

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ
НАПРУГ В НИЗЬКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

А.Ф. Жаркін*, чл.- кор.НАН України, **С.О. Палачов****, канд.техн.наук,
А.Г. Пазєєв***, канд.техн.наук, **Д.О. Малахатка******, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: zhark@ied.org.ua

Розглянуто шляхи пошуку оптимальних способів покращення якості електричної енергії в електричних мережах з розосередженим несиметричним навантаженням за допомогою фільтрів струмів нульової послідовності, які враховують можливість забезпечення бажаних показників з мінімальними витратами, особливості роботи в аварійних режимах та умови забезпечення електробезпеки споживачів. Проведено відповідні розрахунки за допомогою імітаційного моделювання. Бібл. 6, рис. 4.

Ключові слова: якість електроенергії, несиметрія напруг, фільтр струмів нульової послідовності, аварійні режими, безпека.

Вступ. Особливістю забезпечення належної якості електричної енергії в розподільних мережах є те, що можливість дотримання електропостачальником норм стандартів для більшості показників якості напруги знаходиться у прямому зв'язку з дотриманням споживачами граничних значень рівня емісії для основних типів завод: гармонік струму, коливання напруги і флікера, а також несиметрії напруг. Світовий досвід показує, що дотримання норм стандарту з якості напруги електропостачання для всіх без виключення споживачів не є доцільним, оскільки може призводити до неприпустимого підвищення вартості електропостачання, що може не влаштовувати значну частину споживачів у даній мережі, обладнання яких має достатню заводостійкість. В таких випадках окремі споживачі, обладнання яких має високий рівень чутливості до якості напруги електропостачання, вимушені застосовувати індивідуальні або групові засоби її покращення.

Метою роботи є визначення шляхів досягнення оптимальних показників несиметрії фазних напруг в розподільній низьковольтній мережі зі споживачами, що мають обладнання з різним рівнем чутливості до якості напруги.

Основний зміст. Проектування електричних мереж передбачає вибір перерізу силових провідників розподільних мереж на основі дотримання одночасно двох критеріїв: за допустимим струмом провідника та за допустимими втратами напруги від розподільного трансформатора до найвіддаленішої точки мережі. Однак на практиці другий критерій не завжди враховується належним чином, внаслідок чого в розподільних мережах низької напруги з великою кількістю і потужністю однофазних споживачів відхилення напруги електропостачання в часи пік може бути значно більше встановленого стандартами рівня. Крім того, в розподільних мережах з побутовими споживачами дуже складно дотриматися рівномірного навантаження всіх фаз. Наслідком цього є суттєве збільшення струму в нульовому провіднику, який до того ж, зазвичай, має менший переріз, ніж лінійні. У той же час падіння напруг на провідниках від розподільного трансформатора до точки приєднання споживача спричиняють появу значної несиметрії трифазних напруг.

Задля визначення кількісних характеристик несиметрії напруг ГОСТ 13109-97 встановлює два показники – коефіцієнти несиметрії за зворотною – K_{2U} та за нульовою послідовністю K_{0U} , які розраховуються як відношення відповідних симетричних складових системи трифазних напруг до складової прямої послідовності. Відповідно до вимог ГОСТ 13109-97 значення 2% для обох показників можуть бути перевищені тільки в 5% випадків від кількості вимірювань впродовж тижня. До речі, міжнародний стандарт EN 50160:2010 нормує тільки один показник несиметрії – K_{2U} .

Теоретично для системи трифазних напруг, що мають допустимі відхилення від їхнього номінального значення: +5%, 0%, -5% та однакові кути зсуву фаз (по 120^0) значення коефіцієнтів K_{0U}

© Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Пазєєв А.Г., Малахатка Д.О., 2020
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901>; ** <https://orcid.org/0000-0002-4502-1724>;
*** <https://orcid.org/0000-0003-1944-4114>; **** <https://orcid.org/0000-0003-0515-5450>

і K_{2U} дорівнює приблизно 2,9%. Але внаслідок зсуву нейтралі в системі трифазних напруг і нерівності кутів зсуву фаз показник K_{0U} може досягати значно більшого значення, ніж K_{2U} , тому в даній роботі розглядаються шляхи зниження саме коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю.

