

ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ НА ЧАСТОТІ МЕРЕЖІ ТА ДІАПАЗОНИ ГАСИЛЬНИХ РЕЗИСТОРІВ ДЛЯ ЙОГО ЗРИВУ

© Журахівський А. В., Яцейко А. Я., Масляк Р. Я., 2015

Досліджено можливість виникнення ферорезонансних процесів на частоті 50 Гц в електричних мережах 6-35 кВ. Визначено величини гасильних резисторів, які гарантовано гасять ферорезонансні процеси для різних класів напруг та різних типів трансформаторів напруги.

Ключові слова: ферорезонансні процеси, гасильні резистори, трансформатори напруги.

The possibility of appearance the ferroresonance processes on 50 Hz frequency in 6-35 kV networks is researched. The sizes of preventive resistors, that assuredly extinguish the ferroresonance process for the different voltage classes and for the different voltage transformers types, are shown.

Key words: ferroresonance processes, preventive resistors, voltage transformers.

Постановка проблеми

Основним завданням будь-якої енергосистеми є безперервне забезпечення споживачів електричною енергією з відповідними параметрами. Для цього під час їх проектування та експлуатації враховується багато чинників, встановлюються відповідні захисти та ведеться їх постійний моніторинг і модернізація.

Для мереж 6–35 кВ в Україні нормативними документами передбачено режим роботи з ізолюваною нейтраллю [7]. У деяких випадках, за перевищення ємнісного струму замикання на землю мережі певних меж (вказаних у нормативних документах для кожного класу напруг), такі мережі можуть працювати і у режимі компенсованої або резистивно заземленої нейтралі.

Такий спосіб заземлення для цих класів напруг було обрано з міркувань забезпечення надійності електропостачання. Найпоширенішим видом пошкоджень у цих електричних мережах є виникнення однофазних замикань на землю, які можуть супроводжуватись горінням дуги. Основною перевагою мереж з ізолюваною (компенсованою) нейтраллю є можливість забезпечення споживачів електроенергією за виникнення однофазних замикань на землю, оскільки живлення споживачів у цих мережах здійснюється від трикутника лінійних напруг, а тому однофазні замикання на землю не є аварійними режимами для них, і споживачі отримують належне живлення, не відчуваючи практично цих пошкоджень. Також вагомими перевагами таких мереж є незначні витрати на заземлювальні пристрої, велика ймовірність самостійного відновлення нормального режиму мережі після однофазних замикань на землю, можливість пошуку пошкодження (однофазного замикання) мережі без перерв електропостачання споживачів.

Однак, незважаючи на перелічені переваги, такі мережі мають і недоліки. Основними недоліками є можливість виникнення ферорезонансних процесів (ФРП) у мережі, складність здійснення селективних захистів, погіршення умов експлуатації тощо через можливе пошкодження електрообладнання підстанції та мереж.

Аналіз останніх досліджень

Незважаючи на велику кількість досліджень ферорезонансних процесів (ФРП), які виконали різні автори [1, 2 та ін.], проблема їх виникнення у мережах не вирішена повністю. Розроблені та

встановлені сьогодні пристрої захисту не забезпечують гарантованого захисту обладнання мережі від пошкоджень ферорезонансними процесами. Досвід експлуатації електричних мереж 6–35 кВ показує, що випадки пошкодження трансформаторів напруги після виникнення ФРП відбуваються в мережах і до сьогодні, що негативно впливає на роботу мереж.

Проведені попередньо дослідження здебільшого зосереджені на ферорезонансних процесах, які виникають на субгармонійних частотах, оскільки їх вважають небезпечнішими для обладнання, у той час як ферорезонансним процесам на частоті мережі, на нашу думку, було приділено недостатню увагу.

Також, як вже було доведено [3, 6 та ін.], найефективнішим способом боротьби з ФРП вважається введення гасильного резистора (ГР) в обмотку розімкнутого трикутника, однак практично не має досліджень залежності величини цього ГР від класу напруги мережі та типів трансформаторів напруги, які у ній встановлені.

