



ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI 10.32782/2078-0877-2025-25-1-8

УДК 621.313.3.025.3-78

О. Ю. Вовк, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

І. О. Попова, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5429-8269

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: Oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua, тел: +380986610269

ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ СИМЕТРИЧНОГО ТРИФАЗНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ НЕСИМЕТРІЇ ЖИВИЛЬНИХ НАПРУГ

Анотація. У роботі розглянуто вплив несиметрії живильних напруг джерела на роботу симетричного трифазного навантаження. Установлено, що найгіршим випадком трифазної системи з несиметричним джерелом і симетричним навантаженням є чотирипровідна. Запропоновано для покращення режиму роботи трифазного симетричного навантаження за умови несиметрії живильних напруг включати в лінійні проводи симетрувальні елементи, які не є джерелами. Установлено, що на практиці таке симетрування живильних напруг можна здійснити тільки за найменшим значенням електрорушійної сили джерела. Для такого випадку отримана методика розрахунку комплексів повних опорів симетрувальних елементів.

Ключові слова: трифазна система, несиметричне джерело, напруга зворотної послідовності, симетрувальні елементи.

Постановка проблеми. Головним видом енергії, яку застосовують для роботи різноманітних пристроїв, є електроенергія. Вказані пристрої називають споживачами електроенергії або навантаженнями і розподіляють на дві групи: навантаження постійного струму й навантаження змінного струму [1; 2]. Серед навантажень змінного струму більшість становлять трифазні навантаження, на які припадає близько 40 % електричної енергії, що виробляється у світі [3; 4]. Під час передання електроенергії таким навантаженням у трифазних системах виникають процеси, які призводять до виникнення несиметрії живильних напруг [5]. Причинами, які спричиняють таку несиметрію, є нерівномірний розподіл однофазних навантажень по фазах трифазної системи, вмикання потужних однофазних навантажень, вплив фотоелектричних модулів та зарядних станцій, несправності електрообладнання тощо [6; 7]. Наслідками несиметрії напруг трифазних навантажень є порушення нормальних умов їх роботи, які проявляються в зниженні ефективності роботи, збільшенні споживання електроенергії, додатковому нагріванні тощо [8; 9]. Тому дослідження режиму роботи симетричного трифазного навантаження за несиметрії живильних напруг є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні боротьбі з несиметрією живильних напруг присвячено багато робіт. Одним зі шляхів зниження впливу несиметрії напруг на роботу трифазних навантажень є балансування однофазних навантажень, яке здійснюється шляхом динамічних перемикачів між лінійними проводами трифазної системи. Для цього розробляються певні алгоритми, які враховують конкретні умови роботи навантажень [10; 11]. Вони дають змогу знижувати сили струмів у нейтральних провідниках майже на 90 %, але потребують для свого втілення додаткової контрольної і комутаційної апаратури або симетрувальних трансформа-

торів. Наступним напрямом є застосування пристроїв компенсації реактивної потужності, які допомагають не тільки компенсувати споживання реактивної потужності, а й знижувати дисбаланс напруг по фазах завдяки зменшенню струмів нульової і зворотної послідовностей. Для цього застосовують статичні [12] або динамічні [13] пристрої компенсації, які встановлюють у певних місцях трифазної системи з урахуванням виду й потужності навантажень. Такий підхід застосовують у випадку, коли несиметрія напруг постійно тримається на певному рівні. Для компенсації несиметрії живильних напруг також застосовують динамічні відновники напруги [14], які дають змогу повністю нівелювати несиметрію живильних напруг, але мають значну вартість технічної реалізації. У [15] пропонується система керування живильною напругою навантажень на базі силових тиристорів, яка вирівнює наявні значення напруг по фазах за найменшим значенням напруги, що призводить до певного симетричного провалу напруги і видає на виході напругу, яка має в складі деякі гармонійні складники.

Так, з викладеного випливає, що наявні підходи компенсації несиметрії живильних напруг навантажень, як правило, спрямовані на групу навантажень і мають значну вартість технічної реалізації.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Тому в статті поставлено за мету обґрунтувати спосіб компенсації несиметрії живильних напруг окремого трифазного навантаження, який має просту технічну реалізацію за її незначної вартості. Для цього потрібно розглянути можливі варіанти схем трифазної системи з одним джерелом й одним навантаженням та здійснити їх порівняльний аналіз, за результатами якого дійти висновку про доцільність того чи іншого варіанта.

