

РОЗДІЛ IV. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.311

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-2(24)-171-178

Вадим Бодунов, Ігор Діхтярук, Анатолій Приступа

МОДЕЛЮВАННЯ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 110 кВ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

У роботі досліджено умови виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах напругою 110 кВ шляхом моделювання у схемотехнічному пакеті Matlab Simulink. Запропонована в роботі модель дозволяє досліджувати умови виникнення ферорезонансних перенапруг в електричних мережах напругою 110 кВ та, на основі отриманих даних розробляти заходи, направлені на усунення причин та мінімізацію наслідків ферорезонансних перенапруг.

Ключові слова: перенапруги; ферорезонанс; математичне моделювання; електричні мережі; нелінійна індуктивність.
Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. На сучасному етапі розвитку енергетики у проєктній та дослідницькій практиці дуже часто постає задача підвищення точності розрахунку аварійних режимів роботи та перенапруг. Поставлені задачі можуть бути вирішені за рахунок ретельного вивчення основних факторів, які впливають на режим роботи ліній електропередавання. Зазначені положення вказують на необхідність удосконалення математичних моделей елементів електричних мереж та алгоритмів розрахунку режимів із використанням для їх реалізації обчислювальної техніки.

Однією з причин виникнення небезпечних режимів є ферорезонансні явища. Ферорезонанс – складне нелінійне електричне явище, яке є дуже небезпечним для електротехнічного обладнання, оскільки призводить до виникнення як перенапруг, так і надструмів. Питанням, пов'язаним із дослідженням ферорезонансних явищ як у мережах з ізолюваною, так і з глухозаземленою нейтраллю присвячена велика кількість робіт [1-3]. Незважаючи на тривалі дослідження, ферорезонансні явища залишаються погано прогнозованими, оскільки виникнення ферорезонансу залежить від багатьох факторів, які важко піддаються аналізу і систематизації [1-3].

Ця проблема актуальна і нині, оскільки кількість аварій через ферорезонансні явища, як показує практика, не скорочується. За даними енергосистем, відсоток пошкоджень трансформаторів напруги (ТН), пов'язаних із ферорезонансними явищами, досить високий і зростає зі збільшенням класу напруги: 110 кВ – 7 %, 220 кВ – 18 %, 330 кВ – 27 %, 500 кВ – 33 % [2]. Отже збільшення точності розрахунків при моделюванні ферорезонансних перенапруг є актуальною задачею.

Постановка проблеми. Наявність нелінійної індуктивності в поєднанні з ємністю призводить до небезпеки виникнення ферорезонансних явищ в електричних мережах [4]. Насичення осердя ТН призводить до того, що його індуктивність змінюється. Ферорезонансні явища характеризуються стрибкоподібним переходом із режиму сильного насичення осердя феромагнітної індуктивності в слабко насичений режим або навпаки. При цьому виникають стрибки напруги і струму в нелінійній індуктивності. Якщо обмотка котушки не розрахована на роботу в режимі сильного насичення, то перенапруги і протікання через обмотку струмів, що перевищують гранично допустимий струм, можуть призвести до теплового руйнування ізоляції обмотки й міжвиткових замикань [5-6].

Однією з основних причин виникнення ферорезонансу є неповнофазне включення силових трансформаторів, які мають місце при перегоранні плавких вставок високовольтних запобіжників в одній або двох фазах, неповнофазних комутаціях роз'єднувачами або вимикачами, обривах проводів повітряних ліній тощо. Як тільки ферорезонанс з'явиться, система буде працювати при ферорезонансі доти, поки джерело буде здатне забезпечувати необхідну енергію для підтримки цього явища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих дослідженнях ферорезонансів у високовольтних мережах проводиться тільки якісний аналіз ферорезонансних схем. Кількісна оцінка можливості виникнення ферорезонансних явищ, проведена за відомими методиками, в деяких випадках не дає прийнятні на практиці результати [4].

