

УДК 621.314.02

А.Я. ЯЦЕЙКО (канд. техн. наук), К.В. КОЗАК, О.Б. ГОРОШКО  
Національний університет «Львівська політехніка»  
[yats80@mail.ru](mailto:yats80@mail.ru)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ РОБОТИ НЕЙТРАЛІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ 35 кВ НА РІВНІ ДУГОВИХ ПЕРЕНАПРУГ

*Досліджено вплив характеру розвитку та режиму заземлення нейтралі електромережі 35 кВ на рівні дугових перенапруг. На основі цифрового моделювання показано, що на величини дугових перенапруг значно впливає момент загоряння та згасання дуги. Наведено графічні залежності кратностей дугових перенапруг від характеру горіння заземлюючої дуги, конфігурації електромережі та режиму заземлення нейтралі.*

**Ключові слова:** електромережа, дугова перенапряга, цифрова модель, ізольована нейтраль, резонансно-заземлена нейтраль, резистивно-заземлена нейтраль, кратності перенапруг.

**Постановка проблеми.** В умовах постійного погіршення технічного стану основного силового обладнання, значна частина якого виробила свій ресурс, вірогідність і частота виникнення аварійних ситуацій різко зростає, що призводить до зниження якості і надійності електропостачання. Розподільчі мережі 6 – 35 кВ є найпротяжнішими з найбільш важким режимом роботи електроустановки щодо дії внутрішніх перенапруг. Тому від надійності їх роботи значною мірою залежить безаварійність електропостачання споживачів і експлуатаційна гнучкість функціонування енергосистеми в цілому, що особливо актуально в умовах постійного погіршення технічного стану електромереж через сильну зношеність ізоляції електроустановки.

**Аналіз останніх досліджень.** Електричні мережі 6 – 35 кВ можуть працювати в режимі з ізольованою, резистивно- та резонансно-заземленою нейтраллю [1]. Разом з тим, 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].

Переважаючим видом пошкодження в мережах 6 – 35 кВ є металеві або дугові однофазні замикання на землю – через перекидну дугу, які супроводжуються виникненням перенапруг. Останні становлять велику небезпеку тому, що крім термічного впливу дуги на елементи мережі виникають перенапруги, під впливом яких однофазні замикання можуть переходити у міжфазні короткі замикання.

**Задачею досліджень** є аналіз впливу характеру горіння заземлюючої дуги та режиму заземлення нейтралі електромережі на рівні дугових перенапруг.

**Виклад основного матеріалу.** Величина дугових перенапруг визначається моментом гасіння дуги струму замикання на землю. Про ці моменти, а саме про максимальну кратність перенапруг, існує три теорії: теорія Петерсена, теорія Петерса-Слепяна, та теорія Белякова-Джуварли [6]. Згідно теорії Петерсена, дуга встигає погаснути при першому ж переході через нуль струму вільних коливань перезарядки через дугу емностей непошкоджених фаз. Згідно цієї теорії, перенапруги не можуть рости безмежно, а мають верхню межу ( $\approx 7$ ). Таким чином, якщо дуга буде розвиватись по теорії Петерсена, то однофазне замикання на землю може призвести до пошкодження ізоляції інших фаз.

Згасання дуги за теорією Петерса-Слепяна настає в момент переходу струму робочої частоти 50 Гц через нульове значення. При цьому кратність перенапруг на пошкодженій фазі сягає 2,0, а в нейтралі – 2,2. Згідно теорії Белякова-Джуварли, визначений критерій можливості згасання дуги за час, близький до половини періоду робочої частоти, який необхідний для істотного наростання величини  $\Delta U_{0уст}$ . Згідно цієї теорії кінцеве згасання дуги через півперіод вільних коливань можливе лише в тому випадку, якщо величина піку згасання не перевищує певного визначеного критичного значення. Як виявилось, остатнє рівне  $U_{пр} = 0,4U_{фн}$  де  $U_{фн}$  – фазна номінальна напруга. Однак згідно теорії Белякова-Джуварли при дугових замиканнях найбільш можливий рівень перенапруг складає приблизно  $4,0U_{ф}$ .

