

Дослідження несиметричних режимів чотирипровідних розподільних мереж

В. М. Охріменко

Кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст

ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

м. Харків, Україна

monviktor@ukr.net

М. В. Збітнева

Харківська гуманітарно-педагогічна академія

м. Харків, Україна

В. О. Перепечений

Кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст

ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

м. Харків, Україна

Анотація - Запропоновано методику оцінки стану несиметрії чотирипровідної розподільної мережі для встановлення потреби у засобах симетрування на етапі проектних розрахунків систем електропостачання. Методика передбачає зведення схеми чотирипровідної розподільної мережі до розрахункової моделі у складі джерела живлення, лінії живлення і еквівалентних навантажень фаз електроспоживача. Режим мережі описано рівняннями методу симетричних складових і теорії комплексних чисел. Наведені математичні співвідношення дозволяють проводити розрахунки несиметричних режимів чотирипровідної розподільної мережі. Вихідними даними для розрахунку є комплексні напруги джерела живлення, комплексні опори ліній живлення та навантаження фаз електроспоживача.

Розроблена комп'ютерна програма «Несиметрія навантаження», що базується на технології Microsoft .NET і забезпечує виконання розрахунків щодо аналізу впливу зміни несиметрії фазних навантажень та оцінки припустимих значень опорів фазних навантажень. Програма написана мовою програмування C#. В інтуїтивно зрозумілому інтерфейсі задаються дані моделі чотирипровідної розподільної мережі, шаг і діапазон зміни опору фазного навантаження.

Наведені результати дослідження впливу активного, індуктивного та ємнісного фазного навантаження на усталене відхилення фазних напруг, коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовностями. Показано, що в у випадку зміни фазного навантаження (активного чи реактивного) у межах нормально припустимого усталеного відхилення напруги ($\pm 5\%$), коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю не виходить за межі гранично припустимих нормованих значень ($\pm 4\%$), а коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю значно перевищує ці значення. Розподільна мережа у цьому випадку потребує встановлення пристроїв симетрування напруги з метою зменшення величини струмів нульової послідовності.

Методика оцінки впливу фазних навантажень на показники якості електричної енергії і комп'ютерна програма «Несиметрія навантаження» можуть використовуватись у процесі проведення проектних розрахунків чотирипровідних розподільних мереж міст і промислових підприємств.

Ключові слова - чотирипровідна розподільна мережа, несиметричний режим, опір фазного навантаження, якість електричної енергії.

I. ВСТУП

Чотирипровідні розподільні електричні мережі отримали широке розповсюдження в системах розподілу електричної енергії міст і промислових підприємств. Їхньою основною перевагою є можливість забезпечення електричною енергією як трифазних, так і однофазних споживачів. Система електропостачання забезпечує подачу споживачам напруги симетричної за фазами. Але електроспоживачі, в силу наявності значної кількості однофазного навантаження і його випадкового характеру, порушують симетрію трифазної системи, що призводить до додаткових втрат як в системі електропостачання, так і в системі електроспоживання [1, 2]. Одним з актуальних є завдання аналізу несиметричного режиму як на етапі проектування розподільних чотирипровідних мереж, так і при їхній експлуатації.

При виконанні проектних розрахунків однофазні електроприймачі рівномірно розподіляються між фазами чотирипровідної мережі з урахуванням статистичних даних про їхні режими роботи. У подальшому, під час експлуатації спроектованої мережі мають місце часті випадки, коли показники якості електричної енергії в окремих вузлах мережі виходять за межі припустимих значень. Така ситуація характерна для розподільних мереж промислових підприємств зі значною часткою однофазних навантажень [3]. Часті зміни графіків роботи електрообладнання, зміна складу електроприймачів та схем внутрішньоцехових розподільних мереж (виведення електрообладнання з експлуатації, введення в роботу нового і т. ін.) призводять до непередбачених порушень симетрії навантажень і, як наслідок, погіршення техніко-економічних показників як самих електроприймачів, так і чотирипровідних розподільних мереж.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вирішенню проблеми несиметрії напруг і струмів трифазних розподільних мереж приділяється постійна увага. Дослідження проводять в напрямках удосконалення математичного опису і моделювання несиметричних режимів [4–6], дослідження впливу несиметрії навантаження на втрати в мережі [1, 8, 9]. Значна увага приділяється вдосконаленню методів і засобів симетрування напруг і струмів трифазних мереж. Так у роботі [10] розглядається методика визначення оптимальної потужності і місця розташування симетруючих конденсаторів у радіальних розподільних мережах, у роботах [11, 12] аналізуються критерії та алгоритми керування компенсаційними симетрувальними пристроями.

