

ВПЛИВ РЕЖИМУ НЕЙТРАЛІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ 6 – 35 кВ НА РІВНІ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ

© Яцейко А.Я., Козак К.В., 2013

На основі цифрового моделювання досліджено вплив режиму заземлення нейтралі електромережі 6–35 кВ на рівні дугових, комутаційних та ферорезонансних перенапруг. Показано, що на величини дугових перенапруг та на характер розвитку ферорезонансних процесів значно впливає режим заземлення нейтралі електромережі. Наведено графічні залежності кратностей дугових перенапруг від характеру горіння заземлюючої дуги, конфігурації електромережі та режиму заземлення нейтралі. Дослідження комутаційних перенапруг виконано на прикладі вимкнення електродвигунів 6 кВ та наведено залежності кратностей перенапруг від довжини живлячого кабеля, потужності та режиму роботи електродвигунів та електромережі.

Ключові слова: електромережа, дугова перенапруга, комутаційна перенапруга, ферорезонансний процес, цифрова модель, ізольована нейтраль, резонансно-заземлена нейтраль, резистивно-заземлена нейтраль, кратності перенапруг.

On the basis of computer simulation researched the influence of the grounding conditions of neutral of electrical network 35 kV on the level of arc, commutation, ferorezonansni overvoltage. Shown that the values of arc overvoltage and character development ferorezonans processes is significantly affected mode neutral grounding network. There were given schematic dependencies of arc overvoltage multiplicities which depend on the nature of combustion of grounding arc, grid configuration and the conditions of neutral grounding. Research commutation overvoltages performed on the example of electric motors 6 kV and are depending multiplicities overvoltages on the length of feeding cable, capacity and mode of work of electric motors and network.

Key words: electrical network, arc overvoltage, commutation overvoltage, ferorezonans process, digital model, isolated neutral, resonant grounding neutral, resistance grounding neutral, multiplicity of overvoltages.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Розподільчі мережі 6–35 кВ є найпротяжнішими з найбільш важким режимом роботи електроустановки щодо дії внутрішніх перенапруг. Найпоширенішими причинами аварійних пошкоджень в цих електромережах є дугові та комутаційні перенапруги, а також ферорезонансні процеси. Дугові замикання на землю є небезпечними не лише за своєю величиною, а й тривалістю, внаслідок чого може пошкоджуватись ізоляція електроустановки, пошкодження можуть переходити у дво- та трифазні короткі замикання. Комутаційні процеси в електромережах характеризуються, передусім, небезпечними величинами перенапруг. Особливо небезпечними є перенапруги, які розвиваються під час комутацій електродвигунів, які зараховують до електроустановки з полегшеною ізоляцією.

Що ж стосується ферорезонансних перенапруг, то основну небезпеку вони становлять не своєю величиною, а тривалістю ферорезонансного процесу та насиченням магнітної системи вимірювальних трансформаторів напруги. Внаслідок цього значно зростають струми у первинних обмотках трансформаторів напруги, що призводить до їх пошкоджень. Ферорезонансний процес триває доти, доки не розлаштується ферорезонансний контур. Цей процес може тривати декілька

хвилин і більше. Протягом цього часу постійно спрацьовуватимуть обмежувачі перенапруг нелінійні та може відбуватись їх термічне пошкодження.

Одним зі способів зменшення рівнів внутрішніх перенапруг в електромережах є зміна режиму заземлення нейтралі.

Електричні мережі 6–35 кВ можуть працювати в режимі з ізольованою, резистивно- та резонансно-заземленою нейтраллю [1]. Водночас, в науковому середовищі немає однозначної думки щодо застосування того чи іншого способу заземлення нейтралі. Це пов'язано з тим, що застосування електромереж з ізольованою та резонансно-заземленою нейтраллю має як переваги, так і значні недоліки, а досвід застосування резистивного заземлення нейтралі в електромережах України практично відсутній [2–5].

Задача досліджень

Задачею досліджень є аналіз впливу режиму заземлення нейтралі електромережі на рівні внутрішніх перенапруг.

Виклад основного матеріалу

Дослідження дугових перенапруг виконано на прикладі електромережі 35 кВ. Величина дугових перенапруг визначається моментом гасіння дуги струму замикання на землю. Існує три теорії горіння заземлюючої дуги: теорія Петерсена, теорія Петерса-Слепяна та теорія Белякова-Джуварли [6].