Дослідження величин дугових перенапруг виконаємо за допомогою цифрового моделювання на прикладі реальної електромережі 35 кВ, яка живиться від шин 35 кВ ПС Богородчани-110 з емнісним струмом замикання на землю  $I_C = 10$  А. Використовуючи цифровий комплекс RE [7] на основі структурних моделей окремих елементів змодельовано електричну мережу 35 кВ для дослідження дугових перенапруг (рис. 1). Дугове замикання фази на землю змодельовано за допомогою керованої R-вітки, параметри якої змінювались відповідно до заданого характеру горіння заземлюючої дуги.

Цифрові моделі для дослідження дугових перенапруг в електромережі з резонансно-заземленою та з резистивно-заземленою нейтраллю відрізняються тим, що для резонансного заземлення в нейтраль силового трансформатора увімкнено компенсаційну котушку системи Петерсена, а для резистивного заземлення – увімкнено високоомний резистор опором  $R=2000$  Ом.

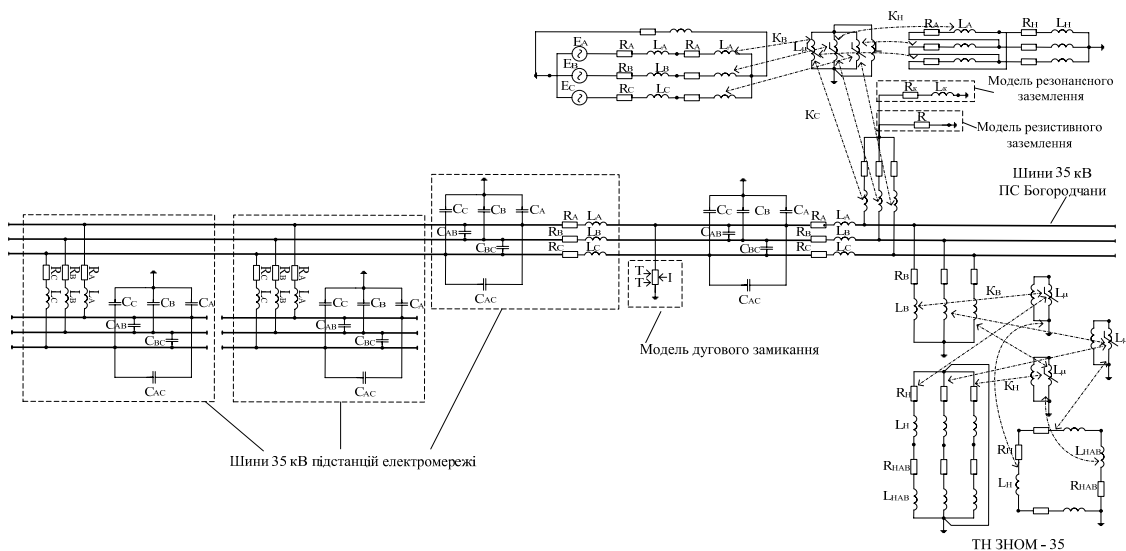


Рисунок 1 – Цифрова модель для дослідження дугових перенапруг в електричній мережі 35 кВ

На основі цифрової моделі (рис. 1) змодельовано різні процеси горіння заземлюючої дуги. Одержані цифрограми процесу горіння заземлюючої дуги, відповідно до різних теорій, в електромережі з ізолюваною нейтраллю наведено на рис. 2.