Незважаючи на значну кількість публікацій щодо розроблення пристроїв симетрування напруг і методів визначення їхніх параметрів, недостатня увага приділяється уточненню методів, які дозволяють розраховувати ступінь впливу опорів фазних навантажень на режим мережі та показники якості електричної енергії на етапі проектування розподільної мережі. Оцінка можливих меж зміни фазних опорів на стадії проектування розподільної мережі дозволяє зменшити капітальні витрати на розроблення і встановлення пристроїв симетрування у процесі експлуатації розподільної мережі.

Таким чином, метою даної статті є дослідження впливу фазного навантаження на режим роботи і показники якості електричної енергії у чотирипровідній електричній мережі.

Для досягнення цієї мети необхідно провести аналіз методів математичного опису несиметричного режиму, розробити модель чотирипровідної електричної мережі і комп'ютерну програму, яка дозволяє розраховувати залежності показників якості від опорів навантаження фаз.

III. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Порядок дослідження впливу опору фазного навантаження на режим роботи і показники якості електричної енергії розглянемо на прикладі мережі, схема якої наведена на fig. 1. Тут показано фрагмент однолінійної схеми широко розповсюдженої, зокрема на промислових підприємствах, чотирипровідної розподільної мережі системи TN-C. Схема відтворює фрагмент чотирипровідної внутрішньоцехової розподільної мережі і містить джерело живлення (силовий знижувальний трансформатор Т), лінії живлення (позначені індексами Л1 і Л2), розподільні пристрої РП-1 і РП-2, навантаження (позначені індексами Н1, Н2 тощо). Від шин 0,4 кВ цехової ТП отримують живлення: безпосередньо група електроприймачів (на fig. 1 навантаження Н1, Н2, НN з провідностями Y_{H1} , Y_{H2} , Y_{HN}); по лініях з провідностями Y_{L1} та Y_{L2} – електроспоживачі (на fig. 1 розподільні пристрої РП-1 і РП-2). Електроспоживачі утворені групами електроприймачів, які отримують живлення від одного джерела: навантаження Y_{H1-1} , Y_{H1-2} , Y_{H1-N} – від шин РП-1; навантаження Y_{H2-1} , Y_{H2-2} , Y_{H2-N} – від шин РП-2.

Зазначимо, що електроприймач ми розглядаємо у загальноприйнятому розумінні як пристрій, у якому відбувається перетворення електричної енергії в інший вид енергії, а електроспоживач – як групу електроприймачів, що отримують живлення від спільного джерела електричної енергії.

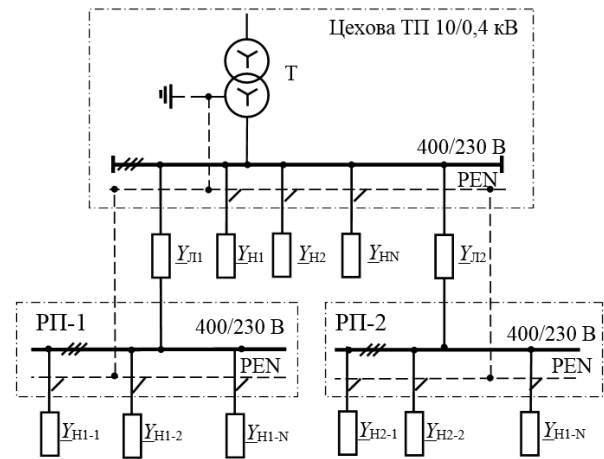


Fig. 1. Однолінійна схема чотирипровідної розподільної мережі

Наведена на fig.1 схема дає змогу провести дослідження впливу опорів фазних навантажень на показники якості електричної енергії розподільної мережі. Дослідження проводимо для випадку лінійних параметрів схеми.