Основна частина. Розглянемо трифазну систему, яка складається зі з'єднаних між собою несиметричного джерела й симетричного навантаження. Проаналізуємо декілька варіантів роботи такої системи. При цьому приймемо, що значення електрорушійних сил джерела і опорів навантаження є незмінними в усіх варіантах.

Як критерій оцінки режиму роботи навантаження візьмемо його напругу зворотної послідовності. Для аналізу застосуємо символічний (комплексний) метод та метод симетричних складників.

Розглянемо перший варіант роботи трифазної системи – несиметричний режим за трипровідною лінією. Нехай схеми з'єднання джерела й навантаження – зірка, лінія – ідеальна. Для цього режиму розрахункова схема трифазної системи наведена на рис. 1.

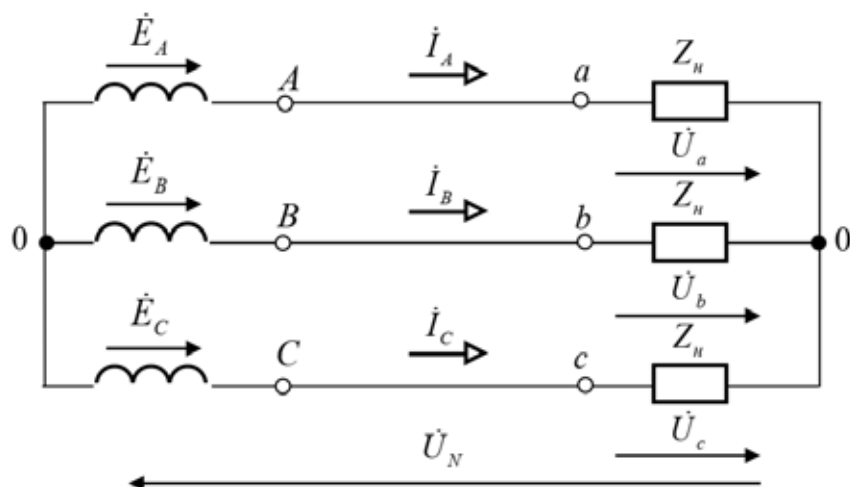


Рис. 1. Розрахункова схема трифазної системи «зірка – зірка» в несиметричному режимі за трипровідною лінією

На розрахунковій схемі (рис. 1) позначено: $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – комплекси діючих значень електро-рушійних сил джерела; $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – комплекси дійсних значень струмів кола; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ – комплекси дійсних значень фазних напруг навантаження; Z_n – комплекс повного опору фази навантаження; $\dot{U}_N$ – комплекс дійсного значення напруги зміщення нейтралі.

У цьому режимі комплекс дійсного значення напруги зміщення нейтралі трифазної системи дорівнює:

$$\dot{U}_N = (\dot{E}_A/Z_n + \dot{E}_B/Z_n + \dot{E}_C/Z_n) / (1/Z_n + 1/Z_n + 1/Z_n). \quad (1)$$

Після перетворень (1) остаточно маємо:

$$\dot{U}_N = (\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C) / 3. \quad (2)$$

Комплекси дійсних значень струмів трифазної системи дорівнюють:

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_N) / Z_n; \quad \dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_N) / Z_n; \quad \dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_N) / Z_n \quad (3)$$

Комплекси дійсних значень фазних напруг навантаження дорівнюють:

$$\dot{U}_a = Z_n \cdot \dot{I}_A; \quad \dot{U}_b = Z_n \cdot \dot{I}_B; \quad \dot{U}_c = Z_n \cdot \dot{I}_C. \quad (4)$$

Після підстановки (3) у (4) і перетворень маємо:

$$\dot{U}_a = \dot{E}_A - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_b = \dot{E}_B - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_c = \dot{E}_C - \dot{U}_N. \quad (5)$$

Комплекс дійсного значення напруги зворотної послідовності навантаження дорівнює:

$$\dot{U}_2 = (\dot{U}_a + \dot{U}_b \cdot e^{-j120^\circ} + \dot{U}_c \cdot e^{j120^\circ}) / 3. \quad (6)$$