Дослідження величин дугових перенапруг виконано за допомогою цифрового моделювання на прикладі реальної електромережі 35 кВ, яка живиться від шин 35 кВ ПС Богородчани-110 з ємнісним струмом замикання на землю $I_C = 10$ А. Дугове замикання фази на землю змодельовано спрощено за допомогою керованої R-вітки, параметри якої змінювались відповідно до досліджуваного характеру горіння заземлюючої дуги. Зміна режиму заземлення нейтралі досліджуваної електромережі відбувалась шляхом увімкнення в нейтраль сторони 35 кВ живлячого силового трансформатора компенсаційної котушки системи Петерсена, або високоомного резистора опором $R=2000$ Ом.

На рис. 1 наведено залежності кратностей дугових перенапруг від величини ємнісного струму замикання на землю в досліджуваній електромережі 35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю за різних характерів горіння дуги.

На основі отриманих результатів (рис. 2) бачимо, що кратність перенапруг зростає із збільшенням ємнісного струму замикання фази на землю для кожного зі способів заземлення нейтралі. У мережі 35 кВ з ізольованою нейтраллю найбільша кратність перенапруг спостерігається за теорією Петерсена ($K = 6,534$), а для двох інших кратність дорівнює $K = 2,697$ (теорія Петерса-Слепяна), $K = 2,285$ (теорія Белякова-Джуварли). Також бачимо, що рівні перенапруг під час горіння дуги в ЕМ з ізольованою нейтраллю перевищують значення перенапруг для випадку резистивного заземлення нейтралі.

Виконано дослідження дугових перенапруг для випадку резонансного заземлення нейтралі. Зокрема досліджено вплив ступеня розкомпенсації ємнісного струму замикання на землю на величину дугових перенапруг.

Під час дослідження впливу ступеня компенсації ємнісного струму замикання на землю на кратність перенапруг, було взято конфігурацію електричної мережі, що відповідає чотирьом значенням ємнісних струмів замикання на землю ($I_C = 10$ А; 7 А; 5 А та 2 А) та за допомогою зміни параметрів компенсаційної котушки досліджено кратності перенапруг залежно від режиму перекомпенсації та недокомпенсації I_C .

На основі виконаного цифрового моделювання одержано графічні залежності (рис. 2) кратностей дугових перенапруг від ступеня розлаштування компенсації ємнісного струму замикання на землю та характеру горіння заземлюючої дуги в електромережі 35 кВ з резонансно-заземленою нейтраллю.