Мета роботи

Дослідити ферорезонансні процеси, які виникають на частоті мережі. Проаналізувати величину гасильних резисторів, необхідних для гашення ферорезонансних процесів.

Виклад основного матеріалу

Виконані нами попередні дослідження дали змогу встановити відповідні параметри мережі, за яких можливе виникнення ФРП [4, 6]. Зокрема було вже раніше опубліковано діапазони ємнісних струмів, за яких можливе виникнення ФРП для різних класів напруг та різних типів ТН. Однак до цього не розглядалися діапазони дуже малих ємнісних струмів на землю, які відповідали б режиму роботи ненавантажених шин підстанції. З аналізу подібних досліджень попередніх авторів не одержали однозначного результату. У цих дослідженнях було підтверджено можливість виникнення таких ФРП, однак пошкоджувальність ТН під час таких процесів спостерігалась не завжди. Тому вирішили докладніше дослідити такий вид процесів.

Для оцінювання можливості виникнення ферорезонансних процесів було змодельовано спрощені схеми електричних мереж 6, 10 та 35 кВ зі встановленими різними типами ТН (НТМИ, НАМИ, НАМИ-Т, ЗНОМ) (рис. 1). Решту елементів електричної мережі під час розрахунків не враховувалось, оскільки попередні дослідження показали, що вони практично не впливають на можливість виникнення та характер перебігу ФРП.

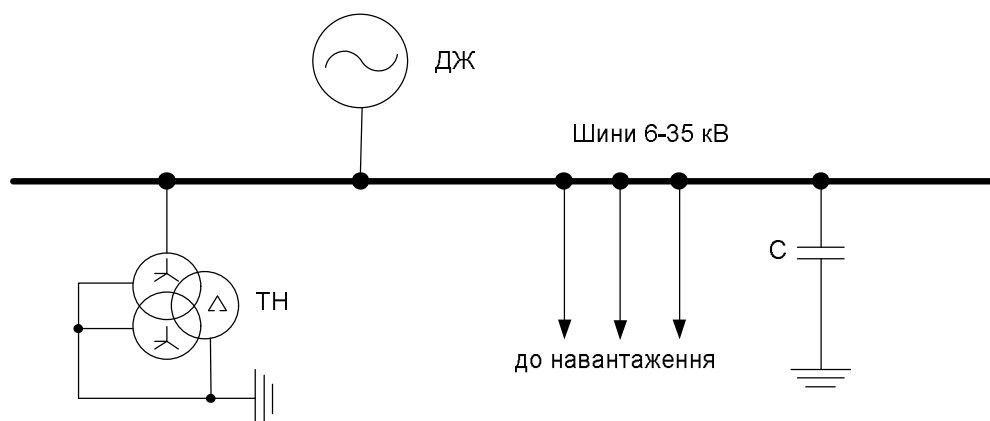


Рис. 1. Спрощена схема досліджуваної мережі

Для вищенаведених схем було створено розрахункові моделі (рис. 2), на яких здійснювали усі подальші розрахунки. Магнітну систему трансформаторів напруги моделювали за допомогою магнітних зв'язків із задавання характеристики намагнічування $\Psi(i)$.

На рис. 2 показано: С – еквівалентна ємність мережі, ТН – модель трансформатора напруги, ДЖ – модель джерела живлення, R – керований змінний опір, який дозволяє імітувати замикання

фази А на землю. Модель трансформатора напруги складається відповідно із моделі елементів високої сторони (ВН), низької основної (НН_{осн}) і додаткової (НН_{дод}) обмоток, магнітної системи (М).