Розгляд схеми (fig. 1) показує, що зазвичай електроприймачі утворюють паралельне підключення до джерела живлення, в якості якого виступають шини ТП 10/0,4 кВ або шини РП 0,4 кВ. Несиметричне навантаження створюється підключенням однофазних електроприймачів на фазну або лінійну напругу трифазної розподільної мережі.

Для проведення дослідження вихідну схему зводимо до розрахункової схеми (fig. 2) шляхом розрахунку еквівалентних провідностей фазних навантажень джерела живлення за відомими співвідношеннями. Наприклад, еквівалентна провідність навантаження фази А розраховується як алгебраїчна сума провідностей електроприймачів цієї фази:

$$Y_a = \sum_{i=1}^n Y_{ai} \tag{1}$$

де n – кількість електроприймачів фази А;

Y_{ai} – комплексна провідність i-го електроприймача.

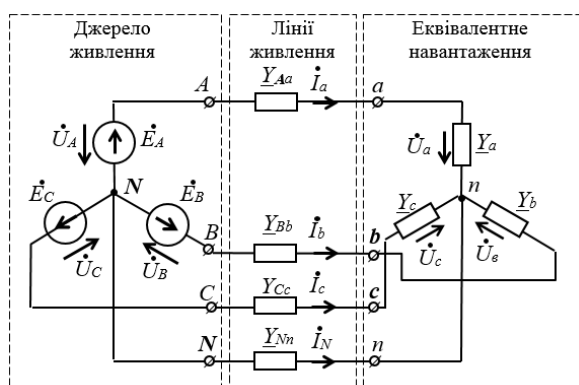


Fig. 2. Розрахункова схема моделі розподільної мережі

У випадку послідовного з'єднання електроспоживачів варто скористатися аналогічною формулою для послідовного з'єднання опорів з подальшим розрахунком еквівалентної провідності.

Залежно від конфігурації схеми досліджуваної розподільної мережі, у якості джерела живлення можна розглядати шини 400 В РП (розрахунок для локальної ділянки мережі), або шини 400 В ТП 10/0,4 кВ (розрахунок для мережі в цілому).

З урахуванням прийнятого припущення про лінійний характер параметрів електричного кола скористаємося методом симетричних складових [2, 13, 14], який дозволяє для нашої розрахункової схеми (fig. 2) отримати співвідношення для дослідження впливу фазних навантажень на показники якості електричної енергії.

IV. ПОРЯДОК РОЗРАХУНКУ

Вихідними даними для розрахунку є: електрорушійні сили фаз джерела живлення $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$; провідності фаз та нульової лінії живлення $\underline{Y}_{Aa}, \underline{Y}_{Bb}, \underline{Y}_{Cc}, \underline{Y}_{Nn}$; еквівалентні провідності фаз електроспоживача $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$. Режим схеми розраховуємо за відомими співвідношеннями [13, 14] у такій послідовності.

Напруга зміщення нульової:

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_{a\Sigma} + \dot{E}_B \underline{Y}_{b\Sigma} + \dot{E}_C \underline{Y}_{c\Sigma}}{\underline{Y}_{a\Sigma} + \underline{Y}_{b\Sigma} + \underline{Y}_{c\Sigma} + \underline{Y}_{Nn}} \quad (2)$$

Струм у фазі a електроспоживача:

$$\dot{I}_a = (\dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}) (\underline{Y}_{Aa} + \underline{Y}_a) \quad (3)$$

Струми у фазах b і c розраховуються за аналогічними формулами. Напруги на фазах споживача \dot{U}_a, \dot{U}_b і \dot{U}_c розраховуємо із співвідношень закону Ома.