За кордоном актуальність дослідження проблем пошкодження обладнання в електричних мережах через ферорезонансні явища підтверджується дослідженнями, проведеними в США, Канаді, Франції, Німеччині: Denoel H., Debraux L., Kegel R., Neuck K., Janssens N., Soudack AC, Ferraci P. [1-3].

В електричних мережах 110 кВ спостерігалися випадки пошкодження трансформаторів напруги при неповнофазних включених ділянок мережі з повітряними лініями електропередавання та ненавантаженим силовим трансформатором. Амплітуда перенапруг при зазначених процесах може сягати $(3\div 6)U_{\phi}$. Дані перенапруги є найбільш небезпечними з усіх видів перенапруг, які можуть виникати в діючих високовольтних мережах. Тривалість цих перенапруг співвимірна з часом дії на ізоляцію робочої напруги [4].

Один з випадків ферорезонансних явищ при неповнофазних режимах роботи мережі описаний В. А. Тураєвим і П. Г. Малюшинським. У [7] було зафіксовано зсув нейтралі у силового трансформатора 110/10 кВ, працюючого з ізольованою нейтраллю. Для відновлення нормального рівня напруги було прийнято рішення про переведення живлення на іншу лінію. З цією метою силовий трансформатор був переведений на холостий хід і відповідно до діючої інструкції з перемикачів в електричних установках [8-9] було проведено включення заземлюючого роз'єднувача нейтралі. При цьому між контактами роз'єднувача виникла дуга, яка була погашена вимикачами. Оглядом лінії встановлено, що на одній із металевих опор сталося руйнування всіх скляних ізоляторів гірлянди.

У роботі [9] наведено аналіз фактичної схеми, в якій існував ферорезонансний режим і відбулося пошкодження трансформатора напруги. На ПЛ 110 кВ виникло нестійке КЗ між фазами. Захистом були відключені вимикачі по кінцях ліній. У результаті КЗ було пошкоджено неякісне контактне з'єднання і після АПВ вимикач включив лінію в неповнофазному режимі. Тому силовий трансформатор на підстанції, нейтраль якого не була заземлена через режим релейного захисту, залишився підключеним до напруги двох фаз.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що проблема виникнення ферорезонансних перенапруг є актуальною для електричних мереж різних класів напруги. Оскільки в більшості випадків проблеми виникають у діючих електричних мережах унаслідок аварій, немає можливості проводити експериментальні дослідження з вивчення ферорезонансних перенапруг безпосередньо на діючих об'єктах. У таких випадках доцільним є проведення математичного моделювання процесу виникнення ферорезонансних перенапруг та дослідження умов їх протікання в електричних мережах різних класів напруги.

Мета дослідження (статті) дослідження умов виникнення та протікання ферорезонансних перенапруг за допомогою схемотехнічного пакета математичного моделювання Matlab Simulink.

Виклад основного матеріалу. Для ферорезонансних процесів можна виділити такі особливості:

1) можливість виникнення ферорезонансу визначається параметрами лінійних елементів, що входять у контур (індуктивності, активні опори, ємності), характером нелінійної залежності поточкозчеплення в обмотках, початковими умовами, а також значенням прикладеної напруги;

2) ферорезонанс супроводжується значними спотвореннями форми напруги на елементах кола і струмів у них;

3) на характер процесів у складних колах можуть впливати електромагнітні зв'язки між елементами, створювані, наприклад, наявністю спільної для всіх трьох фаз магнітної системи трансформаторів.

Розглянемо схему, представлену на рис. 1, в якій можливе виникнення ферорезонансних перенапруг при несиметричних відключеннях фаз. Джерело живлення (система) прийнято нескінченно потужним порівняно з трансформатором. При складанні розрахункової схеми заміщення враховується, що схеми, в яких виникає ферорезонанс, відносяться до нелінійних кіл, оскільки в них присутні нелінійні індуктивності магнітопроводів трансформаторів. Вважаючи, що нелінійність наявна лише у схемі заміщення трансформатора, до решти схеми можна повною мірою застосовувати методи перетворення лінійних електричних кіл.