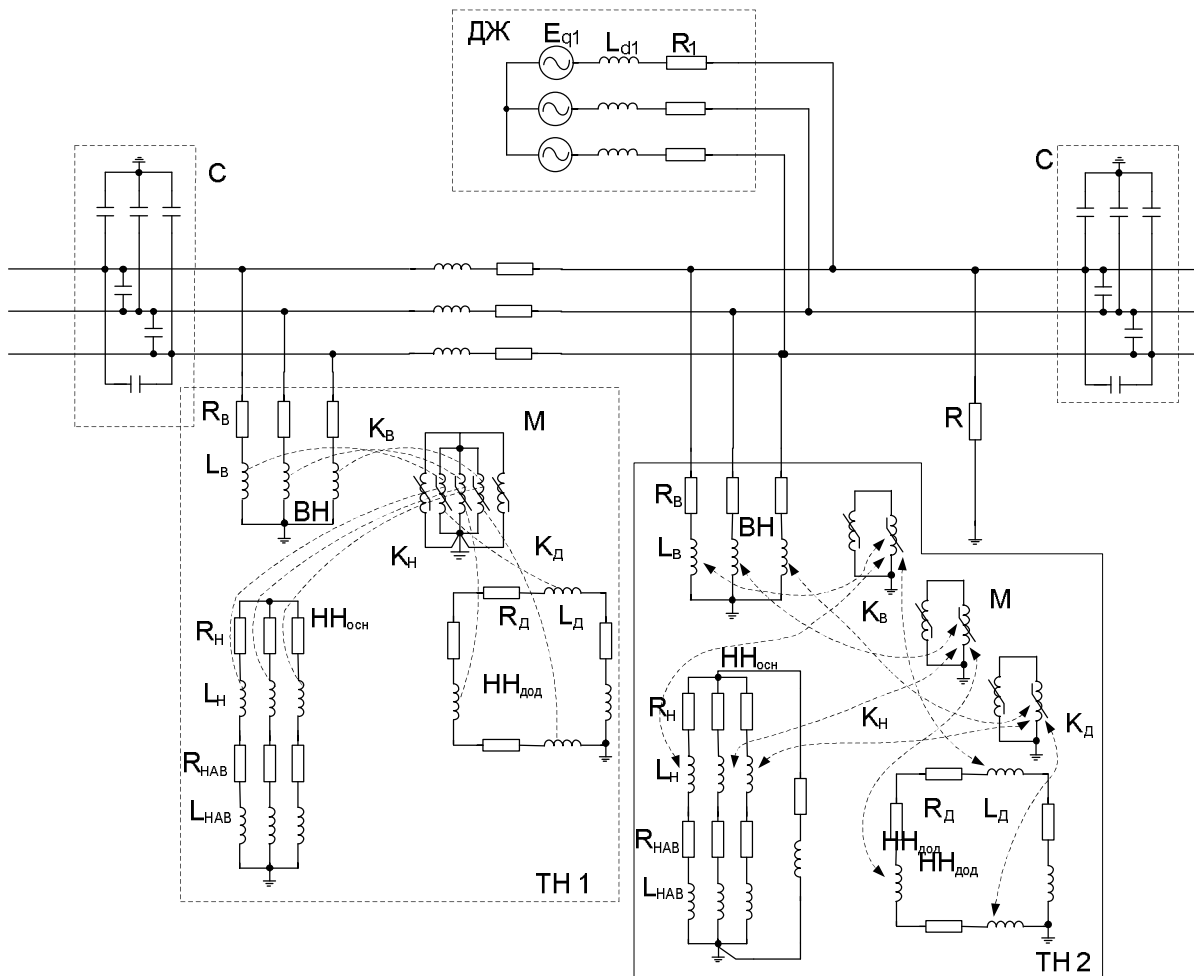


Рис. 2. Розрахункова модель мережі

Для досліджень на розрахунковій моделі імітували дугові та металеві замикання на землю, різноманітні комутації у мережі (ввімкнення та вимкнення ТН, силового трансформатора, шин на паралельну роботу) та оцінювалась можливість виникнення ФРП у мережі. Як показали результати досліджень у разі роботи мережі із ненавантаженими шинами ємнісний струм замикання на землю є малим. Такі умови виникають доволі рідко і можливі лише за живлення шин мережі без увімкнутих навантажень та ліній електропередавання. За таких співвідношень параметрів можливе виникнення ФРП на частоті мережі. На рис. 3 наведено найхарактерніші осцилограми для таких режимів роботи.