Прийmemo take: $\dot{E}_A = 160 \cdot e^{j10^\circ} B$; $\dot{E}_B = 260 \cdot e^{-j90^\circ} B$; $\dot{E}_C = 210 \cdot e^{-j250^\circ} B$; $Z_n = 3 \cdot e^{j30^\circ} \text{ Ом} \dots$

Після підстановки вказаних значень у (2), (5), (6) і розрахунків отримуємо: $\dot{U}_N = 35,3 \cdot e^{-j36^\circ} B$; $\dot{U}_a = 46 \cdot e^{-j9^\circ} B$; $\dot{U}_b = 80,3 \cdot e^{-j127^\circ} B$; $\dot{U}_c = 80 \cdot e^{j85^\circ} B$; $\dot{U}_2 = 67,2 \cdot e^{j180^\circ} B$.

Розглянемо другий випадок роботи трифазної системи – несиметричний режим за чотири-провідної лінії. Нехай схеми з'єднання джерела й навантаження – зірка, лінія – чотирипровідна (лінійні проводи – ідеальні, нейтральний провід – реальний). Для цього режиму розрахункова схема трифазної системи схема наведена на рис. 2.

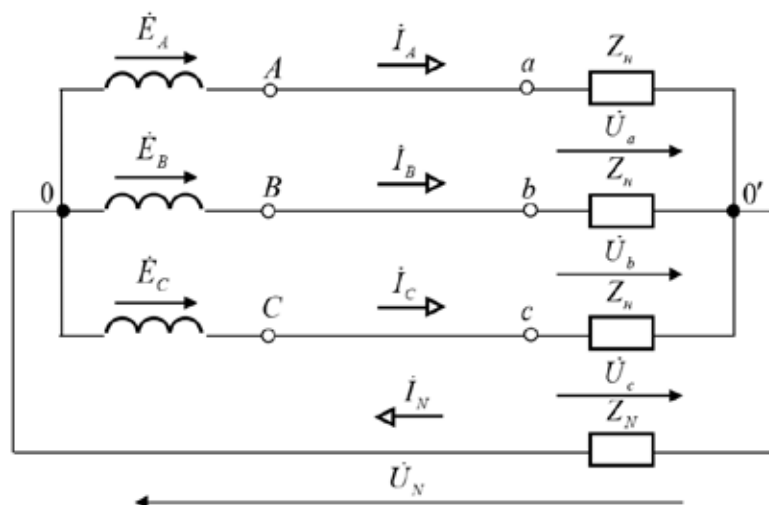


Рис. 2. Розрахункова схема трифазної системи «зірка – зірка» в несиметричному режимі за чотирипровідної лінії

На розрахунковій схемі (рис. 2) додатково, порівняно з рис. 1, позначено: Z_0 – комплекс повного опору нейтралі; $\dot{I}_N$ – комплекс дійсного значення струму нейтралі.

У цьому режимі комплекс дійсного значення напруги зміщення нейтралі трифазної системи дорівнює:

$$\dot{U}_N = (\dot{E}_A/Z_n + \dot{E}_B/Z_n + \dot{E}_C/Z_n) / (1/Z_n + 1/Z_n + 1/Z_n + 1/Z_n). \quad (7)$$

Після перетворень (7) остаточно маємо:

$$\dot{U}_N = \frac{(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C) \cdot Z_N}{3Z_N + Z_n}. \quad (8)$$

Усі інші шукані величини визначаються аналогічно випадку 1 за виразами (5), (6).

Прийmemo take: $Z_N = 0,03 \cdot e^{j15^\circ} \text{ Ом}$; значення інших вихідних величин такі ж, як у випадку 1.

Після підстановки вказаних значень у (8), (5), (6) і розрахунків отримуємо: $\dot{U}_N = 1 \cdot e^{-j51^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_a = 53,1 \cdot e^{-j20^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_b = 86,4 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_c = 70,3 \cdot e^{j80^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_2 = 67,8 \cdot e^{j181^\circ} \text{ В}$.

Розглянемо третій випадок роботи трифазної системи – несиметричний режим при перемиканні навантаження на схему трикутника. Нехай схема з'єднання джерела – зірка, схема з'єднання навантаження – трикутник, лінія – ідеальна трипровідна, у лінію увімкнені струмообмежувальні елементи, які не є джерелом і мають однакові опори. Для цього режиму розрахункова схема трифазної системи наведена на рис. 3.

