

# Дослідження перенапруг під час дугових замикань на землю в електромережах 35 кВ

Андрій Яцейко, Олег Горошко

Кафедра електричних систем та мереж, Національний університет "Львівська політехніка", УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 28а, E-mail: gob7a@ukr.net

**Abstract** – In this article it is researched the influence of grounding conditions of neutral of electrical network 35 kV on the level of arc overvoltage due to the theory by: Petersen, Peters - Slep'yan and Belyakov – Dzhuvarylly. There were given schematic dependencies of arc overvoltage multiplicities which depend on neutral grounding, given main schematic dependencies of combustion of grounding arc. It is shown that values of arc overvoltages significantly increased with increasing of the value of the capacitive current in the electrical network. Combined condition of neutral grounding reduces the level of arc overvoltages the best. Multiplicity does not exceed 2.4 for all theories for various values of capacitive current.

Ключові слова – електромережа, дугова перенапруга, цифрова модель, ізольована нейтраль, резонансно-заземлена нейтраль, резистивно-заземлена нейтраль, кратності перенапруг.

## I. Вступ

Одним з ефективних засобів зниження аварійності мереж 35 кВ є застосування комплексу заходів обмеження перенапруг [1]. Правильно побудовані засоби захисту від перенапруг запобігають пошкодженню ізоляційних конструкцій і електроустаткування, знижують спрацювання комутаційної апаратури. Захист підстанцій та їх обладнання від перенапруг є завданням більш складним, ніж захист від грозових перенапруг ліній електропередавання. Це пояснюється тим, що:

- 1) ізоляція електроустаткування підстанції, як правило, відноситься до категорії невідновлюваних;
- 2) на підстанціях встановлюється більш відповідальне та дороге обладнання, ніж на лініях електропередавання;
- 3) відключення лінії, зазвичай, не є причиною погашення підстанції, а пошкодження ізоляції підстанційного обладнання може призвести до тривалого перерви електропостачання споживачів.

Важливим фактором є наявність в експлуатації великого відсотка електрообладнання, яке свій ресурс відпрацювало і має послаблену ізоляцію [2 - 3].

Значну небезпеку для електроустаткування електромереж 6-35 кВ становлять перенапруги під час горіння заземлюючих дуг при виникненні однофазних замикань на землю. Ці процеси є небезпечні частотою виникнення в електромережах, своєю тривалістю та величинами перенапруг.

З урахуванням викладеного, дана стаття присвячена дослідженню дугових перенапруг в мережах 35 кВ та аналізу факторів що дозволяють знизити кратності цих перенапруг. Задачею дослідження є аналіз величин дугових перенапруг залежно від характеру горіння заземлюючої дуги та оцінка впливу режиму роботи нейтралі на кратності цих перенапруг.

## II. Цифрова модель

Усі дослідження, результатами яких подані у даній роботі, вкочані за допомогою цифрової моделювання на основі моделі електромережі напругою 35 кВ, створеної в програмному комплексі RE [4] (Рис. 1). Дана модель відтворює електромережу 35 кВ, в яку входять лінії електропередавання, шини, силовий триобитковий трансформатор 110/35/10 кВ та вимірний трансформатор напруги типу ЗНОМ – 35.

Згідно ПУЕ [5] електромережі 35 кВ можуть працювати в режимі ізольованої, резонансно-заземленої, резистивно-заземленої нейтралі, а також можливе застосування комбінованого заземлення нейтралі. Тому з метою моделювання різних режимів роботи нейтралі електромережі в нейтраль обмотки 35 кВ силового трансформатора через керовані ключі під'єднано резистор і котушку індуктивності, які, відповідно, моделюють заземлювальний резистор і дугогасний реактор (Рис. 1).