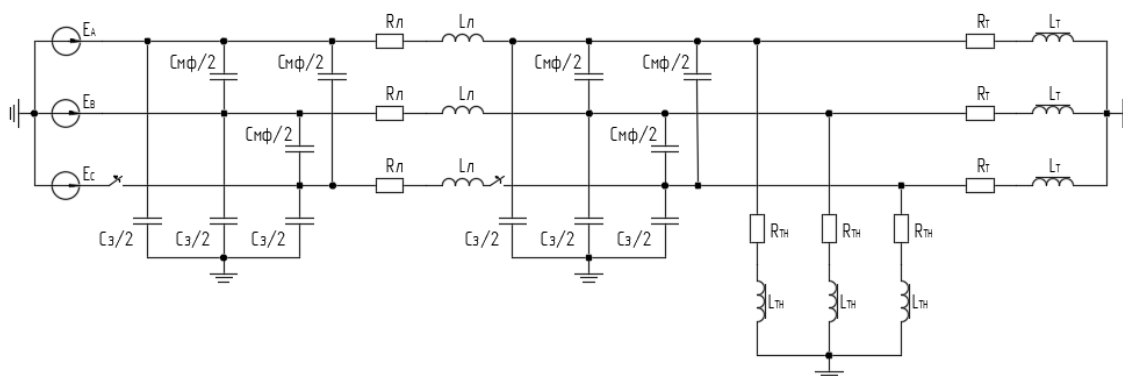


Рис. 1. Схема заміщення для електричної мережі 110 кВ для дослідження процесів в неповнофазному режимі

Для дослідження ферорезонансних процесів у пакеті схемотехнічного моделювання Matlab Simulink було зібрано схему заміщення мережі напругою 110 кВ, представлену на рис. 1. На схемі показані ємності проводів відносно землі C_3 , місце розриву й відповідні міжфазні ємності C_{MF} . Модель, створена в Matlab Simulink, наведена на рис. 2.

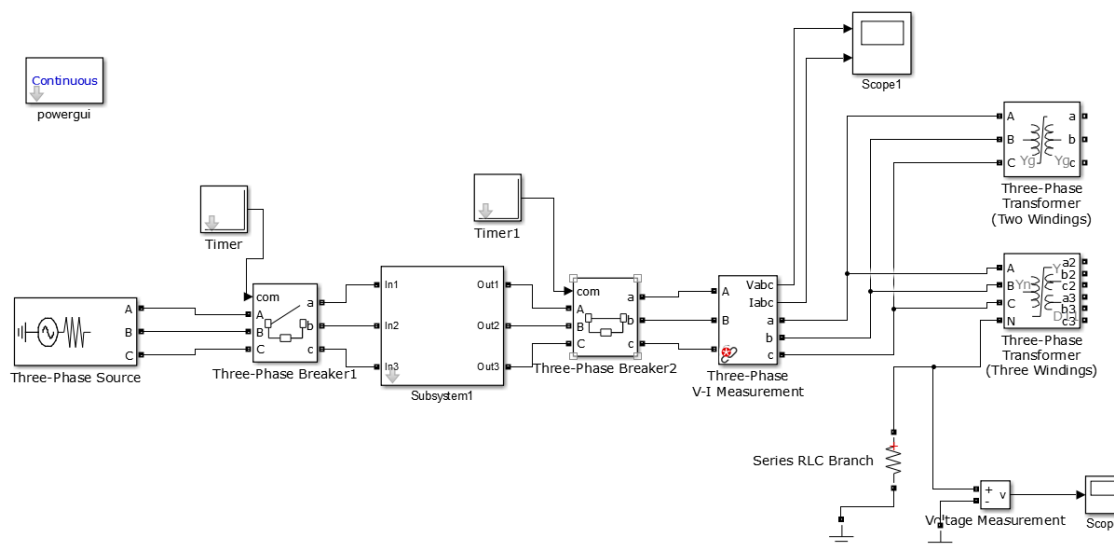


Рис. 2. Модель Matlab Simulink для дослідження ферорезонансних процесів

Створена модель складається з джерела живлення необмеженої потужності напругою 110 кВ, повітряної лінії (ПЛ) електропередачі напругою 110 кВ, силового трансформатора марки ТРДН-63000/110 та вимірювального трансформатора напруги НКФ-110.