Далі розраховуються симетричні складові [5, 13, 14] напруги:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a \dot{U}_b + a^2 \dot{U}_c), \quad (4)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a^2 \dot{U}_b + a \dot{U}_c), \quad (5)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c), \quad (6)$$

де $a = e^{j120^\circ}$ – оператор повороту.

З урахуванням припущення про лінійність параметрів системи можна вважати, що $U_{1(1)} = U_1$, $U_{2(1)} = U_2$, $U_{0(1)} = U_0$. Тоді коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною K_{2U} і за нульовою K_{0U} послідовностями можемо розрахувати за формулами:

$$K_{2U} = U_2/U_1; \quad (7)$$

$$K_{0U} = \sqrt{3}U_0/U_1. \quad (8)$$

Усталене відхилення напруги на фазі електроприймача δU_ϕ розраховуємо за відомим співвідношенням як різницю між діючим значенням напруги на фазі електроприймача U_ϕ і номінальним значенням напруги U_n :

$$\delta U_\phi = \frac{(U_\phi - U_n)}{U_n} 100\% \quad (9)$$

Наведені співвідношення дозволяють дослідити залежності показників якості електричної енергії (усталеного відхилення напруги, коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовностями) від фазних опорів електроприймачів.

V. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Розрахунки досліджуваних залежностей виконані з використанням розробленої комп'ютерної програми «Несиметрія навантаження». Програма написана мовою програмування C# з використанням технології Microsoft .NET. Розрахунок виконується для моделі (fig. 2) за наведеними вище співвідношеннями з урахуванням загальновідомих співвідношень щодо математичних операцій з комплексними числами.

У програмі як вхідні дані для розрахунку задаються активні і реактивні складові електрорушійних сил фаз джерела живлення, активні і реактивні складові опорів фаз і нульової лінії живлення, активні і реактивні складові фаз навантаження. Особливо задається шаг зміни опору (активного чи реактивного) фази навантаження. У програмі прийнято 10 шагів зміни опору фази навантаження.

Правильність розрахунків перевірена покроковим тестуванням у ручному режимі.

На fig. 3 – fig. 5 наведено графіки розрахункових залежностей показників якості електричної енергії від зміни опору навантаження фази А (активного, індуктивного, ємнісного) для наступних вихідних даних: номінальна потужність трансформатора $S_{н.тр} = 630$ кВА; довжина кабелю лінії живлення – 100 м; переріз кабелю

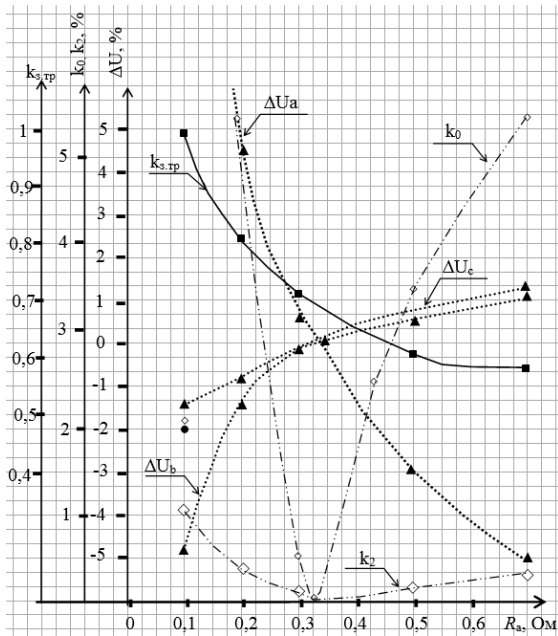


Fig. 3. Залежність показників якості від R_a
 $k_{3.tr}$ – коефіцієнт навантаження трансформатора;
 k_0, k_2 – коефіцієнти несиметрії за нульовою і зворотною послідовностями відповідно; $\Delta U_a, \Delta U_b, \Delta U_c$ – падіння напруги на фазах a, b, c електроприймача відповідно