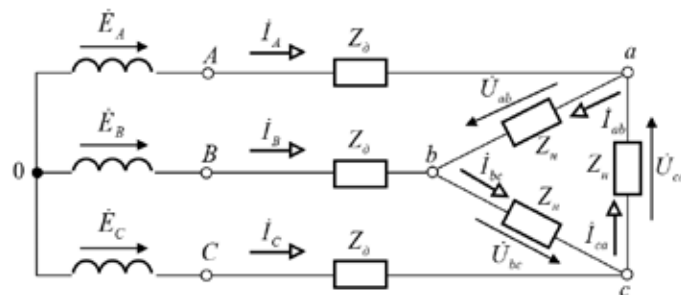


Рис. 3. Розрахункова схема трифазної системи «зірка – трикутник» у несиметричному режимі

На розрахунковій схемі (рис. 3) додатково, порівняно з рис. 1, позначено: Z_0 – комплекс повного опору струмообмежувального елемента; $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_{bc}$, $\dot{U}_{ca}$ – комплекси дійсних значень фазних (лінійних) напруг навантаження; $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$ – комплекси дійсних значень фазних струмів навантаження.

Перетворимо навантаження на схему зірки, тоді наведена на рис. 3 розрахункова схема прийме вид, показаний на рис. 4.

У цій трифазній системі (рис. 4) комплекс дійсного значення напруги зміщення нейтралі визначається за (2). Комплекси дійсних значень струмів дорівнюють:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_N}{Z_0 + Z_n/3}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_N}{Z_0 + Z_n/3}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_N}{Z_0 + Z_n/3}. \quad (9)$$

Комплекси дійсних значень фазних напруг еквівалентного навантаження дорівнюють:

$$\dot{U}_a = (Z_n/3) \cdot \dot{I}_A; \quad \dot{U}_b = (Z_n/3) \cdot \dot{I}_B; \quad \dot{U}_c = (Z_n/3) \cdot \dot{I}_C. \quad (10)$$

Комплекси дійсних значень фазних (лінійних) напруг реального навантаження дорівнюють:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \quad (11)$$

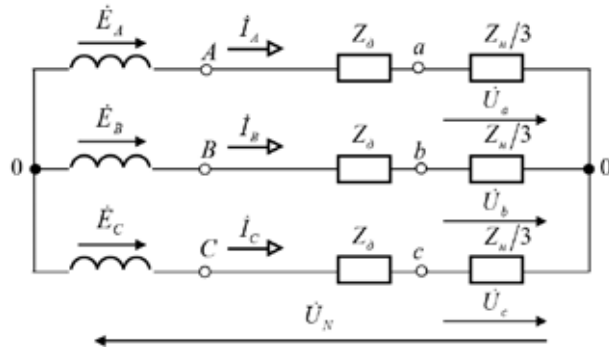


Рис. 4. Еквівалентна розрахункова схема трифазної системи, наведеної на рис. 4

Після підстановки (10) у (11) і перетворень маємо:

$$\dot{U}_{ab} = \frac{Z_n}{3} \cdot (I_A - I_B); \quad \dot{U}_{bc} = \frac{Z_n}{3} \cdot (I_B - I_C); \quad \dot{U}_{ca} = \frac{Z_n}{3} \cdot (I_C - I_A). \quad (12)$$

Після підстановки (9) у (12) і перетворень маємо:

$$\dot{U}_{ab} = \frac{(\dot{E}_A - \dot{E}_B) \cdot Z_n}{3Z_0 + Z_n}; \quad \dot{U}_{bc} = \frac{(\dot{E}_B - \dot{E}_C) \cdot Z_n}{3Z_0 + Z_n}; \quad \dot{U}_{ca} = \frac{(\dot{E}_C - \dot{E}_A) \cdot Z_n}{3Z_0 + Z_n}. \quad (13)$$

Для збереження допустимого значення напруги на затискачах реального навантаження знайдемо опір струмообмежувального елемента з умови:

$$\frac{Z_n}{3Z_0 + Z_n} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}}. \quad (14)$$