ПЛ напругою 110 кВ виконана проводом марки АС-240 з параметрами $d = 21,6 \text{ мм}^2$ та $r_0 = 0,121 \text{ Ом/км}$ з розміщенням проводів у трикутник [10]. Параметри силового трансформатора згідно з [11]: $U_{в.н.}/U_{н.н.} = 115/10,5 \text{ кВ}$, $S_{нт} = 63 \text{ кВА}$, $U_k = 10,5 \%$.

У мережах 110 кВ і вище застосовуються каскадні трансформатори напруги. Кожен ТН складається з декількох модулів (каскадів) номінальною напругою 110 кВ. Така конструкція прийнята у традиційних ТН типу НКФ: НКФ-220 складається з двох каскадів по 110 кВ, НКФ-330 - з трьох.

Основні характеристики трансформаторів напруги, застосовуваних у мережах 110 кВ, наведені в [12]. Позначення типів трансформаторів розшифровуються наступним чином: Н – напруги (трансформатор); К – каскадний; Ф – фарфорова покривка.

Таблиця 1 – Характеристики трансформатора напруги типу НКФ-110

Тип трансформатора	Номінальна напруга, кВ		Номінальна потужність у класі точності, ВА				Максимальна потужність обмотки ВН, ВА
	ВН	НН	0,2	0,5	1,0	3,0	
НКФ-110-58	$110/\sqrt{3}$	$0,1/\sqrt{3}$	-	400	600	1200	2000

При складанні розрахункової схеми заміщення ділянки мережі 110 кВ із повітряною лінією електропередавання та ненавантаженим силовим трансформатором було прийнято такі припущення:

- 1) живлення ділянки електричної схеми моделюється трифазним джерелом змінної напруги нескінченної потужності;
- 2) розподілені активні опори, індуктивності, ємності повітряних ліній електропередавання вважаються лінійними елементами і розглядаються як зосереджені параметри;
- 3) використовується П-подібна схема заміщення повітряної лінії електропередавання;
- 4) не враховуються втрати на гістерезис і вихрові струми в магнітопроводах силових трансформаторів;
- 5) індуктивності розсіювання силових трансформаторів вважаються лінійними.

Розподілені параметри електрообладнання станцій і підстанцій (активні опори, індуктивності, ємності) приймаються зосередженими виходячи з того, що їх протяжність в порівнянні з довжиною хвилі промислової напруги на кілька порядків менше. Для ліній електропередавання таке припущення також використано, оскільки у ферорезонансних схемах, що розглядаються, довжина лінії не перевищує 30 км.

За допомогою розробленої моделі було отримано осцилограми напруг у фазах та нейтралі силового трансформатора при неповнофазному включенні. На рисунках 3 та 4 наведені осцилограми напруг у фазах силового трансформатора при неповнофазному включенні для випадку максимальної кратності перенапруг.