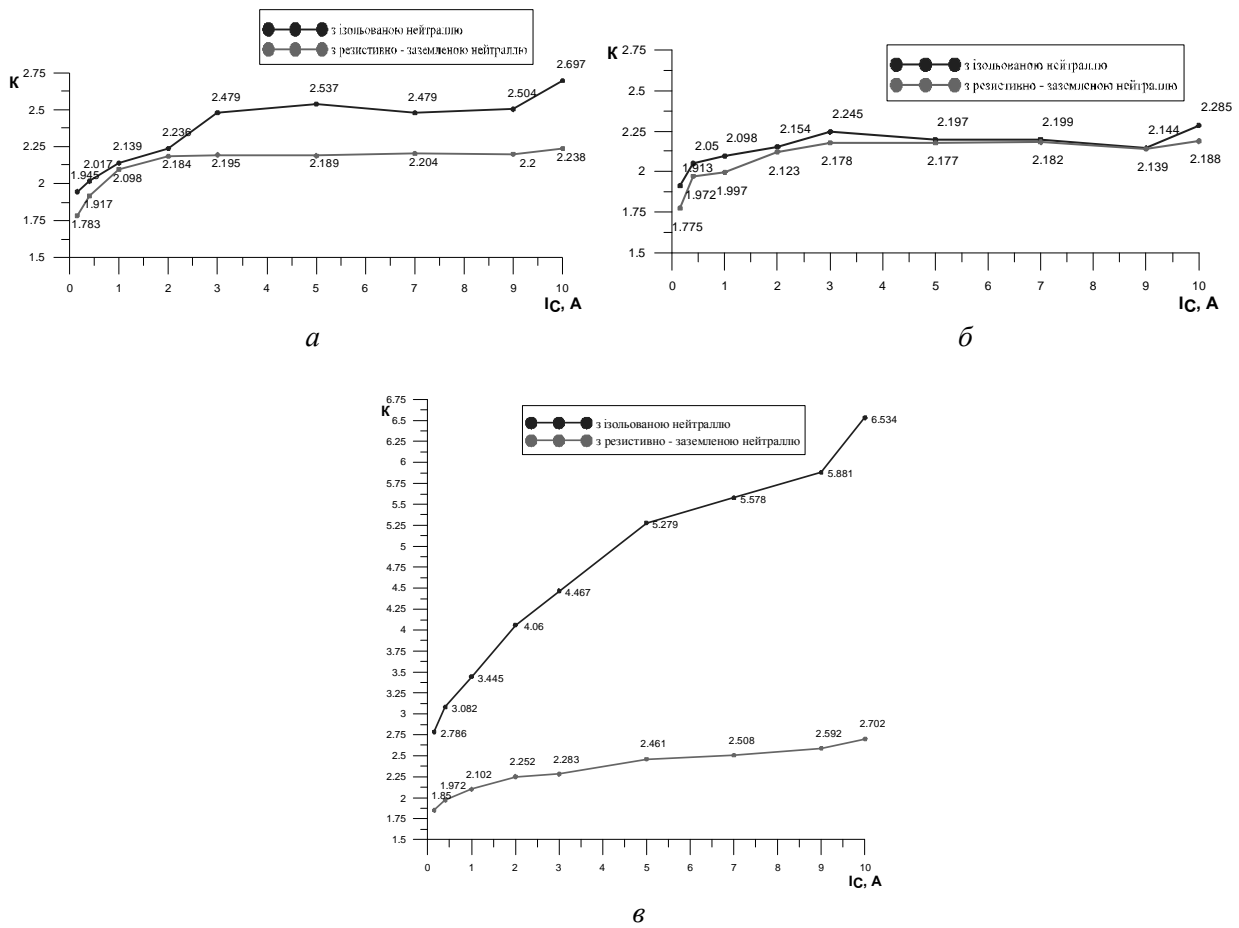


Рис. 1. Залежності кратностей дугових перенапруг від величини емнісного струму замикання фази на землю (конфігурації електромережі) в електромережі 35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю згідно з теоріями: а – Петерса-Слепяна; б – Белякова-Джуварли; в – Петерсена

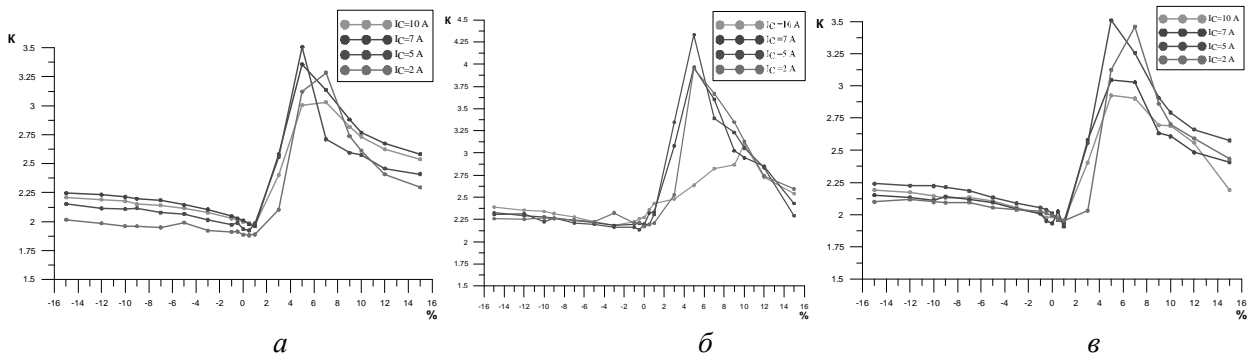


Рис. 2. Залежності кратностей дугових перенапруг від недокомпенсації та перекомпенсації емнісного струму замикання на землю в електромережі з резонансно-заземленою нейтраллю згідно з теоріями: а – Петерса-Слепяна; б – Петерсена; в – Белякова-Джуварли

Отже, бачимо, що за збільшення ступеня розкомпенсації I_c кратності перенапруг зростають. Найкраще це спостерігається під час горіння дуги за теорією Петерсена. Зокрема для значної перекомпенсації кратності перенапруг можуть зростати до $K = 4,331$. Також бачимо, що, якщо під час недокомпенсації I_c перенапруги зростають в межах 15 %, то при перекомпенсації – можуть зростати вдвічі, сягаючи чи навіть перевищуючи рівні відповідних перенапруг за роботи електромережі з ізольованою нейтраллю.