Одним з ефективних способів зниження напруги нульової послідовності є створення для споживача або групи споживачів власної малопотужної локальної трифазної мережі зі штучною нейтраллю [1], наприклад, шляхом застосування фільтра струмів нульової послідовності у вигляді трансформатора зі схемою з'єднання обмоток «зустрічний зигзаг» [2]. Для даного випадку значення модуля опору нульової послідовності зазначеного фільтра можна розрахувати за виразом

$$|Z_0| = U_0 / I_0 = 220 \cdot K_{0U} / I_0,$$

де 220 – номінальне значення фазної напруги мережі; U_0 – допустиме значення напруги нульової послідовності; I_0 – струм нульової послідовності несиметричного навантаження, що дорівнює 1/3 від суми фазних струмів.

На основі даних щодо потужності і $\cos\varphi_N$ несиметричного навантаження споживача можна розрахувати значення струму нульової послідовності

$$I_0 = \frac{P_A(\cos\varphi_{HA} + j\sin\varphi_{HA})}{3U_A \cdot \cos\varphi_{HA}} + \frac{P_B[\cos(\varphi_{HB} - \varphi_{AB}) + j\sin(\varphi_{HB} - \varphi_{AB})]}{3U_B \cdot \cos\varphi_{HB}} + \frac{P_C[\cos(\varphi_{HC} - \varphi_{AC}) + j\sin(\varphi_{HC} - \varphi_{AC})]}{3U_C \cdot \cos\varphi_{HC}},$$

де U_A, U_B, U_C – значення відповідних фазних напруг; P_A, P_B, P_C – активні потужності однофазного лінійного навантаження у фазах; $\varphi_{HA}, \varphi_{HB}, \varphi_{HC}$ – кути між фазними напругами і струмами у відповідних фазах; $\varphi_{AB}, \varphi_{AC}$ – кути між векторами фазних напруг в точці приєднання споживача.

Особливістю даного способу є те, що показник K_{0U} в даній локальній мережі буде визначатися тільки параметрами навантаження та опором нульової послідовності фільтра, значення якого може бути відносно великим, що спрощує його конструкцію та робить вартість низькою. Крім того в аварійних режимах мережі, наприклад, у випадку обриву однієї з фаз, струмове перенавантаження обмоток фільтра буде відсутнє [3]. Недоліком є необхідність прокладання окремого РЕ-провідника заземлення задля забезпечення безпеки від ураження струмом у випадку пробією ізоляції на корпус.

Іншим розповсюдженим способом покращення показника K_{0U} є приєднання зазначених фільтрів до нульового провідника розподільної мережі [4, 5]. Перевагою даного способу є те, що заземлення обладнання споживача може бути виконано за стандартною схемою TN-C-S, а недоліком – залежність показників несиметрії не тільки від опору фільтра, але і від параметрів навантаження всіх споживачів в даній мережі, опору мережі в точках їхнього приєднання та місця розташування фільтра. Суттєвий вплив розосередженого несиметричного навантаження в мережі на показник K_{0U} призводить до необхідності мати більш низьке значення опору фільтра, ніж в попередньому випадку. Також слід враховувати, що у разі обриву однієї з фаз мережі буде мати місце струмове перенавантаження обмоток фільтра, що має бути передбачено роботою системи автоматичного захисту.