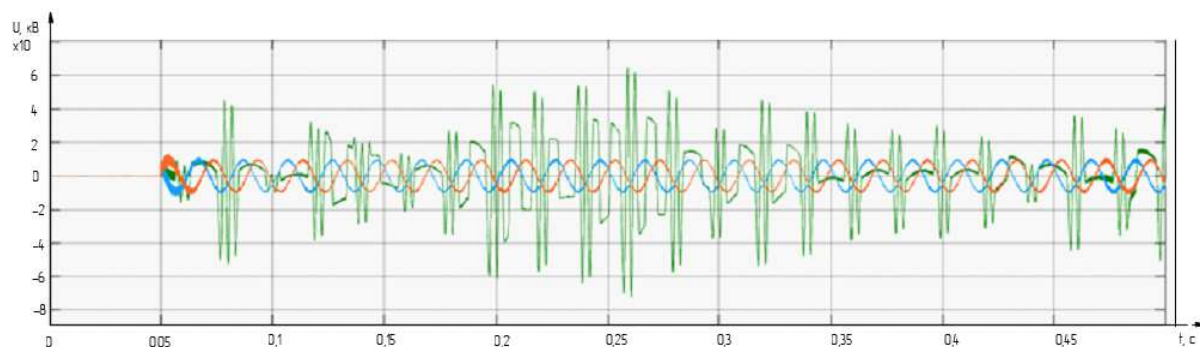


Рис. 3. Осцилограми напруг у фазах силового трансформатора при неповнофазному включенні (момент комутації 0,05 с; довжина приєднаної ЛЕП – 10 км)

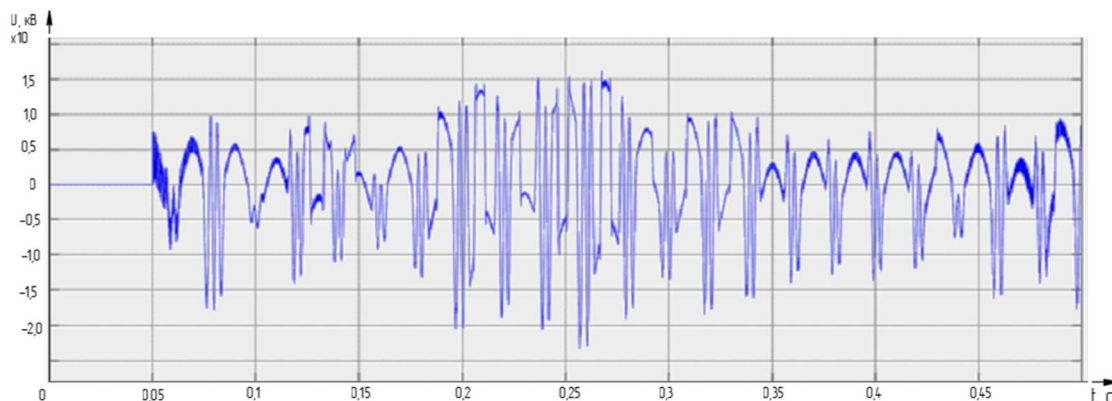


Рис. 4. Осцилограма напруги в нейтралі силового трансформатора при неповнофазному включенні (момент комутації 0,05 с; довжина приєднаної ЛЕП – 10 км)

З осцилограм бачимо, що при неповнофазному включенні виникають значні ферорезонансні перенапруги на пошкодженій фазі, що досягають $\sim 7U_{\phi}$ на основній частоті. На нейтралі при цьому виникає змінна напруга, що і свідчить про явище зсуву нейтралі силового трансформатора. Цей режим може бути небезпечний для ОПН на пошкодженій фазі, і для ОПН у нейтралі силового трансформатора, який обов’язково встановлюється при її розземленні.

Також за допомогою моделі було досліджено залежність кратності ферорезонансних перенапруг від довжини лінії та від фази в момент включення. Результати моделювання наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати моделювання залежності кратності ферорезонансних перенапруг від фази в момент включення та довжини лінії

Фаза напруги в момент комутації, °	Довжина лінії, км									
	1	2	5	10	20	30	50	70	130	180
0°	1,5U _φ	2,5U _φ	4,2U _φ	4,2U _φ	4,5U _φ	4,5U _φ	4U _φ	3,7U _φ	3U _φ	-
30°	1,5U _φ	2,5U _φ	5,2U _φ	5,5U _φ	5,5U _φ	5U _φ	3,8U _φ	3,4U _φ	3,4U _φ	3,8U _φ
60°	1,4U _φ	3,6U _φ	6,4U _φ	6U _φ	5,9U _φ	5,2U _φ	3,6U _φ	3,8U _φ	3,5U _φ	3,8U _φ
90°	2U _φ	4,5U _φ	5,5U _φ	7,2U _φ	6,1U _φ	5,2U _φ	4,2U _φ	4,3U _φ	3,6U _φ	1,5U _φ

Для довжини лінії, де спостерігається максимальна кратність ферорезонансних перенапруг, було побудовано залежність кратності від фази в момент включення, яка наведена на рис. 5.