Аналіз ферорезонансних перенапруг виконано для цієї ж електромережі 35 кВ, яка живиться від шин 35 кВ ПС Богородчани-110. На шинах підстанцій 35 кВ досліджуваної електромережі встановлено сім трансформаторів напруги типу ЗНОМ-35, які можуть брати участь у виникненні ферорезонансного контуру [7]. Виконані дослідження ферорезонансних процесів для випадку роботи електромережі в режимі з ізольованою нейтраллю показують, що незалежно від конфігурації в цій електромережі виникатимуть стійкі ферорезонансні процеси. На рис. 3 наведено цифрограми напруг на системі шин, струмів первинних обмоток трансформаторів напруги та напруги обмотки розімкненого трикутника ТН.

Виконані також дослідження впливу на ферорезонансний процес вторинного навантаження ТН, які показують, що зі збільшенням навантаження вторинної обмотки ТН ЗНОМ–35 кВ кратності ферорезонансних перенапруг зростають (до $K = 1,954$), а зростання вторинного навантаження ТН в межах класу точності практично не впливає на характер розвитку ферорезонансу.

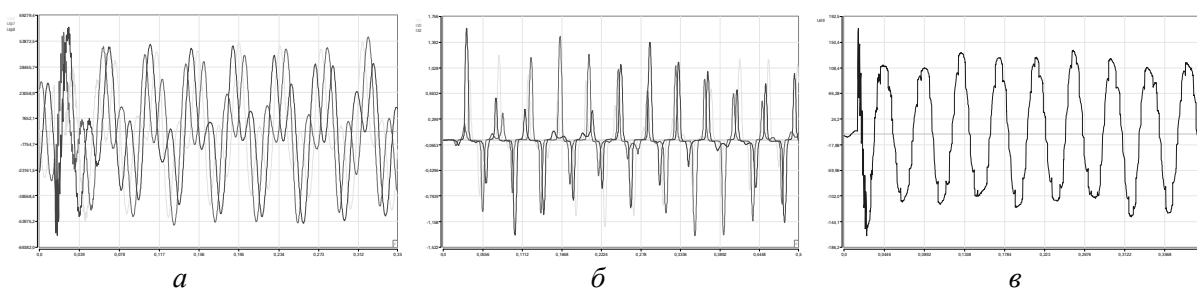


Рис. 3. Напруги на системі шин (а), струми первинних обмоток ТН (б), напруга обмотки розімкненого трикутника ТН (в) в електричній мережі 35 кВ з ізольованою нейтраллю

Дослідження ймовірності виникнення ФРП в електромережі для випадку резонансного та резистивного заземлення нейтралі показують, що ферорезонансні процеси не виникатимуть, а заземлення нейтралі через активний опір забезпечує швидше згасання перехідних процесів в електромережі. Цифрограми напруг і струмів під час перехідного процесу для резонансного та резистивного заземлення нейтралі наведені відповідно на рис. 4 та 5.