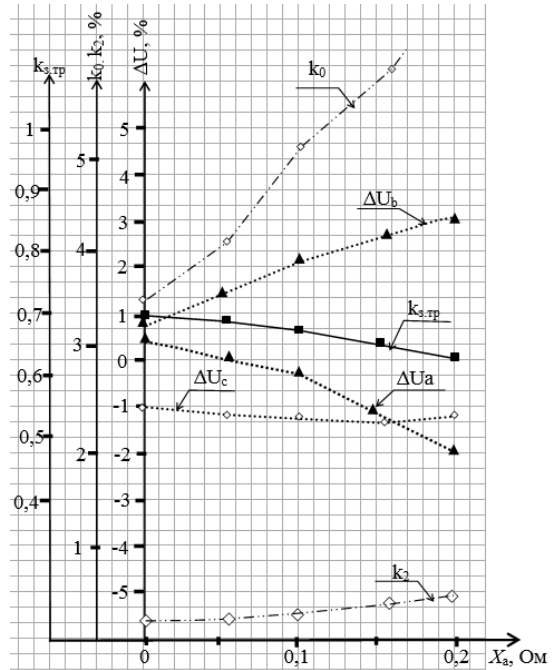


Fig. 5. Залежність показників якості від ємнісного X_a

Таким чином, під час виконання проектних розрахунків чотирипровідних розподільних мереж доцільно виконати оцінку меж можливих змін опорів фазних навантажень з подальшим розрахунком очікуваних значень коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю. І, у випадку виходу його значень за нормативно припустимі, передбачати застосування пристроїв симетрування напруги з метою зменшення втрат від струмів нульової послідовності.

VI. ВИСНОВКИ

На підставі аналізу існуючих методів розрахунку несиметричних режимів трифазних розподільних мереж складено розрахункову модель і математичні співвідношення, які описують залежності параметрів якості електричної енергії (усталеного відхилення напруги, коефіцієнтів несиметрії за зворотною і нульовою послідовностями) від опору фазного навантаження (активної і реактивної складових).

Розроблено комп'ютерну програму «Несиметрія навантаження», яка дозволяє дослідити залежність показників якості від значень опорів фазного навантаження.

Проведено дослідження впливу опору фазного навантаження на показники якості електричної енергії, встановлені межі зміни значень опору, за якими показники якості електричної енергії перевершують величини нормативних припустимих значень.

Наведена методика і програма «Несиметрія навантаження» можуть використовуватись на етапі проведення проектних розрахунків чотирипровідних розподільних мереж міст і промислових підприємств.

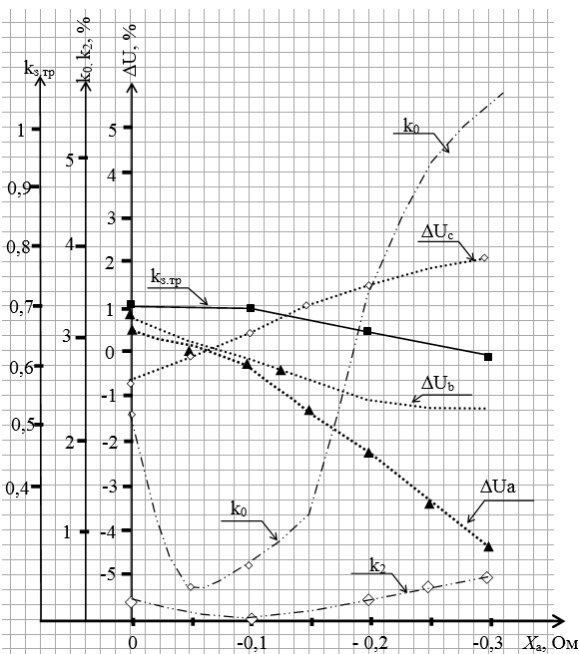


Fig. 4. Залежність показників якості від індуктивного X_a

Аналіз отриманих залежностей показує, що зміна фазного навантаження (активного чи реактивного), у межах нормально припустимого усталеного відхилення напруги ($\pm 5\%$), призводить до виходу коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю за межі гранично припустимих нормованих значень ($\pm 4\%$), а коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю не перевищує гранично припустимі нормовані значення.