Після перетворень (14) маємо:

$$Z_0 = Z_n \cdot e^{j60^\circ} / 3. \quad (15)$$

Так, якщо опір струмообмежувального елемента буде повністю задовольняти умові (15), то рівняння (13) будуть такими:

$$\dot{U}_{ab} = \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_B}{\sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}}; \quad \dot{U}_{bc} = \frac{\dot{E}_B - \dot{E}_C}{\sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}}; \quad \dot{U}_{ca} = \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_A}{\sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}}. \quad (16)$$

Комплекс дійсного значення напруги зворотної послідовності реального навантаження дорівнює:

$$\dot{U}_2 = (\dot{U}_{ab} + \dot{U}_{bc} \cdot e^{-j120^\circ} + \dot{U}_{ca} \cdot e^{j120^\circ}) / 3. \quad (17)$$

Прийmemo значення вихідних величин такими ж, як у випадку 1.

Після підстановки вказаних значень у (15) – (17) і розрахунків отримуємо:

$$Z_0 = 1 \cdot e^{j90^\circ} \text{ Ом}; \quad \dot{U}_{ab} = 189,3 \cdot e^{j31^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{bc} = 267,3 \cdot e^{-j111^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{ca} = 164,7 \cdot e^{j114^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_2 = 66,9 \cdot e^{j121^\circ} \text{ А}.$$

Розглянемо четвертий випадок роботи трифазної системи – несиметричний режим за трипровідної лінії з симетрувальними елементами. Нехай схема з'єднання джерела – зірка, схема з'єднання навантаження – зірка, лінія – ідеальна трипровідна, у лінію увімкнені симетрувальні елементи, які не є джерелом і мають різні опори. Для цього режиму розрахункова схема трифазної системи наведена на рис. 5.

На розрахунковій схемі (рис. 5) додатково, порівняно з рис. 1, позначено: $Z_{\text{сим}(A)}$, $Z_{\text{сим}(B)}$, $Z_{\text{сим}(C)}$, – комплекси повних опорів симетрувальних елементів.

У цьому режимі комплекс дійсного значення напруги зміщення нейтралі трифазної системи дорівнює:

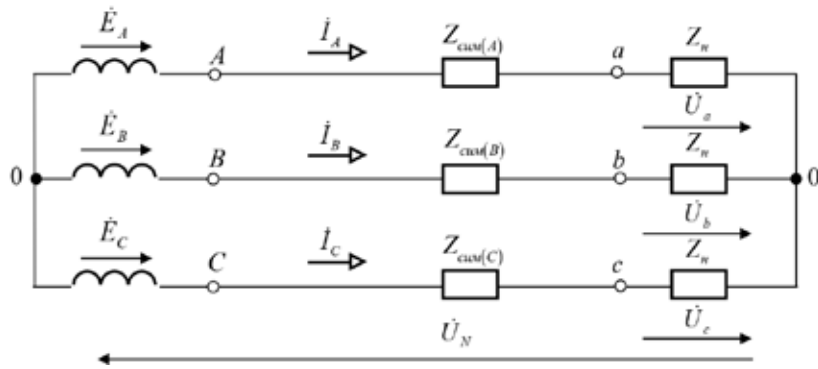


Рис. 5. Розрахункова схема трифазної системи «зірка – зірка» в несиметричному режимі за трипровідної лінії із симетрувальними елементами

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A / (Z_n + Z_{\text{сим}(A)}) + \dot{E}_B / (Z_n + Z_{\text{сим}(B)}) + \dot{E}_C / (Z_n + Z_{\text{сим}(C)})}{1 / (Z_n + Z_{\text{сим}(A)}) + 1 / (Z_n + Z_{\text{сим}(B)}) + 1 / (Z_n + Z_{\text{сим}(C)})}. \quad (18)$$

Припустимо, що до виникнення несиметрії джерела його електрорушійні сили були симетричними й номінальними. Тому для того, щоб комплекси дійсних значень фазних напруг навантаження були такими, як і до виникнення несиметрії джерела, тобто симетричними й номінальними, потрібно, щоб виконувались умови:

$$\dot{E}_A / (Z_n + Z_{\text{сим}(A)}) = \dot{E}_{A(n)} / Z_n; \quad (19)$$

$$\dot{E}_B / (Z_n + Z_{\text{сим}(B)}) = \dot{E}_{B(n)} / Z_n; \quad (20)$$

$$\dot{E}_C / (Z_n + Z_{\text{сим}(C)}) = \dot{E}_{C(n)} / Z_n, \quad (21)$$

де $\dot{E}_{A(n)}$, $\dot{E}_{B(n)}$, $\dot{E}_{C(n)}$ – симетричні номінальні комплекси дійсних значень електрорушійних сил джерела, В.