До того ж проведені дослідження підтвердили, що ФРП на частоті мережі також можуть бути небезпечними і можуть призводити до пошкодження ТН. Як бачимо з наведених нижче осцилограм, струми за такого ФРП також збільшуються до значень, більших ніж струми термічної стійкості обмоток, що й призводить до виходу з ладу ТН. Окрім того, кратності перенапруг можуть сягати 5-кратних значень, що становить високу небезпеку для ізоляції обладнання підстанції. Ферорезонанси на частоті мережі виникають для всіх типів досліджуваних трансформаторів напруги, окрім ЗНОМ-35.

Результати досліджень було зведено у табл. 1, де наведено діапазони ємнісних струмів замикання на землю та ємностей мережі, за яких можливе виникнення ФРП на частоті мережі для найпоширеніших типів ТН за різних рівнів напруги мережі.

Враховуючи проведені попередні дослідження [5, 6, 8], було встановлено, що найдієвішими способами боротьби з ФРП є вмикання гасильних резисторів в обмотку розімкненого трикутника трансформаторів напруги.

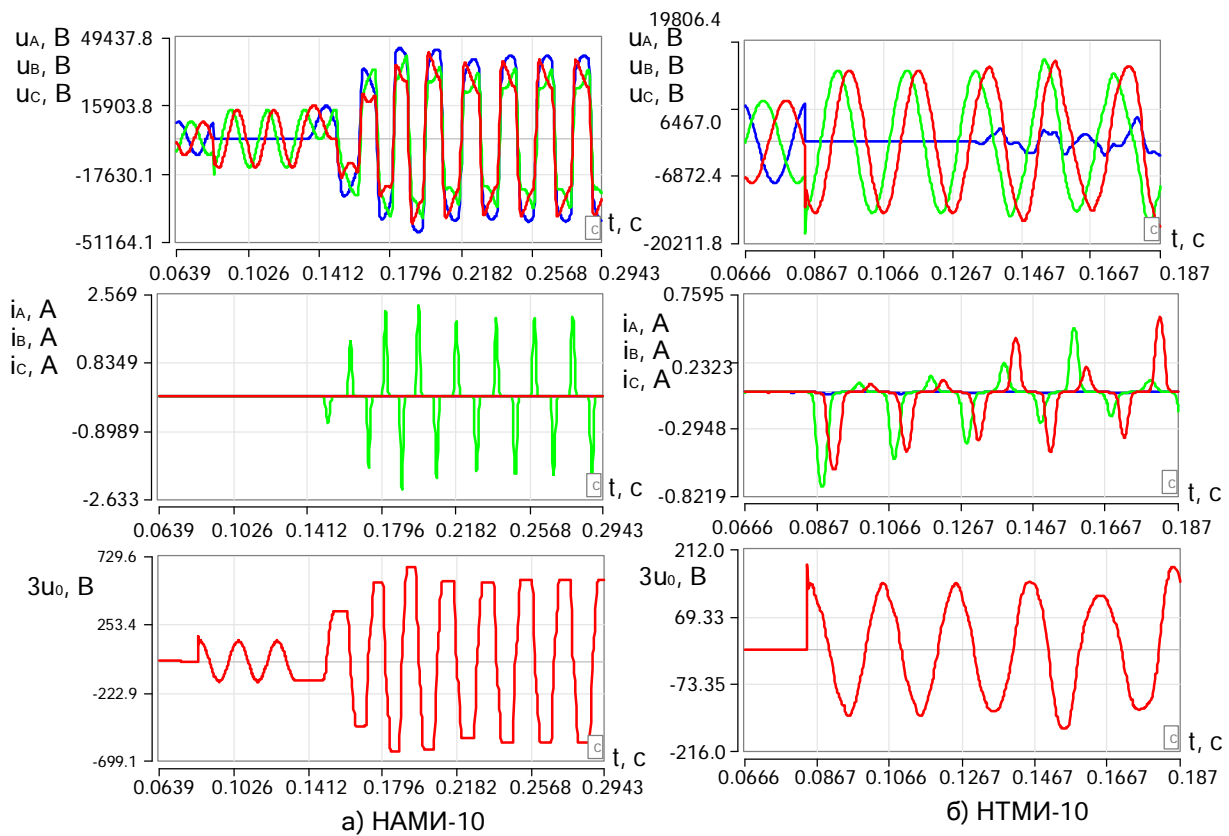


Рис. 3. Осцилограми ФРП на частоті мережі для різних типів ТН

Таблиця 1

Зони виникання ФРП на робочій частоті 50 Гц

Тип ТН	Кількість ТН		0,9U		U		1,15U	
			від	до	від	до	від	до
НТМИ-6	1	I, А	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,4
		C, мкФ	0,0306	0,0612	0,0306	0,0918	0,0306	0,1224