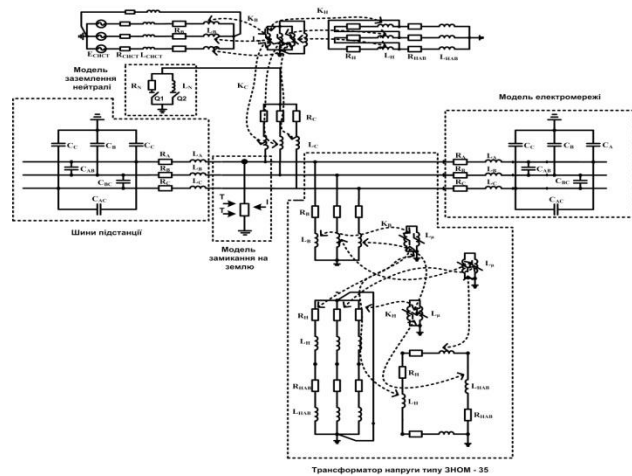


Рис. 1. Модель електромережі

Величини дугових перенапруг визначаються характером горіння заземлюючої дуги під час однофазного замикання на землю. У літературі існує три теорії щодо моментів гасіння та загоряння заземлюючої дуги: теорія Петерсена, теорія Петерса-Слепяна і теорія Белякова-Джуварли [6]. За першою теорією дуга загасає при першому проходженні струму вільних коливань через нуль. За другою теорією дуга згасає при проходженні через нуль емнісного струму замикання на землю промислової частоти. Згідно з теорією 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  $U_{пг} = 0,4U_{фн}$  де  $U_{фн}$  – фазна номінальна напруга.

Відповідно до вищесказаного, за допомогою імітації у визначені моменти часу процесів загоряння та згасання було змодельовано три способи горіння заземлюючої дуги.

За допомогою сформованої цифрової моделі виконано дослідження рівнів дугових перенапруг залежно від характеру горіння завземляючої дуги та способу заземлення нейтралі електромережі 35 кВ.

### III. Аналіз перенапруг для мережі із ізольованою нейтраллю

Під час аналізу дугових перенапруг в мережі, що працює в режимі ізольованої нейтралі ключі Q1 і Q2 на рис.1 вимкнені. Результати виконаних розрахунків наведені на Рис.2. Характерні цифрограми горіння завземлюючої дуги зображені на Рис.3.

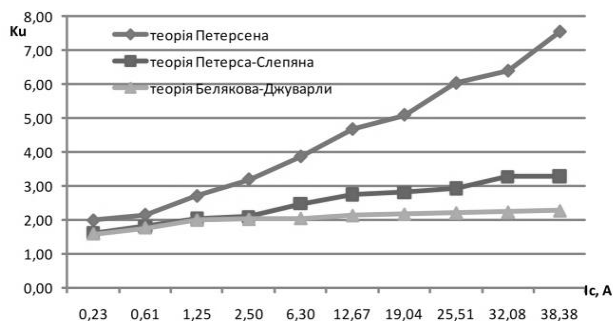


Рис. 2. Залежності кратностей дугових перенапруг в мережі із ізольованою нейтраллю від характеру горіння дуги та величини ємнісного струму замикавання на землю

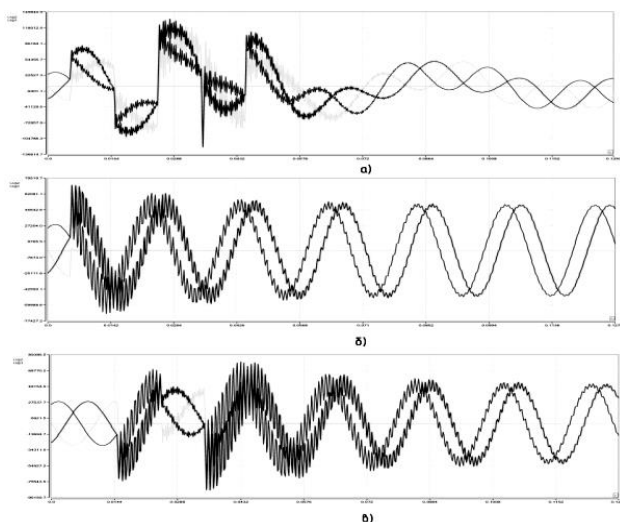


Рис. 3. Характерні цифрограми перенапруг для ємнісного струму  $I_C = 6,3$  А для теорій: а) Петерсена, б) Белякова-Джуварли, в) Петерса-Слепяна