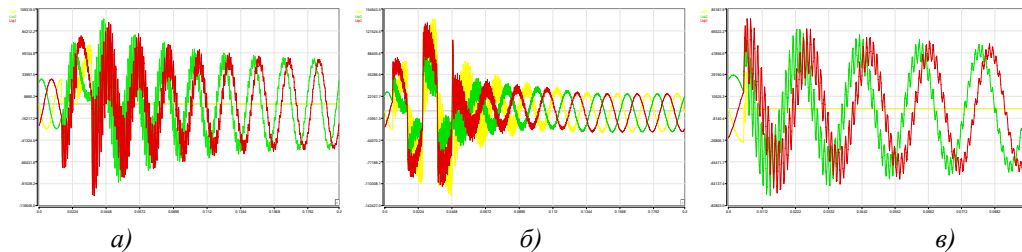


Рисунок 2 – Цифрограми розвитку дугових перенапруг відповідно до теорій: а) Петерса-Слепяна, б) Петерсена, в) Белякова-Джуварли

Досліджено залежність кратностей дугових перенапруг в електромережі 35 кВ для ізолюваної та резистивно-заземленої нейтралі від величини ємнісного струму замикання на землю (конфігурації електромережі) та характеру горіння заземлюючої дуги. На рис. 3 наведено залежності кратностей перенапруг від величини ємнісного струму замикання на землю в досліджуваній електромережі 35 кВ з ізолюваною та резистивно-заземленою нейтраллю при різних характерах горіння дуги.

На основі отриманих результатів (рис. 3) бачимо, що кратність перенапруг зростає із збільшенням ємнісного струму замикання фази на землю для кожного з способів заземлення нейтралі. В мережі 35 кВ з ізолюваною 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 ізолюваною нейтраллю перевищують значення перенапруг при резистивному заземленні нейтралі.

Також виконано дослідження дугових перенапруг для випадку резонансного заземлення нейтралі. Зокрема, досліджено вплив ступені розкомпенсації ємнісного струму замикання на землю на величину дугових перенапруг.

Під час дослідження впливу ступені компенсації ємнісного струму замикання на землю, на кратність перенапруг, було взято конфігурацію електричної мережі, що відповідає чотирьом значенням ємнісних струмів замикання на землю ( $I_C = 10 \text{ A}$ ;  $7 \text{ A}$ ;  $5 \text{ A}$  та  $2 \text{ A}$ ) 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. 4) кратностей дугових перенапруг від ступені розлаштування компенсації ємнісного струму замикання на землю та характеру горіння заземлюючої дуги в електромережі 35 кВ з резонансно-заземленою нейтраллю.

Отже, бачимо, що при збільшенні ступені розкомпенсації  $I_C$  кратності перенапруг зростають. Найкраще це спостерігається при горінні дуги за теорією Петерсена. Зокрема, при значній 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 при роботі електромережі з ізолюваною нейтраллю.