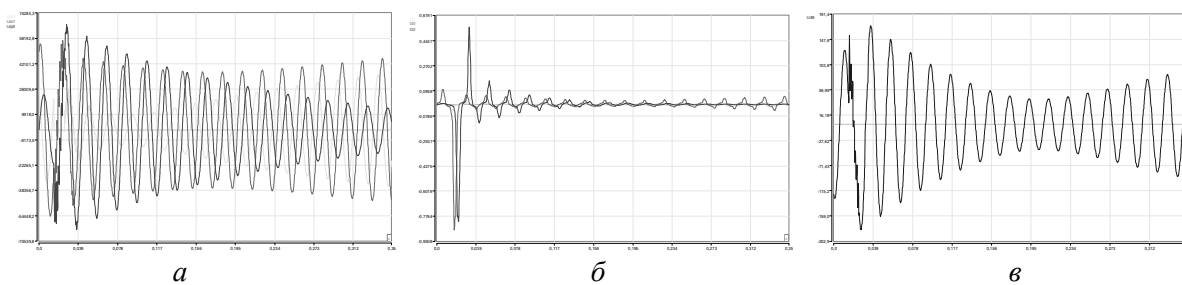


Рис. 4. Напруги на системі шин (а), струми первинних обмоток ТН (б), напруга обмотки розімкненого трикутника ТН (в) в електричній мережі 35 кВ з резонансно-заземленою нейтраллю

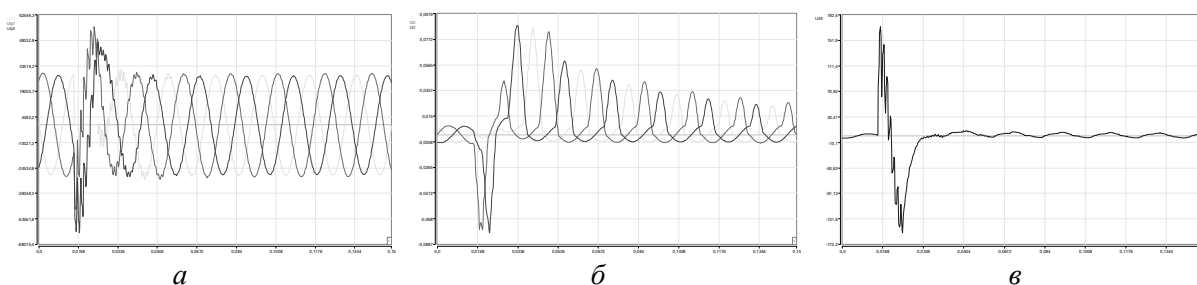


Рис. 5. Напруги на системі шин (а), струми первинних обмоток ТН (б), напруга обмотки розімкненого трикутника ТН (в) в електричній мережі 35 кВ з резистивно-заземленою нейтраллю

Аналіз комутаційних перенапруг виконано для випадку комутацій електродвигунів, що живляться від шин нижчої напруги (6 кВ) однієї з підстанцій досліджуваної електромережі 35 кВ. Комутаційні перенапруги, їх кратність під час вимкнення двигуна істотно залежать від параметрів двигуна, його навантаження, довжини кабельної лінії між двигуном та вимикачем, комутаційних властивостей вимикача – його здатності зрізати струм до нульового значення. Зазвичай, всі типи вимикачів, окрім вакуумних та елегазових, обривають струм у момент його протікання через нуль. Елегазовим та вакуумним вимикачам властивий процес вимкнення зі зрізами струму, що приводить до виникнення комутаційних перенапруг. Збільшення величини зрізу струму супроводжується зростанням рівня перенапруг.

Моделювання процесу вимкнення вимикачем струму двигуна виконане у такій послідовності. Для всіх фаз вимикача задавався час вимкнення (час розходження контактів вимикача) та величина струму зрізу 5 А. Якщо після вказаного часу струм двигуна через контакти вимикача досягав значення 5 А, то він приймав значення, що дорівнювало нулю, вимикалася одна фаза вимикача, а потім дві інші, або вимикалася друга фаза вимикача, а потім третя (у випадку замикання фази на землю біля двигуна). Одержана характерна осцилограма розвитку комутаційної перенапруги наведена на рис. 6.

Дослідження вимкнення двигуна виконано для таких умов: роботи електромережі з ізольованою, резонансно-заземленою та резистивно-заземленою нейтраллю; для нормального режиму роботи мережі; в мережі, приєднаній до шин, існує тривале замикання фази на землю. Вимкнення виконувалися під час номінального навантаження двигуна, відсутності навантаження на його валу та проміжних значеннях навантаження двигуна.

Виконані дослідження впливу режиму заземлення нейтралі електромережі 6 кВ показують, що спосіб організації заземлення нейтралі електромережі не впливає на характер розвитку та кратності перенапруг під час вимкнення електродвигунів.