Задля розрахунку показників K_{0U} в мережі з п'ятьма однаковими послідовно підключеними блоками несиметричного навантаження для різних топологій підключення до неї фільтрів струмів нульової послідовності (з різними параметрами) було використано імітаційне моделювання в Matlab-Simulink. На рис. 1 наведено частину загальної моделі, яка не показує повторювані блоки навантаження і вимірювання, а фільтр струмів нульової послідовності різної складності конструкції, який приєднується до мережі шістьма різними способами, представлено блоком «Grounding Transformer». Значення параметрів опору прямої і нульової послідовностей розподільного трансформатора потужністю 250 кВА зі схемою з'єднання обмоток «зірка-зірка з нулем», що наведено в [6], задано в блоці «Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0». Відрізки трифазної чотирипровідної лінії з алюмінієвих проводів перерізом 150 мм² для лінійних та 70 мм² – для нульового провідників з довжиною 500 м між трансформатором та послідовно підключеними до мережі споживачами моделюються за допомогою блоків «Лінія-» з опором (0,1 +j0,01) Ом та «Лінія-N» з опором (0,2 +j0,01) Ом. Кожен з 5-х однакових блоків несиметричного навантаження з потужністю в фазі 2,55 кВт, 3,64 кВт та 1,45 кВт відповідно, що приєднано до розподільної мережі за допомогою фідерів з опором (0,1 +j0,01) Ом, моделюється трьома однофазними блоками «Parallel RLC Load».

Результати розрахунків показників K_{0U} у всіх вузлах навантаження N у разі підключення фільтрів струмів нульової послідовності з різними значеннями їхніх параметрів двома зазначеними вище способами до третього вузла мережі показано на рис. 2, до п'ятого вузла – на рис. 3, двох однакових фільтрів до обох зазначених вузлів одночасно – на рис. 4. Крива I на даних рисунках

відповідає відсутності підключення фільтра, крива 2 – створенню локальної мережі (або двох мереж) за допомогою фільтрів з опором нульової послідовності $(0,4 + j1,2)$ Ом, криві 3 та 4 – підключенню до нульового провідника розподільної мережі фільтрів з опором нульової послідовності $(0,4 + j1,2)$ Ом та $(0,1 + j0,1)$ Ом відповідно.