	2	I, А	0,2	0,4	0,2	0,6	0,2	0,8
		C, мкФ	0,0612	0,1224	0,0612	0,1836	0,0612	0,8
	3	I, А	0,3	0,6	0,3	0,9	0,3	1,2
		C, мкФ	0,0918	0,1836	0,0918	0,2754	0,0918	0,3672
НТМИ-10	1	I, А	0,2	0,3	0,25	0,35	0,25	0,4
		C, мкФ	0,0368	0,0552	0,0459	0,0644	0,0459	0,0736
	2	I, А	0,2	0,6	0,25	0,7	0,25	0,8
		C, мкФ	0,0368	0,1103	0,0459	0,129	0,0459	0,147
	3	I, А	0,2	0,9	0,25	1,05	0,25	1,2
		C, мкФ	0,0368	0,1655	0,0459	0,193	0,0459	0,221
НАМИ-10	1	I, А	0,1	0,2	0,1	0,25	0,1	0,25
		C, мкФ	0,01839	0,0368	0,01839	0,0459	0,01839	0,0459
	2	I, А	0,15	0,4	0,2	0,4	0,25	0,4
		C, мкФ	0,0276	0,0736	0,0368	0,0736	0,0459	0,0736
	3	I, А	0,15	0,45	0,2	0,6	0,25	0,6
		C, мкФ	0,0276	0,0828	0,0368	0,1103	0,0459	0,1103

Для схем досліджуваних ТН було визначено величини гасильних резисторів, що забезпечують гарантоване гасіння ФРП, який збуджується після обриву металевого замикання на землю. ГР у всіх дослідженнях вмикали до обмотки «розімкненого трикутника» ТН, оскільки цей спосіб в експлуатації найлегше застосовувати, і він не призводить до тривалих додаткових похибок під час вимірювання напруг трансформаторами напруги. Дослідження проведені для основних типів ТН, що встановлені в мережах з малими струмами замикання на землю для трьох класів напруг (6, 10, 35 кВ). Результати проведених досліджень наведені на рис. 4.