Після перетворень (19) – (21) отримуємо вирази комплексів повних опорів симетрувальних елементів, за яких комплекси дійсних значень фазних напруг навантаження будуть симетричними й номінальними:

$$Z_{\text{сим}(A)} = (\dot{E}_A / \dot{E}_{A(n)} - 1) \cdot Z_n; \quad (22)$$

$$Z_{\text{сим}(B)} = (\dot{E}_B / \dot{E}_{B(n)} - 1) \cdot Z_n; \quad (23)$$

$$Z_{\text{сим}(C)} = (\dot{E}_C / \dot{E}_{C(n)} - 1) \cdot Z_n. \quad (24)$$

Комплекси дійсних значень струмів кола дорівнюють:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_N}{Z_{\text{сим}(A)} + Z_n}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_N}{Z_{\text{сим}(B)} + Z_n}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_N}{Z_{\text{сим}(C)} + Z_n}. \quad (25)$$

Комплекси дійсних значень фазних напруг навантаження визначаються за (4). Комплекс дійсного значення напруги зворотної послідовності навантаження визначається за (6).

Припустимо таке: $\dot{E}_{A(\text{ном})} = 220 \text{ В}$; $\dot{E}_{B(\text{ном})} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}$; $\dot{E}_{C(\text{ном})} = 220 \cdot e^{-j240^\circ} \text{ В}$; значення інших вихідних величин такі ж, як у випадку 1.

Після підстановки вказаних значень у (22) – (24), (18), (25), (4), (6) і розрахунків отримуємо: $Z_{\text{сим}(A)} = 0,93 \cdot e^{-j174^\circ} \text{ Ом}$; $Z_{\text{сим}(B)} = 1,77 \cdot e^{j118^\circ} \text{ Ом}$; $Z_{\text{сим}(C)} = 0,53 \cdot e^{-j80^\circ} \text{ Ом}$; $\dot{U}_N = 0$; $\dot{U}_a = 220 \text{ В}$; $\dot{U}_b = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ А}$; $\dot{U}_c = 220 \cdot e^{-j240^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_2 = 0$.

На практиці такі значення кутів зсуву фаз симетрувальних елементів у лінійних проводах А-а і В-в, які отримано в результаті розрахунків, неможливо здійснити завдяки активному, індуктивному і ємнісному опорам. Тому розглянемо симетрування напруг навантаження за найменшим значенням електрорушійної сили джерела. Для здійснення такого симетрування потрібно, щоб виконувалися такі умови (для випадку, коли найменше значення електрорушійної сили у фазі А джерела):

$$\dot{E}_A / Z_n = \dot{E}_A / Z_n; \quad (26)$$

$$\dot{E}_B / (Z_n + Z_{\text{сим}(B)}) = (\dot{E}_A \cdot e^{-j120^\circ}) / Z_n; \quad (27)$$

$$\dot{E}_C / (Z_n + Z_{\text{сим}(C)}) = (\dot{E}_A \cdot e^{-j240^\circ}) / Z_n. \quad (28)$$

Після перетворень (26) – (28) маємо вирази комплексів повних опорів симетрувальних елементів, за яких комплекси дійсних значень фазних напруг навантаження будуть симетричними:

$$Z_{\text{сим}(A)} = 0; \quad Z_{\text{сим}(B)} = \frac{\dot{E}_B - \dot{E}_A \cdot e^{-j120^\circ}}{\dot{E}_A \cdot e^{-j120^\circ}} \cdot Z_n; \quad Z_{\text{сим}(C)} = \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_A \cdot e^{-j240^\circ}}{\dot{E}_A \cdot e^{-j240^\circ}} \cdot Z_n. \quad (29)$$

Комплекси дійсних значень струмів визначаються за (25), фазних напруг навантаження – за (4), напруги зворотної послідовності навантаження – за (6).