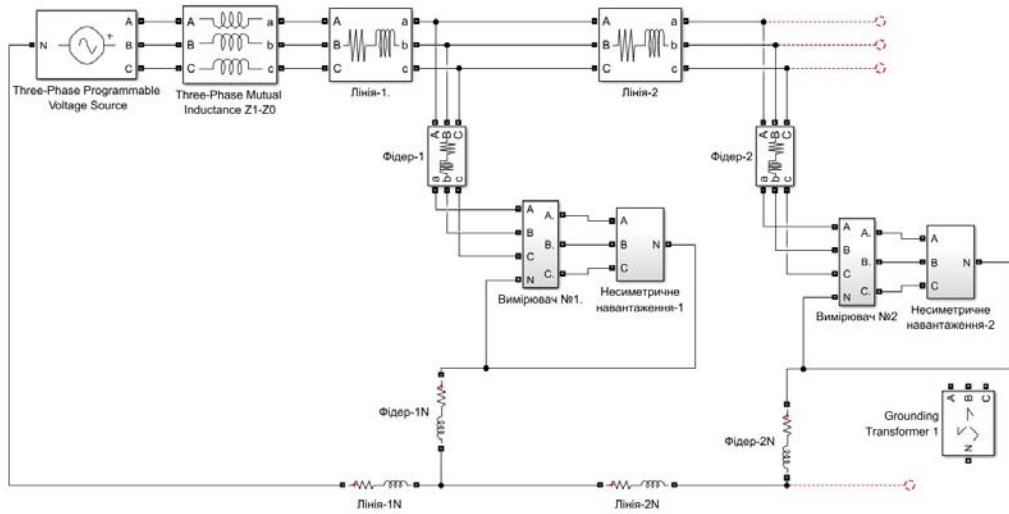


Рис. 1

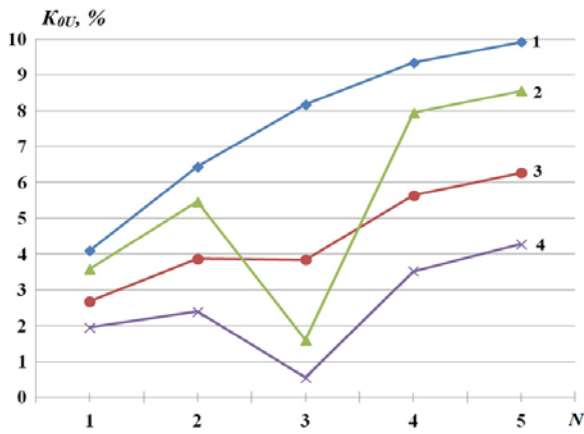


Рис. 2

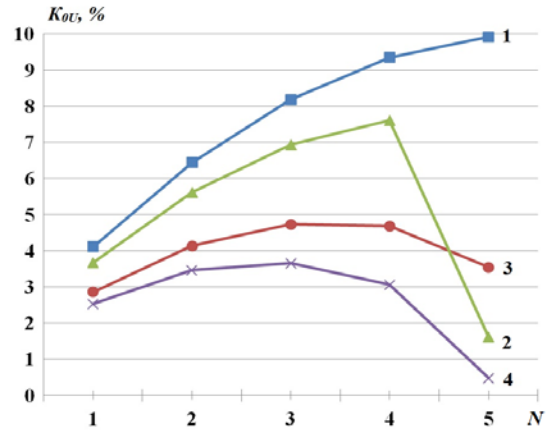


Рис. 3

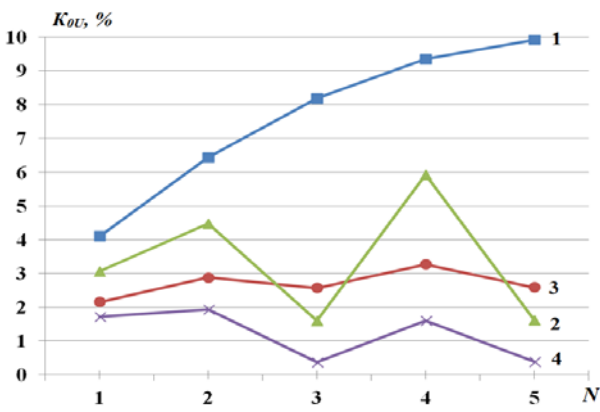


Рис. 4

Висновки. На підставі проведеного моделювання трифазної розподільної мережі з розосередженими точками підключення несиметричного навантаження проведено розрахунок K_{OU} для різних випадків підключення до мережі фільтрів струмів нульової послідовності. Визначено, що у разі створення локальної мережі зі штучною нейтраллю для одного або групи чутливих до якості напруги споживачів значення імпедансу зазначеного пристрою може бути суттєво більшим (тобто вартість пристрою значно меншою), ніж для випадку з'єднання фільтра з нульовим провідником мережі.

Результати розрахунків показують, що для розглянутої мережі у випадку необхідності забезпечення нормованих показників K_{OU} тільки в одному або в двох вузлах навантаження без суттєвого покращення K_{OU} в інших вузлах, достатньо ефективним є застосування топології локальної мережі, яка дає змогу використовувати фільтр, що має відносно велике значення опору нульової послідовності. Але у випадку необхідності значного покращення показників K_{OU} у всіх без винятку вузлах більш ефективним є приєднання фільтрів з відповідним опором до нульового провідника розподільної мережі (з урахуванням оптимального вибору місця їхнього розташування).

Роботу виконано за бюджетною програмою НАН України (КПКВК 6541030): наукова робота «Розвинення теорії та розроблення заходів і технічних засобів забезпечення якісного електропостачання в електричних мережах систем розподілу з відновлюваними джерелами енергії» (шифр – «ЕМІСІЯ-3»).

1. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Капличний Н.М., Козлов О.В., Малахатка Д.О. Забезпечення електромагнітної сумісності в локальних електричних мережах. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2018. Вип. 26. Том 1. С. 174-183. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.26.24>

2. Шидловский А.К., Новский В.А., Капличный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. Киев: Наукова думка. 1989. 312 с.