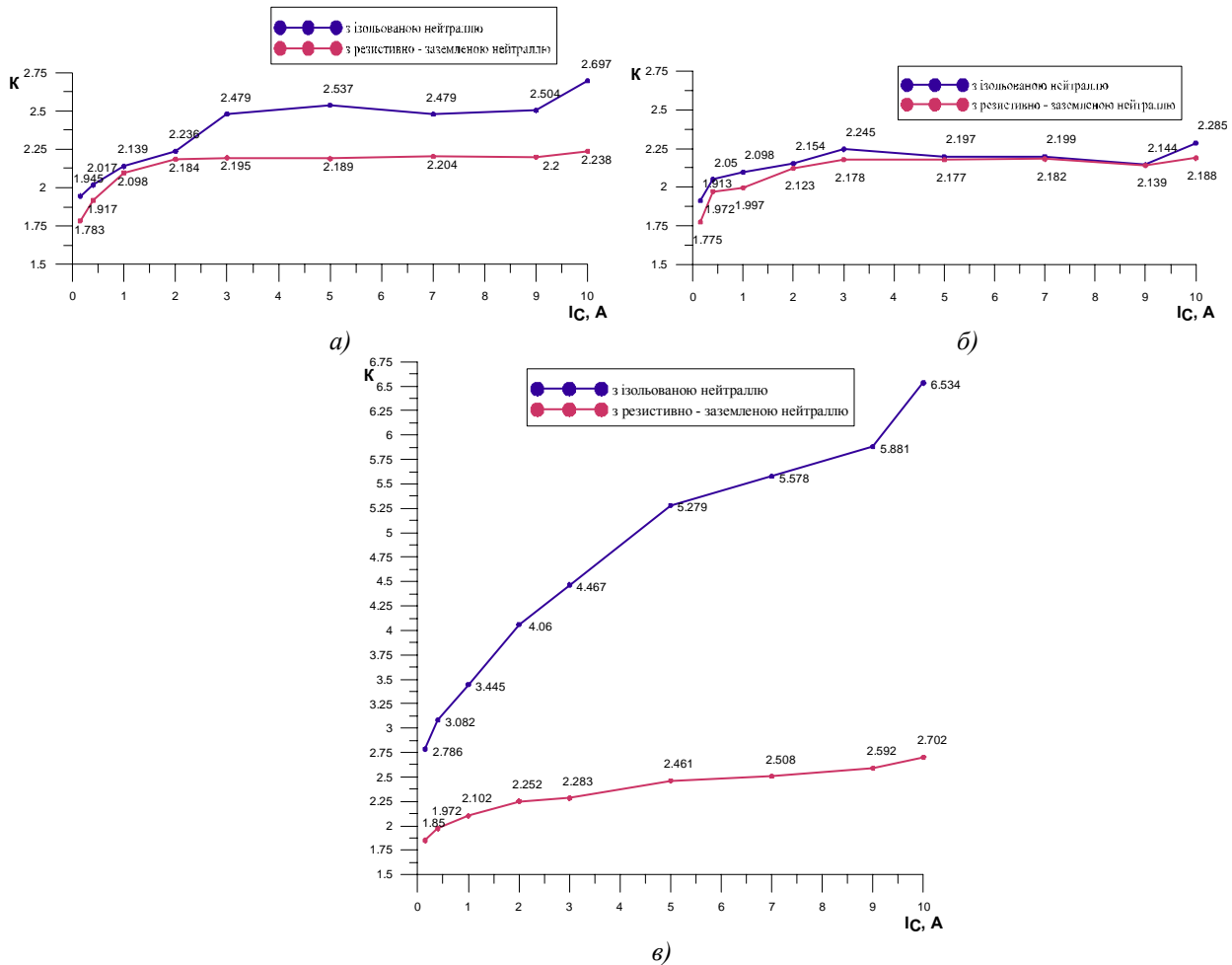


Рисунок 3 – Залежності кратностей дугових перенапруг від величини ємнісного струму замикання фази на землю (конфігурації електромережі) в електромережі 35 кВ з ізольованою та резистивно-заземленою нейтраллю згідно теорій: а) Петерса-Слепяна, б) Белякова-Джуварли, в) Петерсена

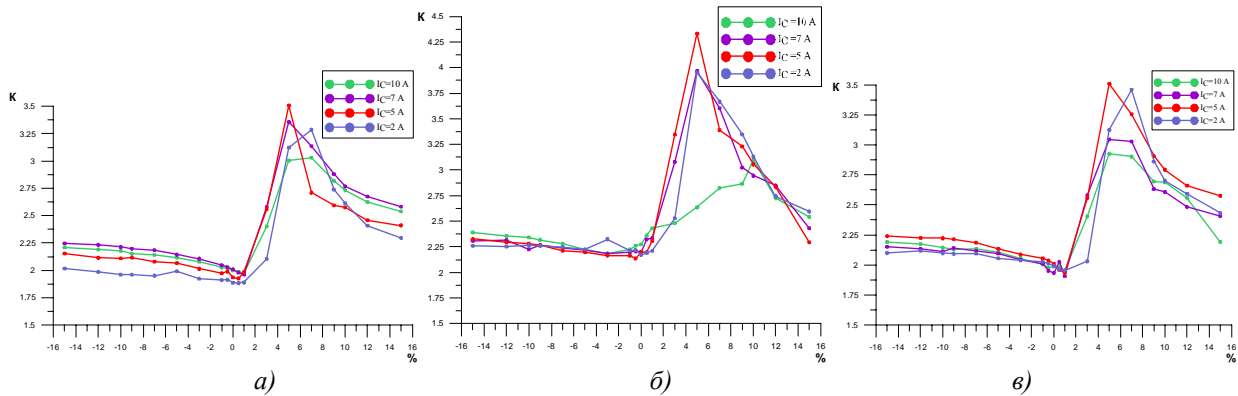


Рисунок 4 – Залежності кратностей дугових перенапруг від недокомпенсації та перекомпенсації ємнісного струму замикання на землю в електромережі з резонансно-заземленою нейтраллю згідно теорій: а) Петерса - Слепяна, б) Петерсена, в) Белякова-Джуварли