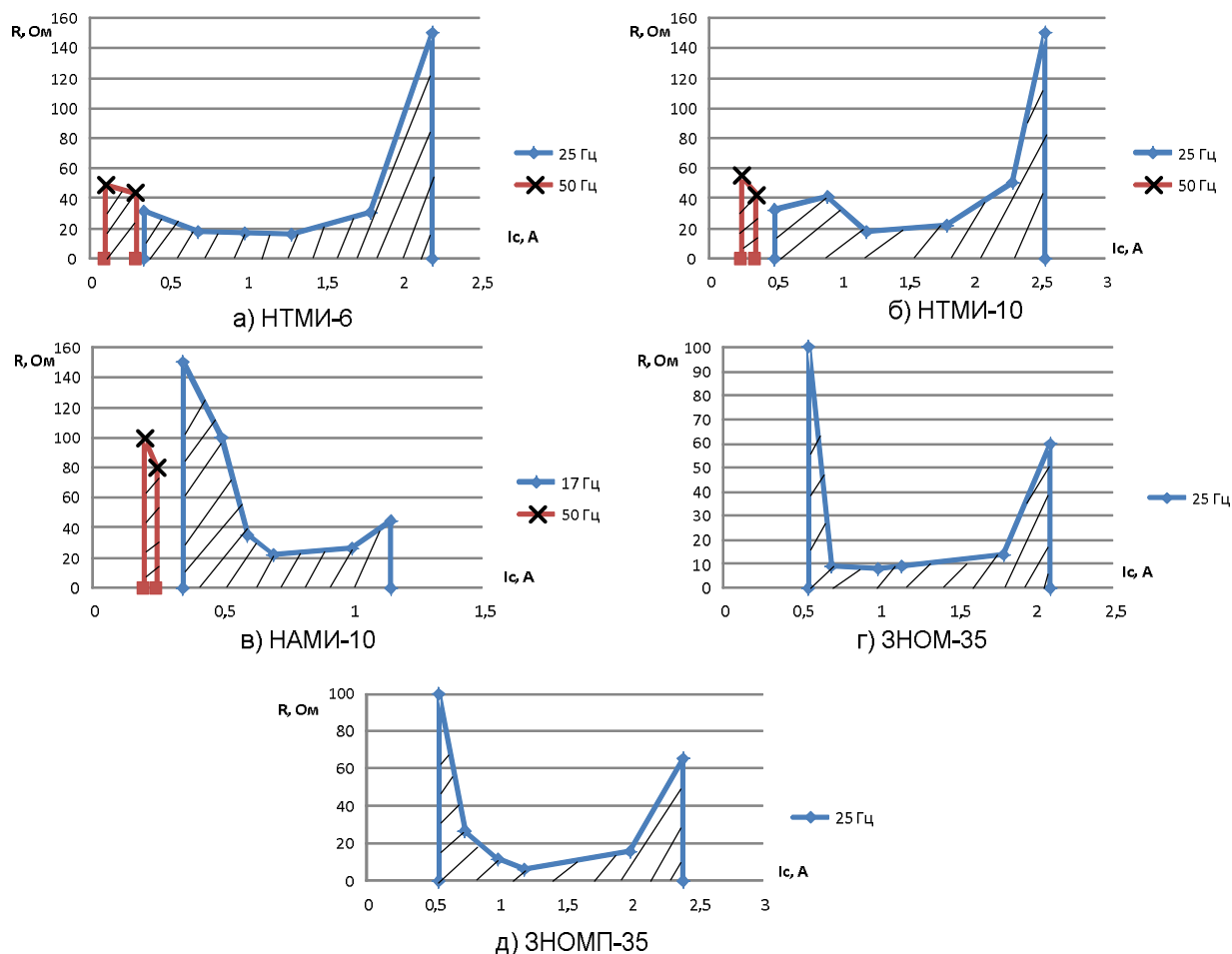


Рис. 4. Зони залежності опору гасильного резистора R від ємнісного струму мережі на землю

Проведені розрахунки показали, що ФРП з частотою 50 Гц буде гарантовано погашений гасильним резистором не більше ніж 40 Ом. Тому можна зробити висновок, що встановлення ГР 25 Ом (згідно з ПУЕ [7]) в обмотки розімкненого трикутника ТН забезпечить гарантований захист ТН від пошкоджень ФРП частотою 50 Гц. Для боротьби ж з субгармонійними ФРП величина цього ГР не є достатньою, тому потрібно вживати інші додаткові заходи.