Якщо підставити вихідні значення з варіанта 1 у (29), (18), (25), (4), (6) і виконати розрахунки, то отримаємо: $Z_{\text{сим}(A)} = 0$; $Z_{\text{сим}(B)} = 7,76 \cdot e^{j58^\circ} \text{ Ом}$; $Z_{\text{сим}(C)} = 1,52 \cdot e^{-j33^\circ} \text{ Ом}$; $\dot{U}_N = 0$; $\dot{U}_a = 160 \cdot e^{j10^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_b = 160 \cdot e^{-j110^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_c = 160 \cdot e^{-j230^\circ} \text{ В}$; $\dot{U}_2 = 0$.

З отриманих у чотирьох випадках результатів розрахунків випливає, що в трифазній системі з несиметричним джерелом і симетричним навантаженням без включення симетрувальних елементів напруги на навантаженні є несиметричними не залежно від схем його з'єднання. Причому в усіх випадках без симетрувальних елементів напруга зворотної послідовності на навантаженні практично однакова. Вона призводить до виникнення струмів зворотної послідовності в навантаженні, які негативно впливають на його роботу. Наприклад, якщо навантаження буде динамічним (електродвигун змінного струму), то під дією таких струмів у ньому виникне гальмівний момент, який перешкоджатиме приведенню в дію робочої машини. Найгіршим з таких випадків є чотирипровідна трифазна система, тому що в ній разом зі струмами зворотної послідовності виникають струми нульової послідовності, які додатково нагрівають навантаження.

При включенні в трифазну систему з несиметричним джерелом і симетричним навантаженням симетрувальних елементів, реалізованих на базі активного й реактивного опорів, виникає можливість вирівнювання напруг по фазах навантаження. Для цього комплекси повних опорів таких елементів мають бути визначені залежно від найменшої електрорушійної сили джерела. Це зумовить симетрування напруг на навантаженні за значенням цієї електрорушійної сили і дасть змогу уникнути струмів зворотної і нульової послідовностей. Запропонований спосіб симетрування напруг трифазного навантаження на відміну від [10–14] є простішим, дешевшим і має індивідуальний характер, а на відміну від [15] забезпечує на фазах навантаження синусоїдні напруги.

Висновки. Так, у роботі доведено, що в трифазній системі з несиметричним джерелом і симетричним навантаженням можна компенсувати дію несиметричної напруги джерела для навантаження. Така компенсація можлива шляхом симетрування напруг навантаження за найменшим значенням електрорушійної сили джерела. Для цього в лінійні проводи потрібно включити

симетрувальні елементи, які не є джерелами і мають активний та реактивний опори. Запропоновано методику визначення комплексів повних опорів таких симетрувальних елементів. Недоліком запропонованого способу є провал напруги на навантаженні при створенні симетричної напруги. Подальші дослідження мають бути спрямовані на встановлення негативних наслідків такого провалу напруги порівняно з несиметрією напруг і на розробку пристроїв, які реалізують плавну зміну опорів симетрувальних елементів у функції живильних напруг.