Як бачимо із одержаних результатів, найбільші кратності перенапруг спостерігаються для випадку горіння дуги за теорією Петерсена (в даному випадку 7,5). Для всіх теорій горіння дуги характерно: із ростом ємнісного струму замикавання на землю (характеризує протяжність та розгалуженість електромережі) досить помітно зростають значення перенапруг.

З метою врахування впливу погодних умов (наприклад, підвищена вологість повітря чи дощ) на величини перенапруг було досліджено рівнів перенапруг залежно від величини активної складової струму спливу

через ізоляцію електромережі. Для цього в модель електромережі вводились такі зміни: паралельно ємностям вмикались резистори, які моделюють активну провідність. Величина опору резистора залежить від того, яка частина струму, що протікає через ємність, протікатиме через резистор (від 0,5 до 10% від ємнісного струму).

Оскільки паралельно ємнісним провідностям вмикаються активні, то із збільшенням значень останніх кратності перенапруг повинні частково знизитись, оскільки стала часу розряду ємностей зменшується і заряд із ємностей стікатиме швидше. Це видно із наведених на Рис.4 графічних залежностей.

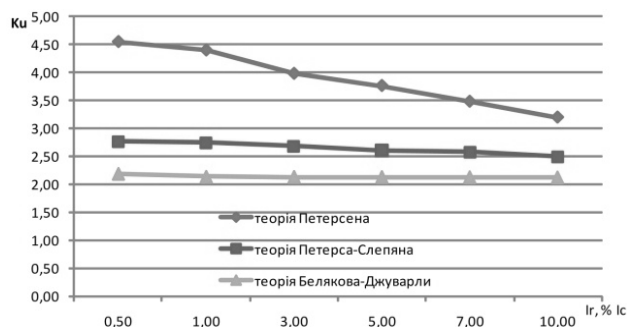


Рис. 4. Залежності кратностей дугових перенапруг в мережі із ізольованою від характеру горіння дуги та величини активних втрат в ізоляції для ємнісного струму замикавання  $I_C = 12,63$  А

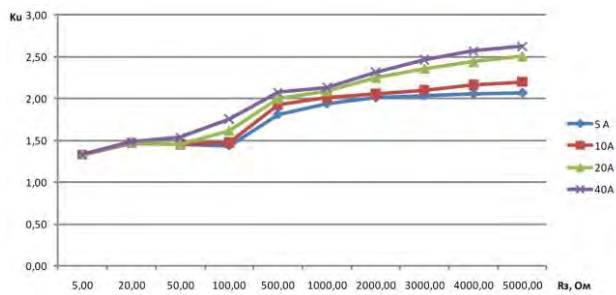
### IV. Аналіз перенапруг для мережі із резистивно-заземленою нейтраллю

Існує два способи організації резистивного заземлення нейтралі електромережі – низькоомне та високоомне. Застосування низькоомного заземлення нейтралі призводить до необхідності негайного вимкнення пошкодженої ділянки, внаслідок чого втрачається основна перевага електромереж з ізольованою нейтраллю – можливість тривалої роботи з однофазним замиканням на землю.

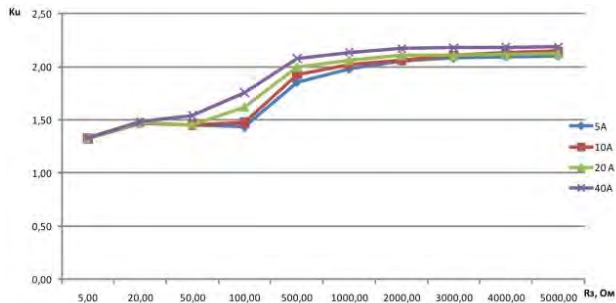
Увімкнений в нейтраль трансформатора високоомний резистор помітно знижує кратності перенапруг до 2,2...2,5. Якщо величина опору резистора вибрана за формулою (1), то стала часу стікання заряду нульової послідовності зменшиться і складатиме майже півперіоду промислової частоти ( $T = 0,01$  с), що забезпечує його майже повне стікання за час від моменту самопогасання дуги до моменту виникнення максимальної напруги на пошкодженій фазі, яка близька до значення фазної напруги.