Аналіз отриманих результатів (рис. 4) показує, що величини ГР, які гарантують зрив ФРП для різних типів ТН є різними, і вони залежать від ємності мережі. Як бачимо на граничних межах ємнісних струмів, за яких виникає ФРП, значення величин ГР є значно більшими, ніж для решти діапазону. Це пояснюється тим, що в цих випадках параметри ємності мережі та індуктивності трансформатора доволі розбіжні, а тому ФРП є нестійким і потрібно набагато менше енергії для його гасіння. Також, з рис. 2 видно, що величини ГР для мережі класом напруги 35 кВ є значно менші, ніж для мереж 6–10 кВ. Це можна пояснити тим, що запаси енергії в реактивних елементах мережі, як відомо, пропорційні до другого степеня робочої напруги мережі. За співвимірних значень реактивних параметрів у мережах з вищою робочою напругою для зриву ФРП буде

необхідна більша енергія ГР (менше значення опору ГР), а для мереж з меншою робочою напругою – відповідно менша енергія гасильних резисторів (більше значення опору ГР).

Значення ГР (рис. 4) наведені з розрахунку на один ТН. За наявності в мережі декількох ТН, кожен з них має бути оснащений своїм гасильним резистором.

Оскільки ФРП може виникати і після погасання дугових замикань, тому було проведено дослідження для оцінювання ефективності використання ГР у таких випадках. Дослідження було проведено також для різних типів ТН та різних класів напруг. Аналіз проведених досліджень показав, що використання ГР для зриву ФРП, що виник після погасання дуги (однополярної, двополярної, симетричної чи несиметричної) є ефективним та забезпечує зрив ФРП. Величини ГР, які гарантовано забезпечують зрив ФРП, є такі ж, як і для випадку збурення ФРП після обриву металевого замикання на землю. Як показують дослідження, величини ГР не залежать від передумов, через які був збурений ФРП (металеві – це замикання на землю, чи дугові), а більшою мірою залежать від ємності мережі, типу ТН тощо. Вищенаведені результати доводять, що використання пристрою захисту від ферорезонансу (ПЗФ) [6] забезпечує гарантований зрив і ФРП, що виникли після погасання дугових замикань на землю.

Для випадків виникнення ФРП за неповнофазних режимів роботи мережі застосування ГР є неефективним, як це показано раніше [9], тому ми в цій роботі не розглядали.

Висновки

Отже, підсумовуючи проведені дослідження, можна стверджувати, що виникнення ФРП на частоті мережі є не менш небезпечними, ніж субгармонійні ФРП, оскільки вони самі також супроводжуються перенапругами та надструмами та з часом можуть перерости у субгармонійні.

Для недопущення ФРП на частоті мережі достатньо використовувати резистор номіналом 25 Ом, який передбачений згідно з вимогами ПУЕ. Для субгармонійних ФРП величина ГР залежить від класу напруги мережі та типу ТН.

1. Ганус А. И. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ на характер поврежденных трансформаторов напряжения / А. И. Ганус, К. А. Старков // Энергетика і електрифікація. – 2006. – № 2. – С. 5–11. 2. Ганус А. И. Повреждаемость трансформаторов напряжения в обласных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по ее снижению / А. И. Ганус, К. А. Старков // Світлотехніка та електроенергетика. – 2003. – № 1. – С. 76–81. 3. Дударев Л. Е. Оценка эффективности защиты трансформаторов напряжения от токовых перегрузок / Л. Е. Дударев, И.В. Волошек // Электрические станции. – 1986. – № 11. – С. 65–69. 4. Журахівський А. В. Режимы работы трансформаторів напруги в електромережах з ізолюваною нейтраллю / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Електроінформ. – 2009. – № 1. – С. 8–11. 5. Журахівський А.В. Ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Технічна електродинаміка. – 2010. – №2. – С. 73–77. 6. Захист електричних мереж 6–35 кВ від ферорезонансних процесів / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С.70–76. 7. Правила улаштування електроустановок. – К. : Мінпаливенерго України, 2010. – 736 с. 8. Система захисту трансформаторів напруги від пошкоджень ферорезонансними процесами в електромережах з ізолюваною нейтраллю // А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк / Энергетика та електрифікація. – 2010. – № 12. – С. 52–57. 9. Феррорезонансные процессы с силовыми трансформаторами в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / А. В. Журахивский, Ю. А. Кенс, А.Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Энергетика и ТЭК. – 2014. – № 2. – С. 12–14.