Список використаних джерел

1. John A. Adebisi, Leokadia N.P. Ndjuluwa. A survey of power-consumption monitoring systems. *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, 7, P.100386, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100386>
2. Попова І.О., Квітка С.О., Вовк О.Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження / *Праці ТДАТУ*, 2023, 23(1), С.179–187, <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187>
3. Abu Al-Haija, Q. A Stochastic Estimation Framework for Yearly Evolution of Worldwide Electricity Consumption. *Forecasting*, 2021, 3, P. 256–266, <https://doi.org/10.3390/forecast3020016>
4. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Попова І. О., Діордієв В. Т. Збереження роботоздатності трифазного статичного навантаження за неповнофазного живлення. *Праці ТДАТУ*, 2024, 24(1), С. 136–150, <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-10>
5. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Квітка О. С. Контроль витрати ресурсу ізоляції асинхронних електродвигунів при відхиленні напруги живлячої мережі. *Праці ТДАТУ*, 2015, 15(2), С.154–159.
6. Sarath Perera, Sean Elphick. Impact and management of power system voltage unbalance. *Applied Power Quality, Elsevier*, 2023, P. 49–69, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85467-2.00001-9>
7. Z. Olczykowski. Electric Arc Furnaces as a Cause of Current and Voltage Asymmetry. *Energies*, 2021, 14(16), P. 5058, <https://doi.org/10.3390/en14165058>
8. K. Ma, L. Fang, W. Kong. Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(3), P. 479–488, <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.03280>
9. I.C. Torres, G.F. Negreiros, C. Tiba. Theoretical and Experimental Study to Determine Voltage Violation, Reverse Electric Current and Losses in Prosumers Connected to Low-Voltage Power Grid. *Energies*, 2019, 12(23), P. 4568, <https://doi.org/10.3390/en12234568>
10. G. Grigoraş, B-C. Neagu, M. Gavrilăş, I. Triştiu, C. Bulac. Optimal Phase Load Balancing in Low Voltage Distribution Networks Using a Smart Meter Data-Based Algorithm. *Mathematics*, 2020, 8(4), P. 549, <https://doi.org/10.3390/math8040549>
11. O. Pereira, J. Quirós-Tortós, G. Valverde. Phase Rebalancing of Distribution Circuits Dominated by Single-Phase Loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6), P. 5333–5344, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3076629>
12. L.R. de Araujo, D.R.R. Penido, S. Carneiro, J.L.R. Pereira. Optimal unbalanced capacitor placement in distribution systems for voltage control and energy losses minimization. *Electric Power Systems Research*, 2018, 154, P. 110–121, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.08.012>
13. L.Czarnecki, M.Almoussa. Adaptive Balancing by Reactive Compensators of Three-Phase Linear Loads Supplied by Nonsinusoidal Voltage from Four-Wire Lines. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2021, 10(3), P. 32–42, <https://doi.org/10.11648/j.epes.20211003.11>
14. Ogunboyo P.T., Tiako R., Davidson I.E. Application of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement in Low Voltage Electrical Power Distribution Network: An Overview. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2017, 28, P. 142–156. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.28.142>
15. Y. Li, Y. Gong. Design of Three Phase Load Unbalance Automatic Regulating System for Low Voltage Power Distribution Grids. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 173, P. 02040, <https://doi.org/10.1051/matecconf/201817>

Стаття надійшла до редакції 25.02.2025 р.

**O. Vovk¹, I. Popova¹**¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University***IMPROVEMENT OF THE OPERATING MODE OF A SYMMETRICAL
THREE-PHASE LOAD IN THE EVENT OF ASYMMETRY OF SUPPLY VOLTAGES*****Summary***

The work considers the issue of asymmetry of supply voltages of a symmetrical three-phase load, which arises during its operation due to various reasons that do not depend on it. The consequences of the influence of such asymmetry on the operation of a three-phase load are shown. Existing methods of improving the load operation mode under such conditions are analyzed and it is determined that all of them have a high cost of technical implementation and are not adapted for a separate load. Therefore, the paper considers various types of three-phase system circuits, which include an asymmetrical source and a symmetrical load. The negative sequence voltage is chosen as a criterion for assessing the influence of load voltage asymmetry, for which a calculation method has been developed for various circuit solutions of a three-phase system. It is determined that for any load switching scheme without the use of balancing elements, the effective value of its negative sequence voltage does not change. The worst of these cases is a three-phase four-wire system due to the presence in it not only of negative sequence currents, but also of zero sequence currents. It is proposed to improve the operation of a symmetrical load in conditions of supply voltage asymmetry to include balancing elements that are not sources in linear wires. It is proven that with such balancing of load voltages according to the nominal voltage value, the complexes of impedances of such elements have phase shift angles that cannot be implemented in practice. Therefore, it is proposed to balance the voltages of a three-phase load according to the smallest value of the electromotive force of an asymmetrical three-phase source. For such a condition, a method for calculating the complexes of impedances of balancing elements has been developed. Such elements can be implemented in practice using devices that have active and reactive resistance. They allow to establish symmetrical, but reduced voltages on the phases of a three-phase load. Such balancing is proposed to be performed for a short time for the period of action of an unacceptable voltage asymmetry, if the production conditions of a particular load allow.

Keywords: three-phase system, symmetrical load, asymmetrical source, negative sequence voltage, balancing elements.