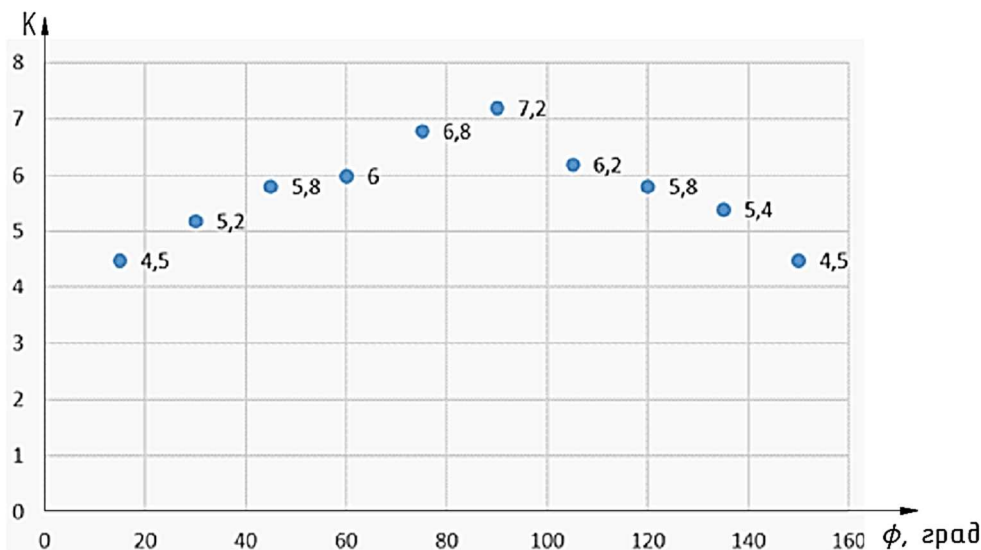


Рис. 5 Залежність кратності перенапруг від фази в момент включення (момент комутації 0,05 с; довжина приєднаної ЛЕП – 10 км)

З результатів моделювання випливає, що при різних фазах напруги в момент комутації та різній довжині лінії існує істотна відмінність у характері перебігу перехідних процесів і небезпечні ферорезонансні явища виникають не при всіх значеннях фази комутації. Проаналізувавши результати можна сказати, що область існування перенапруг, пов'язаних із ферорезонансом, визначається довжинами лінії від 1 до 180 км, причому найнебезпечніші перенапруги виникають при довжинах ліній електропередавання від 5 до 30 км. Кратність перенапруг при такій довжині лінії може сягати $7U_{\phi}$. Такі значення не лише можуть призвести до пошкодження ТН, але є небезпечними і для силового трансформатора.

Висновки. У цій роботі було проаналізовано основні причини виникнення ферорезонансних перенапруг в електричних мережах різних класів напруги. У результаті аналізу виявлено, що проблема захисту від ферорезонансних перенапруг є досить актуальною. Аргументовано доцільність проведення досліджень процесів виникнення ферорезонансних перенапруг шляхом математичного моделювання, оскільки виникнення ферорезонансних перенапруг у діючих електричних мережах пов'язано з випадковими та неконтрольованими процесами.

У цій роботі у схемотехнічному пакеті моделювання Matlab Simulink було розроблено модель, яка дозволяє моделювати ферорезонансні перенапруги в електричних мережах 110 кВ. За допомогою створеної моделі було досліджено утворення ферорезонансних перенапруг у мережі 110 кВ при неповнофазних режимах за різних довжин лінії. Згідно з результатами моделювання, перенапруги в мережі сягають $(2\div 6)U_{\phi}$.

Також, за допомогою отриманої моделі, досліджено залежність кратності ферорезонансних перенапруг від довжини лінії та від фази в момент включення. Проаналізувавши результати можна сказати, що область існування небезпечних перенапруг, кратністю до $7U_{\phi}$, пов'язаних з ферорезонансом, визначається довжинами лінії від 1 до 180 км, причому найнебезпечніші перенапруги виникають при довжинах ліній електропередавання від 5 до 30 км.