На рис. 7, а наведено одержані залежності кратностей комутаційних перенапруг від довжини живлячого кабелю та режиму роботи електродвигуна, а на рис. 7, б – залежності кратностей комутаційних перенапруг від потужності електродвигуна та режиму його роботи.

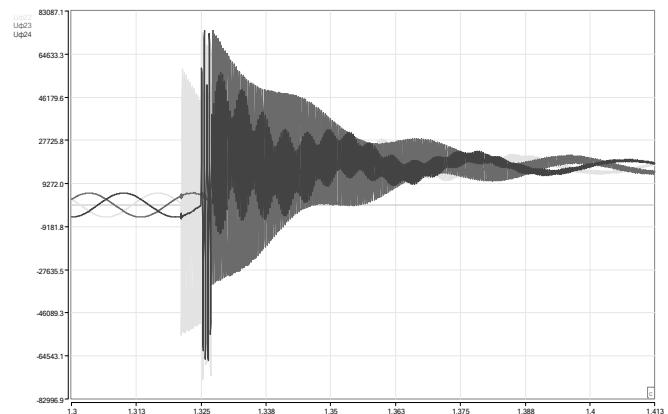
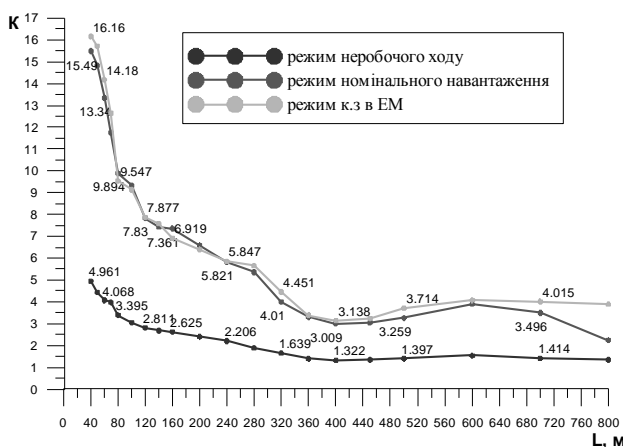
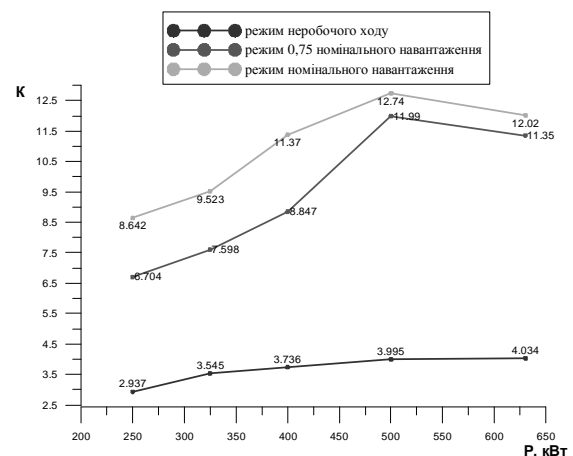


Рис. 6. Осцилограма розвитку перенапруги під час вимкнення електродвигуна 6 кВ



а



б

Рис. 7. Залежності кратностей комутаційних перенапруг від:
а – довжини живлячого кабелю та режиму роботи електродвигуна;
б – потужності електродвигуна та режиму його роботи

Аналіз одержаних залежностей (рис. 7), дозволяє зробити висновок про те, що кратність перенапруг знижується зі зростанням довжини живлячого кабеля для кожного з режимів роботи двигуна; зростання навантаження на валу двигуна чи виникнення однофазного замикання на землю призводять до істотного зростання перенапруг. Також значний вплив на величини комутаційних перенапруг має потужність електродвигуна, який комутується, з збільшенням потужності двигуна зростають величини перенапруг. Наведені значення кратностей перенапруг одержано для найважчих умов комутації електродвигуна.

Висновки

1. Виконані дослідження впливу режиму роботи нейтралі електромережі 6–35 кВ на кратності внутрішніх перенапруг дозволяють стверджувати, що режим роботи нейтралі впливає на рівні дугових та ферорезонансних перенапруг та не впливає на значення перенапруг під час комутацій електродвигунів.