$$R_N = \frac{1}{900 \cdot C} \quad (1)$$

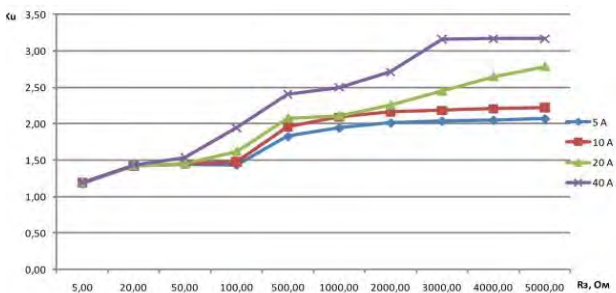
В цифровій моделі Рис.1 резистивне заземлення нейтралі електромережі імітуємо замиканням ключа Q1. Були виконані дослідження кратностей дугових перенапруг для різних величин опору заземлюючого резистора ( $R_z$  від 5 до 5000 Ом) та різних значень ємнісного струму замикавання на землю в електромережі. Одержані результати наведені на Рис.5.



а)



б)



в)

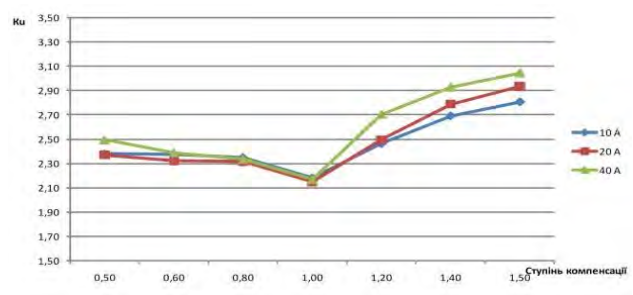
Рис. 5. Залежності кратностей перенапруг від  $R_з$  під час горіння дуги за теорією:

а) Петерса–Слепяна; б) Беялкова–Джуварли; в) Петерсена

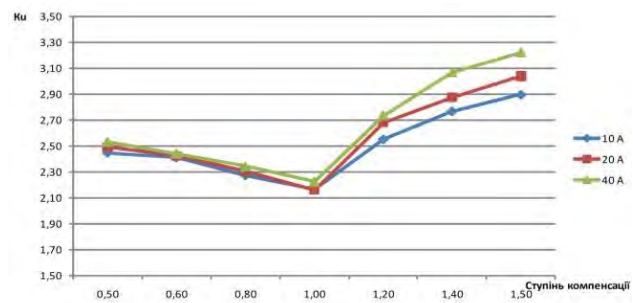
Як бачимо, кратності перенапруг зменшились в усіх випадках: для різних значень емнісного струму та різних теорій горіння дуги. Найбільшу кратність спостерігаємо за теорією Петерсена для емнісного струму 40 А:  $K_u = 3,17$ . Для двох інших теорій при значеннях емнісного струму 40 А кратності перенапруг знаходяться в межах 2...2,6. Також бачимо, що із ростом величини опору заземлюючого резистора значення перенапруг зростають, тому важливим є вибір оптимальної величини цього резистора.