- [1] Сариев Б. И. Влияние несимметрии напряжения на потери электроэнергии в системах электроснабжения [Текст] / Б. И. Сариев, З. Э. Абдиева, Р. Б. Куржумбаева, Х. Т. Касмамбетов // Автоматика и программная инженерия. – 2017, № 2(20). – С. 46–51.
- [2] Benoît de Metz-Noblat. Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques [Electronic resource] / B. de Metz-Noblat // Cahier Technique Schneider Electric n° 18. – Regime of access: <https://www.se.com/fr/fr/download/document/CT018/> (date of the application: 10.04.2018). – Header from the screen.
- [3] Попов А. Н. Повышение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий за счет уменьшения несимметрии фазных напряжений [Электронный ресурс] / А. Н. Попов // Электронный физико-технический журнал. – 2011, Т. 6. – С. 26–36. – Режим доступа: <https://eftj.secna.ru/vol6/110603.pdf> (дата обращения: 10.04.2018). – Название с экрана.
- [4] Ягуп К. В. Моделювання несиметричної системи електропостачання із використанням оптимізації для визначення параметрів симетруючого пристрою [Текст] / К. В. Ягуп // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2016. – Вип. 161. – С. 130–138.
- [5] Сиротин Ю. А. Ортогональные составляющие трехфазного тока при асимметричной активно-реактивной нагрузке в четырехпроводной сети [Текст] / Ю. А. Сиротин // Электротехника і електромеханіка. – 2016, № 3. – С. 62–66.
- [6] Дед А. В. Математическое моделирование расчета потерь мощности в трехфазной сети при несимметрии нагрузки [Текст] / А. В. Дед // Омский научный вестник. – 2016, № 5(149). – С. 98–101.
- [7] Sunderland K. A correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks [Текст] / K. Sunderland, M. Coppo, M. Conlon, R. Turri // Electric Power Systems Research, 132. – 2017. – P. 30–38.
- [8] Bahrevar P. Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network [Текст] / P. Bahrevar, M. Esmaili // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9(S1). – P. 1–7.
- [9] Panich S. Impact of plug-in electric vehicles on voltage unbalance in distribution systems [Текст] / S. Panich, J. G. Singh // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2015. – Vol. 7, No. 3. – P. 76–93.
- [10] Murty V. V. S. N. Capacitor Allocation in Unbalanced Distribution System under Unbalances and Loading Conditions [Текст] / V. V. S. N. Murty, A. Kumar // 4th International Conference on Advances in Energy Research. – 2013. – P. 47–74.
- [11] Бурбело М. Й. Керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень у розподільній електричній мережі [Текст] / М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Наукові праці ВНТУ. – 2012, № 2. – С. 1–5.
- [12] Janyavula, D. Unbalanced Variable Nonlinear Load Compensation Using Multiple Shunt Active Filters [Текст] / D. Janyavula, S. N. Saxena // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2015. – Vol. 5, No. 5. – P. 896–904.
- [13] Основы теории цепей: учебник для вузов [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд. – Москва, «Энергия», 1989. – 528 с.
- [14] Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії : підручник [Текст] / В. М. Охріменко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 286 с.
- [1] Sariev B. I., Abdiyeva Z. E., Kurgumbaeva R. B., Kosmambetov H. T. (2017). Influence of voltage unbalance on electric power losses in power supply systems // Automation and software engineering, № 2(20), 46–51.
- [2] Benoît de Metz-Noblat. Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques [Electronic resource] // Cahier Technique Schneider Electric n° 18. – Regime of access: <https://www.se.com/fr/fr/download/document/CT018/> (date of the application: 10.04.2018). – Header from the screen.
- [3] Popov A. N. (2011). Improvement of quality of electricity in industrial networks by reducing asymmetry of phase voltages [Electronic resource] // Electronic journal of physics and technology, Vol. 6, 26–36. – Access mode: <https://eftj.secna.ru/vol6/110603.pdf> (Date of address 10.04.2018). – Title from screen.
- [4] Yagup K. V. (2016). Modeling of unbalanced power system with optimization to determine parameters of symmetric devices // Collection of scientific works of Ukrainian state University of railway transport, Vol. 161, 130–138.
- [5] Sirotni Yu. A. (2016). Orthogonal components of three-phase current at asymmetric actively-reactive load in four-wire network // Electrical engineering and electromechanics, № 3, 62–66.
- [6] Ded A.V. (2016). Mathematical modeling of power loss calculation in three-phase network under load asymmetry // Omsk scientific bulletin, № 5(149), 98–101.
- [7] Sunderland, K., Coppo, M., Conlon, M., Turri, R. (2017). A correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks. Electric Power Systems Research, 132, 30–38.
- [8] Bahrevar, P., Esmaili, M. (2016). Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network. Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(S1), 1–7.
- [9] Panich, S., Singh, J. G. (2015). Impact of plug-in electric vehicles on voltage unbalance in distribution systems. International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 7, No. 3, 76–93.
- [10] Murty, V.V.S.N., Kumar, A. (2013). Capacitor Allocation in Unbalanced Distribution System under Unbalances and Loading Conditions. 4th International Conference on Advances in Energy Research, 47–74.
- [11] Burbelo M. Y., Devyatko M. V., Voytyuk Yu. P. (2012). Management of symmetric device in case of multiple asymmetry of loads in distributed electric networks // Scientific works of VNTU, № 2, 1–5.
- [13] Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. (1989). Fundamentals of circuit theory: textbook for universities /– 5th ed., revised. – Moscow, "Energy", – 528 p.
- [14] Okhrimenko V. M. (2019). Consumers of electric energy : tutorial. – Kharkiv : O. M. Beketov NUUE, – 286 p.