У подальших роботах може бути досліджена залежність кратності ферорезонансних перенапруг від типу проводів та опор, а також від габаритів ПЛ.

Список використаних джерел

1. The Study of Ferroresonance. Part III. *IEEE Trans. on Power Delivery*. January 2000. Vol. 15, No. 1. Pp. 255–265.
2. Айзстраутс Е. В. Ферорезонанс в мережі 110 кВ із заземленою нейтраллю. *Електричні станції*. 1993. № 12. С. 64-65.
3. Ferracci P. Ferroresonance. *Cahier technique: Power Quality*. 2001. No. 199. Pp. 1–34.
4. Панасюк Д. І., Фортале Б. М. Запобігання неповнофазної роботи ПЛ-110 кВ з трансформаторами з ізолюваною нейтраллю на відгалуженнях. Москва : Энергетик, 1989.
5. Ганус А. И., Старков К. А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению. *Светотехника и электротехника*. 2003. № 1. С. 81-95.
6. Тугай Ю. І. Аналіз умов виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2007. Вип. 596. С. 132-136.
7. Тураев В. О., Малюшинский П. Г. Про заземлення нейтралей силових трансформаторів 110-220 кВ при неповнофазних режимах живлення. *Електричні станції*. 1992. № 4. С. 69-72.
8. Типова інструкція з перемикачів в електричних установках. ТП 34-70-040-85. Москва : СПО Союзтехенерго, 1985. 36 с.
9. Керівні вказівки по запобіганню ферорезонансу в розподільних пристроях 110–500 кВ із електромагнітними трансформаторами напруги та вимикачами, що містять смісні ділянки напруги. Київ : Энергопрогрес, 1995. 34 с.
10. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич и др. ; под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. 3-е изд., перераб и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1985 352 с.

11. Вавін В. Н. Трансформатори напруги та їх вторинні кола. Москва : Недра, 1984.
12. Довідник по електричних установках високої напруги / під ред. І. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. 3-тє видання. Москва : Энергоатомиздат, 1989.

References

1. The Study of Ferroresonance. Part III (January 2000). *IEEE Trans. on Power Delivery*, 15(1), 255–265.
2. Aizstrauts, E. V. (1993). Ferorezonans v merezhi 110 kV iz zazemlenoiu neutralliu [Ferroresonance in the 110 kV network with grounded neutral]. *Elektrychni stantsii – Power plants*, (12), 64-65.
3. Ferracci, P. (2001). Ferroresonance. *Cahier technique: Power Quality*, (199), 1–34.
4. Panasiuk, D.I., & Fortule, B.M. (1989). *Zapobihannia nepovnofaznoi roboty PL-110 kV z transformatoramy z izolovanoiu neutralliu na vidhaluzhenniakh [Prevention of incomplete phase operation of 110 kV OHL with transformers with isolated neutral on branches]*. Enerhetyk.
5. Hanus, A.I., & Starkov, K.A. (2003). Povrezhdaemost transformatorov napriazheniia v oblastnykh elektricheskikh setiakh AK «Kharkovoblenerho» i meropriiatia po ee snizheniiu [Damage of voltage transformers in the regional electric networks of JSC "Kharkovoblenergo" and measures to reduce it]. *Svetotekhnika i elektrotekhnika – Lighting and electrical engineering*, (1), 81-95.
6. Tuhai, Yu.I. (2007). Analiz umov vynyknennia ferorezonansnykh protsesiv v elektrychnykh merezhakh [Analysis of the conditions of ferroresonance processes in electrical networks]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy – Bulletin of the National University Lviv Polytechnic. Electric power and electromechanical systems*, 596, 132-136.
7. Turaiev, V.O., & Maliushynskiy, P.H. (1992). Pro zazemlennia neutranei sylovykh transformatoriv 110-220 kV pry nepovnofaznykh rezhymakh zhyvlennia [On grounding of neutrals of power transformers 110-220 kV at incomplete power supply modes]. *Elektrychni stantsii – Power plants*, (4), 69-72.
8. *Typova instruksiiia z peremykannia v elektrychnykh ustanovkakh. TI 34-70-040-85 [Typical instructions for switching in electrical installations. TI 34-70-040-85]*. (1985). SPO Soiuztekhenerho.
9. *Kerivni vkazivky po zapobihanniu ferorezonansu v rozpodilnykh prystroiakh 110–500 kV iz elektromahnitnyy transformatoramy napruhy ta vymykachamy, shcho mistiat yemnisni dilnyky napruhy [Guidelines for the prevention of ferroresonance in switchgear 110–500 kV with electromagnetic voltage transformers and switches containing capacitive voltage dividers]*. (1995). Enerhoprohes.
10. Rokotian, S.S., & Shapiro, I.M. (Eds.) (1985). *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem [Handbook on the design of power]*. (3rd ed). Energoatomizdat.
11. Vavin, V.N. (1984). *Transformatory napruhy ta yikh vtorynni kola [Voltage transformers and their secondary circuits]*. Nedra.
12. Baumshstein, I.A., Bazhanov, S.A. (Eds.). (1989). *Dovidnyk po elektrychnykh ustanovok vysokoi napruhy [Handbook of high voltage electrical installations]*. (3rd ed). Enerhoatomizdat.