**Висновки.** 1. Виконані дослідження впливу режиму роботи нейтралі на кратності дугових перенапруг згідно різних теорій горіння заземлюючої дуги дозволяють стверджувати, що кратності перенапруг в мережі з ізольованою нейтраллю є більшими ніж в мережі з резистивно- та резонансно-заземленою нейтраллю. При збільшенні ємнісного струму замикання на землю кратність перенапруг зростає, а найбільші кратності перенапруг спостерігаються при горінні дуги за теорією Петерсена.

2. Провівши дослідження режимів недокомпенсації і перекомпенсації при заданих ємнісних струмах замикання на землю відносно трьох теорій, можна зробити висновки, що кратності перенапруг збільшуються під час розкомпенсації  $I_C$ , особливо зростають при 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. Одержані результати виконаних досліджень дозволяють стверджувати, що в електромережах 35 кВ з ізолюваною та резонансно-заземленою нейтраллю кратності дугових перенапруг можуть перевищувати значення випробувальних напруг для ізоляції електроустаткування, а тому необхідний спеціальний захист електроустаткування електромереж від дії дугових перенапруг.

4. 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 ємнісного 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.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Х.: Форт.- 2009.-736 с.
2. Сивокобыленко В.Ф. Повышение надёжности работы электрических сетей с резистивно-заземлённой нейтралью / В.Ф. Сивокобыленко, М.П. Дергилёв, В.К. Лебедев // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук.пр. – вип. 15. – ч.2. – Маріуполь.- 2005. – С.20-24.
3. Веприк Ю.Н. Перенапряжения в электрических сетях 6-35 кВ и современные средства их ограничения при замыканиях на землю / Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедева, М.В. Петровский // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки.- 2008. – №4.- С. 59-69.
4. Щеглов А.И. Анализ осциллограмм токов и напряжений при однофазных дуговых замыканиях в сети 10 кВ с резистивным сопротивлением в нейтрали / А.И. Щеглов, Ю.В. Целебровский // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтралей 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] / И. Миронов // “Новости Электротехники”.- 2003.-№6(24). – Режим доступа до журн.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/>
6. Гиндуллин Ф.А. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ / Ф.А. Гиндуллин, В.Г. Гольштейн, А.А. Дульзон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат.- 1989 – 192 с.
7. Равлик О., Гречин Т., Іваноньків В. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики // Вісник ДУ “Львівська політехніка” – 1997. - №340 – С. 96-101.

#### REFERENCES

1. *Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok* [Rules for Electrical Installation]. 2<sup>nd</sup> issue. Kharkiv: Fort, 2009. 736 p.
2. Syvokobylenko V.F., Dergylev M.P., Lebedev V.K. Improving the reliability of electrical networks with resistive - grounded neutral // *Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo tehniчного universytetu: Zb. nauk.pr.* – vyp. 15. – ch.2. – Mariupol. 2005; 20-24.
3. Vepryk Yu.N., Lebedka S.N., Petrovskiy M.V. *Overvoltage in networks 6-35 kV and modern means of their limitations during a ground fault* // *Visnyk SumDU. Seriya Tehnichni nauku.* 2008; №4: 59-69.
4. Shcheglov A.Y., Celebrovskiy Yu.V. Analysis of the current and voltage waveforms for single-phase arc fault in 10 kV network with a resistive impedance of the neutral // *Ogranychenye perenapryazheniy i rezhymy zazemleniya nejtraly setej 6–35 kV* [Overvoltage limitation and neutral grounding modes 6-35 kV networks]. – Novosybyrsk, 2002. 200 p.
5. Y. Myronov *Rezhym zazemleniya nejtraly v setyah 6-35 kV. Nuzhno li otkazyvatsya ot kompensatsyi emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu* [Elektronnyj resurs] [Neutral grounding mode networks 6-35 kV. whether to abandon the compensation capacitive current ground fault?] // “*Novosty Elektrotehnyky*” №6 (24), 2003. – Rezhym dostupu do zhurn.: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/>
6. Gyndullyn F.A., Golshtejn V.G., Dulzon A.A., Halylov F.H. *Perenapryazheniya v setyah 6 – 35 kV* [Overvoltage in networks 6 - 35 kV]. – М.: Energoatomizdat, 1989. 192 p.
7. Ravlyk O., Grechyn T., Ivanonkiv V. Digital complex for analysis and designing of relay protection devices and automatics // *Visnyk DU “Lvivska politehnika”.* 1997; №340: 96-101.