## V. Аналіз перенапруг для мережі із нейтраллю заземленою через дугогасний реактор

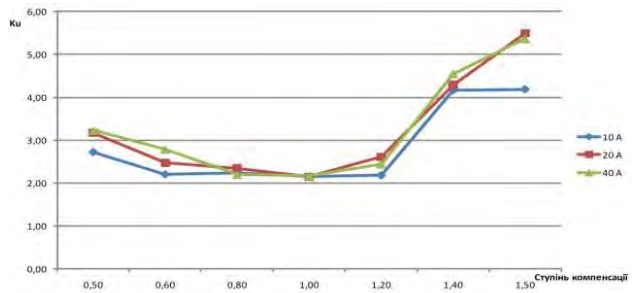
Також були проведені дослідження кратностей перенапруг для різних теорій, значень емнісних струмів та різного ступені компенсації емнісного струму замикання на землю у випадку резонансного заземлення нейтралі. Для моделювання резонансного заземлення нейтралі в схемі Рис.1 ключ Q2 замикався. Результати виконаних розрахунків наведені на Рис.6.



а)



б)



в)

Рис. 6. Залежності кратностей перенапруг при заземленні нейтралі через дугогасний реактор для різних значень емнісного струму від ступеня компенсації за теорією:

а) Петерса–Слепяна; б) Беялкова–Джуварли; в) Петерсена

За результатами досліджень бачимо, що незалежно від характеру горіння заземлюючої дуги, найменші кратності перенапруг ( $\approx 2,15$ ) спостерігаються лише при резонансному налаштуванні заземлюючого реактора, а недокомпенсація та перекомпенсація призводять до зростання рівнів перенапруг. Причому, при перекомпенсації емнісного струму замикання на землю спостерігаємо значне зростання перенапруг. Наприклад, за теорією Петерсена ми бачимо яскраву залежність кратностей перенапруг від ступеня компенсації: максимальна кратність перенапруг при недокомпенсації становить 3,23, а при перекомпенсації – 5,5.

## VI. Аналіз перенапруг для мережі із комбінованим заземленням нейтралі

Для імітації цього режиму роботи нейтралі в схемі Рис.1 замикаються обидва ключі Q1 та Q2. Дослідження перенапруг проведені також для всіх теорій горіння дуги, різних значень емнісного струму замикання на землю і різного ступеня компенсації емнісного струму.

Величина опору заземлюючого резистора, увімкненого паралельно до реактора, обиралась за формулою (2).

$$R_N = \frac{U_0}{\Delta I_C} \quad (2)$$

Результати розрахунків наведені на Рис. 7.

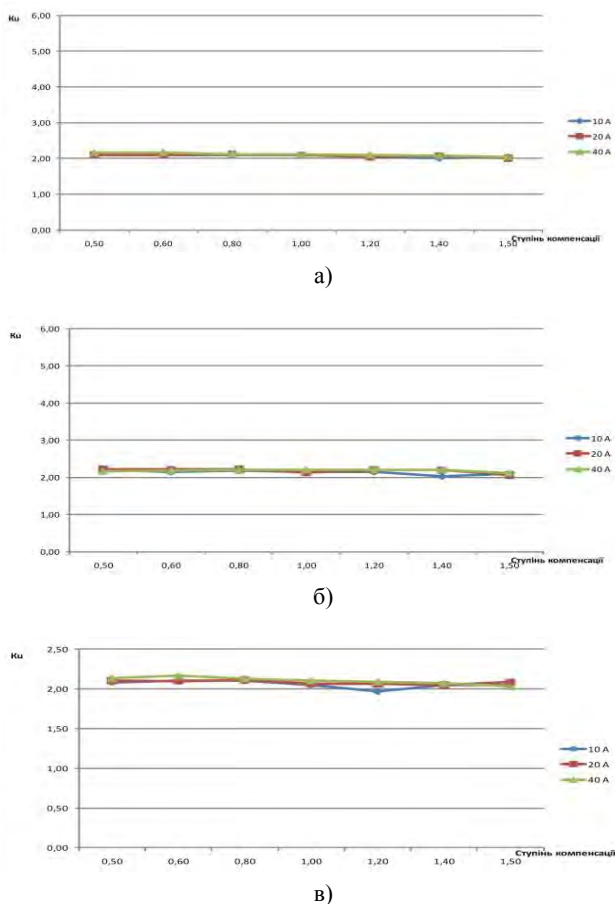


Рис. 7. Залежності кратностей перенапруг при комбінованому заземленні для різних значень ємнісного струму та ступеня компенсації за теорією: а) Петерса-Слепяна; б) Белякова-Джуварли; в) Петерсена

Результати підтверджують, що за застосування комбінованого заземлення нейтралі у всіх досліджених випадках кратності перенапруг не перевищують значення 2,4 незалежно від ступені компенсації ємнісного струму замикання на землю.