UDC 621.311

Vadim Bodunov, Ihor Dihtyaruk, Anatolii Prystupa

SIMULATION OF INCOMPLETE OPERATING MODES OF 110 KV ELECTRICAL NETWORKS WITH NONLINEAR ELEMENTS

In electric circuits with a series or parallel connection of a nonlinear inductor and a capacitive element with a change in voltage or current of the power supply, the phenomenon of ferroresonance is observed. Ferroresonance is a complex nonlinear electrical phenomenon, the problem of protection against which still remains unresolved.

In this paper, the main causes of ferroresonant overvoltages in electrical networks of different voltage classes were analyzed. The analysis revealed that the problem of protection against ferroresonant overvoltages is quite relevant.

The amplitude of overvoltages in these processes can be (2 ÷ 6) U_f. These overvoltages are the most dangerous of all their types that can be in existing high-voltage networks. The main cause of ferroresonance in voltage transformers is switching in idle mode and incomplete phase modes of operation of the electrical network. In this paper, the conditions of ferroresonance processes in 110 kV electric networks are carefully investigated and a model created in the circuit design package Matlab Simulink is proposed.

With the help of the created model the formation of ferroresonant overvoltages in the 110 kV network at incomplete phase regimes at different line lengths was investigated. According to the simulation results, the overvoltages in the network reach $(2 \div 6) U_f$.

The dependence of the multiplicity of ferroresonant overvoltages on the line length and on the phase at the moment of inclusion is investigated too. The area of existence of dangerous overvoltages, with a multiplicity up to $6U_f$, connected with ferroresonance, is determined by the lengths of the power transmission line with a voltage of 110 kV. The most dangerous overvoltages occur at lengths of power lines from 5 to 70 km.

Keywords: overvoltages; ferroresonance; mathematical modeling; electrical networks; nonlinear inductance; voltage transformers.

Fig.: 4. Table: 2. References: 9.

Бодунов Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Bodunov Vadim – PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Engineering and Information and Measuring Technologies Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vad1979@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2882-5787>

ResearcherID: G-4672-2014

SCOPUS Author ID: 16201956400

Діхтярук Ігор Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Dihtyaruk Ihor – PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Electrical Engineering and Information and Measuring Technologies Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: dihtyaruk.ihor@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6565-6356>

ResearcherID: M-8276-2016

SCOPUS Author ID: 56251972400

Приступа Анатолій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Prystupa Anatoliy – PhD in Technical Science, Associate Professor, Head of Electrical Engineering and Information and Measuring Technologies Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: a.l.prystupa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

ResearcherID: F-5507-2014

SCOPUS Author ID: 57190807222