Надійшла до редакції 15.03.2013

Рецензент: М.В. Гребченко

А.Я. ЯЦЕЙКО, К.В. КОЗАК, О.Б. ГОРОШКО  
Национальный университет «Львовская политехника»

**Исследование влияния режима работы нейтрали электрической сети 35 кВ на уровни дуговых перенапряжений.** Исследовано влияние характера развития и режима заземления нейтрали электрической сети 35 кВ на уровни дуговых перенапряжений. На основе цифрового моделирования показано, что на уровни дуговых перенапряжений значительно влияет момент возгорания и гашения дуги. Приведены графические зависимости кратностей дуговых перенапряжений от характера горения заземляющей дуги, конфигурации сети и режима заземления нейтрали.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, дуговое перенапряжение, цифровая модель, изолированная нейтраль, резонансно-заземленная нейтраль, резистивно-заземленная нейтраль, кратности перенапряжений.

A. YATSEYKO, K. KOZAK, O. HOROSHKO  
National University "Lviv Politechnic"

**The Research of Influence of Neutral Conductor Working Conditions of Electrical Network 35kV on the Level of Arc Overvoltage.** It is researched the influence of the developmental character burning grounding arc and grounding conditions of neutral of electrical network 35 kV on the level of arc overvoltage. On the basis of computer simulation it is shown that the character of arc overvoltage is significantly affected by the time of ignition and extinction of the arc. There were given schematic dependencies of arc overvoltage multiplicities which depend on the nature of combustion of grounding arc and the conditions of neutral grounding. On the basis of results it can be seen that multiplicity of overvoltage increases with increasing of capacitive current's closing phase for each of the methods of neutral grounding. In 35 kV network with isolated neutral the largest multiplicity overvoltage is observed due to the theory by Petersen ( $K = 6.534$ ), and for two another ones multiplicity is  $K = 2.697$  (theory of Peters/ Slepyan),  $K = 2.285$  (theory of Belyakov-Dzhuvarly). Also we may notice that the level of overvoltages during arcing in EN with isolated neutral exceed the overvoltage in resistive neutral grounding. There was made a research on arc overvoltages for the case of resonant neutral grounding. In particular, it was researched the influence of decompensation degree on capacitive current closing phase of land on the magnitude of arc overvoltage. The results show that increase of the decompensation degree of  $I_c$  brings to increasing of multiplicity of overvoltage. The best example is in in the burning arc theory of Petersen. In particular, overcompensation with considerable multiplicity of overvoltages can rise to  $K = 4.331$ . Also we can be seen that during a considerable undercompensation  $I_c$  overvoltages increase within 15%, the overcompensation can increase twice or even exceed the level of corresponding overvoltages of electricity network within an isolated neutral, so there is a need of special protection from the effects of electrical power arc overvoltages. The use of high-resistance neutral grounding resistor provides a significant reduction in levels of arc overvoltage, almost to the levels needed for safe electrical isolation irrespective of the burning arc and level of grounded capacitive current (i.e. configuration of electrical network). The only significant drawback of resistive grounding is complication of grounding resistor construction, which has to withstand long-term effect of the working phase of voltage power supply, and this is the cause of its high price and the need for maintenance.

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