## ВИСНОВКИ

Результати дають нам змогу зробити ряд висновків:

- 1) перенапруги в мережах із ізольованою нейтраллю зростають із ростом ємнісного струму. Найбільші кратності становлять: за теорією Петерсена 7,54, за теорією Белякова – Джуварли 2,27, за теорією Петерса – Слепяна 3,29;
- 2) при врахуванні погодних умов кратності перенапруг із ростом активної провідності зменшуються і

становлять: за теорією Петерсена з 4,67 до 3,19, за теорією Белякова – Джуварли з 2,18 до 2,12, за теорією Петерса – Слепяна з 2,76 до 2,49 при врахуванні 10% активної провідності;

3) резистивне заземлення нейтралі помітно знижує кратності перенапруг, а для теорії Петерсена максимальні кратності перенапруг зменшуються більш ніж вдвічі;

4) заземлення нейтралі через дугогасний реактор також ефективно знижує рівні дугових перенапруг, але при розлаштуванні компенсації може спостерігатись значний ріст перенапруг, особливо при перекомпенсації;

5) комбіноване заземлення нейтралі найефективніше знижує рівні дугових перенапруг незалежно від значення ємнісного струму замикання на землю та ступеня розкомпенсації, а кратності перенапруг не перевищують 2,4 для усіх трьох теорій горіння дуги.

## References

- [1] V. F. Sy'vokobylenko, M. P. Dergy'lev, V. K. Lebedev "Povysheny'e nadezhnosti' raboty elektry'chesky'h setej s rezystivno-zazemlennoj nejtral'yu" ["Improving the reliability of electrical networks with resistance-grounded neutral"], Visnyk Pry'azov'skogo derzhavnogo tehničnogo universytetu - Journal of Azov State Technical University, vol. 15, no. 2, pp. 20-24, 2005.
- [2] Yu. N. Vepryk, S. N. Lebedka, M. V. Petrovskiy "Perenapryazheniya v elektrycheskyh setyah 6-35 kV i sovremennye sredstva yih ogranycheniya pry zamykaniyah na zemlyu" ["The surges in electrical networks 6-35 kV and modern means of limiting earth fault"], Visnyk SumDU. Seriya Tehnichni nauky' - Journal of SumSU. Series of technical science, vol. 4, pp. 59-69, 2008.
- [3] Y. Myronov Rezhym zazemleniya nejtraly v setyah 6-35 kV. Nuzhno li otkazyvatsya ot kompensaciyi emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu [Mode of neutral grounding in networks 6-35 kV. Do we have to give up the compensation capacitor current ground fault?], Novosti Elektrotehnyky – Electrical news vol. 6(24), 2003. – Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/>. [Accessed: Feb. 10, 2013].
- [4] O. Ravlyk, T. Hrechyn, V. Ivanonkiv "Tsyfrovyy kompleks dlia analizu roboty ta proektuvannia prystroiv releinoho zakhystu i avtomatyky" ["Digital system for analysis and design of relay protection and automation"], Visnyk DU "Lvivska politekhnika" – JournalSU "Lviv Polytechnic", vol. 340, pp. 96-101, 1997.
- [5] Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for Electrical Installation] Edition 4, Kharkiv: Vydavnytstvo "Fort" Publ., 2011.
- [6] F. A. Gyndullyn, V. G. Golshtejn, A. A. Dulzon, F. H. Halylov, Perenapryazheniya v setyah 6 – 35 kV [Overvoltages in the electrical networks 6 – 35 kV]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989.