2. Найбільші значення дугових перенапруг спостерігаються в електромережі з ізолюваною нейтраллю. Дослідження перенапруг за резонансного заземлення нейтралі показують, що значного зниження величин дугових перенапруг можна досягти лише для випадку практично ідеального резонансного налаштування. Аналіз режимів недокомпенсації і перекомпенсації для різних смісних струмів замикання на землю та різних характерів горіння заземлюючої дуги показує, що кратності перенапруг збільшуються зі зростанням розкомпенсації I_C . Особливо зростають дугові перенапруги під час перекомпенсації (приблизно вдвічі порівняно із резонансним налаштуванням), тому важливим є точне автоматичне налаштування дугогасної котушки. Щодо дотримання цієї вимоги в діючих електромережах, то виникають значні сумніви, оскільки в електричних мережах застосовуються дугогасні реактори або взагалі непридатні для автоматизації, або які не дозволяють забезпечити точного автоматичного налаштування дугогасної котушки.

3. Застосування високоомного резистивного заземлення нейтралі забезпечує значне зниження рівнів дугових перенапруг, практично до значень, безпечних для ізоляції електроустаткування незалежно від характеру горіння заземлюючої дуги та величини смісного струму замикання на землю (тобто конфігурації електромережі). Єдиним важливим недоліком високоомного резистивного заземлення є складність конструкції заземлюючого резистора, який повинен витримувати тривалу дію робочої фазної напруги електромережі, що обумовлює його високу вартість та необхідність експлуатаційного обслуговування.

4. Ферорезонансні процеси виникають в електромережі з ізолюваною нейтраллю та призводять до пошкоджень, насамперед, вимірювальних електромагнітних трансформаторів напруги та обмежувачів перенапруг нелінійних. Зростання вторинного навантаження трансформатора напруги в межах класу точності не призводить до згасання ферорезонансу, а навпаки, призводить до зростання перенапруг.

5. Експлуатація електричних мереж з резонансним або резистивним заземленням нейтралі забезпечує усунення явища ферорезонансу, причому, резонансне заземлення нейтралі сприяє швидшому та плавнішому згасанню перехідного процесу під час обриву замикання фази на землю.

6. Комутації електродвигунів супроводжуються перенапругами значних величин, які становлять серйозну небезпеку для ізоляції цих електричних машин, які виготовляються з полегшеною ізоляцією. На величини цих перенапруг впливають: характер комутації, довжина та параметри живлячого кабеля, тип двигуна, його вторинне навантаження та режим роботи електромережі.

7. За збільшення довжини живлячого кабелю кратність комутаційних перенапруг знижується незалежно від режиму роботи двигуна, а найбільша кратність перенапруг спостерігається під час накладання режиму комутації електродвигуна та роботи електромережі з замиканням фази на землю. Результати досліджень, впливу потужності електродвигуна на кратності комутаційних

перенапруг показують, що зі збільшенням потужності електродвигуна кратності перенапруг зростають і максимальних значень досягають за номінального навантаження на валу.

8. Режим роботи нейтралі електромережі не впливає на величини комутаційних перенапруг, тому для захисту електродвигунів необхідне застосування спеціальних організаційно-технічних заходів для обмеження перенапруг.

1. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Х.: Форт, 2009. – 736 с. 2. Сивокобыленко В.Ф., Дергилёв М.П., Лебедев В.К. Повышение надёжности работы электрических сетей с резистивно-заземлённой нейтралью // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук.пр. – Маріуполь, 2005.– Вип. 15. – Ч. 2. – С. 20–24. 3. Венрик Ю.Н., Лебедева С.Н., Петровский М.В. Перенапряжения в электрических сетях 6–35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – № 4. – С. 59–69. 4. Щеглов А.И., Целебровский Ю.В. Анализ осциллограмм токов и напряжений при однофазных дуговых замыканиях в сети 10 кВ с резистивным сопротивлением в нейтрали // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ: Труды второй Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2002. – 200 с. 5. Миронов И. Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ. Нужно ли отказываться от компенсации емкостного тока замыкания на землю?[Электронный ресурс] // Новости Электротехники. – 2003. – № 6(24) – Режим доступу до журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/>. 6. Гиндуллин Ф.А., Гольштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с. 7. Журахівський А.В., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я. Режимы работы трансформаторів напруги в електромережах з ізольованою нейтраллю // Електроінформ. – 2009. – № 1.– С. 8–11.