3. Жаркин А.Ф., Капличный Н.Н., Новский В.А., Козлов А.В. Особенности работы локальных низковольтных электрических сетей с искусственной нейтральной точкой в неноминальных режимах. *Электрические сети и системы*. 2012. № 5. С. 47-52.

4. Hung-Liang J., Jinn-Chang W. Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. Iss. 4. Pp. 1168-1173.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.844281>

5. Arvindan A. N., Sanal C. Investigation for harmonic mitigation in the line and neutral currents of three-phase four-wire system feeding two-pulse rectifiers with balanced and unbalanced load using Zig-Zag transformer. IEEE 2nd International Conference on *Electrical Energy Systems (ICEES)*. 7-9 January 2014, Chennai, India, 2014. Pp. 194–201. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEES.2014.6924167>

6. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии. Киев: Наукова думка. 1985. 268 с.

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А.Ф. Жаркин, чл.-кор. НАН Украины, С.А. Палачев, канд. техн. наук, А.Г. Пазеев, канд. техн. наук,

Д.А. Малахатка, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: zhark@ied.org.ua

Рассмотрены пути поиска оптимальных способов улучшения качества электрической энергии в электрических сетях с рассредоточенными несимметричными нагрузками с помощью фильтров токов нулевой последовательности, которые учитывают возможность обеспечения желаемых показателей с минимальными затратами и с учетом особенностей работы в аварийных режимах сети и обеспечением электробезопасности потребителей. Проведены соответствующие расчеты с помощью имитационного моделирования. Библ. 6, рис. 4.

Ключевые слова: качество электроэнергии, несимметрия напряжений, фильтр токов нулевой последовательности, аварийные режимы, безопасность.

DETERMINATION OF OPTIMAL CHARACTERISTICS OF DEVICES FOR VOLTAGE UNBALANCE REDUCING IN LOW VOLTAGE ELECTRIC NETWORKS

A.F. Zharkin, S.O. Palachov, A.G. Paziiev, D. O. Malakhatka

Institute of electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: zhark@ied.org.ua

Ways of searching for optimal ways to improve the quality of electric energy in electric networks with dispersed unbalanced loads using zero-sequence current filters are considered, which take into account the possibility of ensuring the desired performance with minimal cost and taking into account the peculiarities of operation in emergency network conditions and ensuring electrical safety of consumers. Corresponding calculations were carried out using simulation modeling. Ref.6, fig. 4.

Keywords: power quality, voltage unbalance, zero-sequence current filter, emergency modes, safety.

1. Shydlovskiy A.K., Zharkin A.F., Novskiy V.O., Kaplychniy N.M., Kozlov O.V., Malakhatka D.O. Providing of electromagnetic compatibility in local electric networks. *Visnyk NTU KhPI*. 2018. No. 26. Vol. 1. Pp. 174-183. (Ukr)

DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.26.24>

2. Shidlovskij A.K., Novskij V.A., Kaplychnyj N.N. Stabilization of electric energy parameters in distribution networks. Kiev: Naukova dumka. 1989. 312 p. (Rus)

3. Zharkin A.F., Kaplychnyj N.N., Novskij V.A., Kozlov A.V. Features of the work of local low-voltage electric networks with artificial neutral point in non-nominal modes. *Elektricheskie seti i sistemy*. 2012. No 5. Pp. 47-52. (Rus)

4. Hung-Liang J., Jinn-Chang W. Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20. Iss. 4. Pp. 1168-1173.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.844281>

5. Arvindan A. N., Sanal C. Investigation for harmonic mitigation in the line and neutral currents of three-phase four-wire system feeding two-pulse rectifiers with balanced and unbalanced load using Zig-Zag transformer. IEEE 2nd International Conference on *Electrical Energy Systems (ICEES)*. Chennai, India. 7-9 January, 2014. Pp. 194–201.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEES.2014.6924167>

6. Shidlovskij A.K., Kuznetsov V.G. Energy quality improvement. Kiev: Naukova dumka. 1985. 268 p. (Rus)

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 22.06.2020