolated neutral, voltage transformer.

Bakhor Zinovii M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems, e-mail: zinovii.m.bakhor@lpnu.ua ;

Yatseiko Andrii Ya. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electric Power Engineering and Control Systems, e-mail: andrii.y.yatseiko@lpnu.ua