Study of non-symmetric modes of four-wire distributed networks

V. Okhrimenko

Department of power supply and city electricity consumption

O. M. Beketov NUUE

Kharkiv, Ukraine

monviktor@ukr.net

M. Zbitnieva

Kharkiv Humanitarian Pedagogical Academy

Kharkiv, Ukraine

V. Perepecheny

Department of power supply and city electricity consumption

O. M. Beketov NUUE

Kharkiv, Ukraine

jahoma@i.ua

Abstract. It is proposed method of assessment of state of asymmetry of four-wire distributed network to establish need for means of symmetry at the stage of design calculations of power supply systems. Method provides for transformation of four-wire distributed network circuit to calculated model as part of power source, power line and equivalent loads of phase of electric consumer. Mode of network is described by equations of method of symmetric components and theory of complex numbers. Given mathematical relations allow to carry out calculations of asymmetric modes of four-wire distributed network. Initial data for calculation are complex voltages of power source, complex supports of power lines and loads of phases of consumer of electric energy.

It is developed computer program "Load asymmetry", which is based on Microsoft .NET technology, and ensures accomplishment for analysis of influence of changes in asymmetry of phase loads and estimation of admissible values of phase load resistances. Program is written in C# programming language. It is specified data of four-wire distributed network model, step and range of phase load resistance change.

Results of study of influence of active, inductive and capacitive phase load on steady-state phase voltage deviation, voltage asymmetry coefficients for inverse and zero sequences are presented. It is shown that in case of change in phase load (active or reactive) within normally permissible steady-state voltage deviation ($\pm 5\%$), coefficient of asymmetry in reverse sequence does not exceed limits of maximum permissible normalized values ($\pm 4\%$), and coefficient of asymmetry in zero sequence significantly exceeds these values. Distributed network requires installation of voltage symmetry devices in order to reduce values of zero sequence currents in this case in this case.

Method of estimation of range of changes in values of phase loads that do not lead to output of electrical energy quality indicators for normalized values, and computer program "Load asymmetry" can be used in process of realization of designed calculations of four-wire distribution networks of cities and industrial enterprises.

Keywords: *four-wire distributed network, asymmetric mode, phase load resistance, quality of electrical energy.*