

Л. Б. Терешкевич, канд. техн. наук, доц.;  
 І. О. Бандура;  
 М. І. Цибульський

## ДОДАТКОВІ ВТРАТИ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РАЗІ СИМЕТРУВАННЯ НАПРУГ

*Проаналізовано вплив симетрувального пристрою, що використовується для симетрування напруги у вузлі розподілу балансової належності мереж, на втрати активної потужності в мережах енергопостачальної організації та споживача електроенергії. Отримані результати можуть бути використані для розробки систем керування несиметрією напруги.*

### Постановка наукової задачі та мета дослідження

У відомих наукових роботах вивчається залежність додаткових втрат активної потужності від несиметрії режиму в окремих елементах електричної мережі та в електроприймачах різного характеру від параметрів несиметрії режиму та оцінюються їх можливі значення [1]. За цими результатами можна визначити значення додаткових втрат активної потужності для деякого сталого режиму або в його динаміці, тобто отримати значення однієї складової збитків, зумовлених несиметрією режиму. Але крім цього, на практиці виникає необхідність визначати як позначається на додаткових втратах активної потужності ті або інші технічні рішення, спрямовані на симетрування напруги, що залишається недостатньо дослідженим. Наприклад, можна припустити, що внаслідок зміни струморозподілу зворотної послідовності, додаткові втрати активної потужності в окремих вітках і частинах мережі (в частинах, що належать різним суб'єктам господарювання) можуть як збільшуватись, так і зменшуватись у результаті реалізації керувальних рішень. Знання про такі впливи на значення додаткових втрат активної потужності в живильних та розподільних мережах можуть використовуватись під час розроблення законів керування.

Вплив на додаткові втрати активної потужності залежать від технічного засобу, що використовується для симетрування напруги. Один із поширених засобів — це симетрувальний пристрій (СП) на базі конденсаторних установок несиметричного або неповнофазного виконання [2].

*Метою роботи є дослідження впливу СП, яке використовується для симетрування напруги, на додаткові втрати активної потужності в мережах енергопостачальної організації та споживача електроенергії (в мережах живлення та розподілу електроенергії).*

Проведені дослідження обмежуються лише компенсацією складових зворотної послідовності, що є окремою задачею у разі симетрування електричного режиму в трипровідній мережі та підзадачею у разі симетрування режиму в мережі чотирипровідній.

### Випадок, коли несиметрія напруги зумовлена електроприймачами, під'єднаними до мереж енергопостачальної організації та споживача

Слід зазначити, що розглядається поширеніший випадок, ніж досліджений в [3], де отримані висновки для окремого випадку, коли несиметричні електроприймачі під'єднані лише до мереж енергопостачальної організації.

Дослідження проведені в рамках таких допущень:

1. СП під'єднаний на границі балансової належності мереж або поблизу неї.
2. Споживач живиться від системи безмежної потужності радіальною лінією, яка знаходиться на балансі енергопостачальної організації (будь-які рішення із симетрування напруги несуттєво впливають на параметри зворотної послідовності системи).
3. В мережах споживача однофазне навантаження зосереджено в одному вузлі.

Виконаємо аналіз впливу СП на додаткові втрати активної потужності, які зумовлені струмами зворотної послідовності —  $\Delta P_2$  в заступній схемі рис. 1. В цій схемі струм зворотної послідовності —  $\dot{I}_2$  має напрямок від мереж споживача в мережі енергопостачальної організації і визначається

ся еквівалентними ЕРС  $\dot{E}_{2(1)}$  та  $\dot{E}_{2(2)}$  в мережах енергопостачальної організації та споживача і обмежується опорами:  $z_1$  (повний опір зв'язку енергопостачальної організації із споживачем); та  $z_2$  (повний опір зв'язку споживача із енергопостачальною організацією або еквівалентний опір споживача, якщо має місце допущення 3). Вузол  $A$  — вузол під'єднання СП.

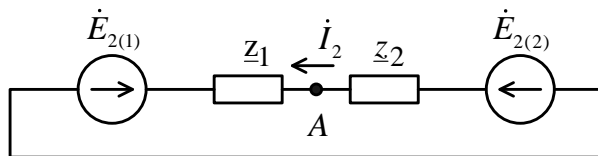


Рис. 1. Заступна схема для струмів зворотної послідовності

Для аналізу використаємо метод суперпозиції, вибравши за додатний напрямок — напрям струму  $\dot{I}_2$ .

Значення струму  $\dot{I}_2$  можна визначити з формули

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{2(2)} - \dot{I}_{2(1)} = \frac{\dot{E}_{2(2)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} - \frac{\dot{E}_{2(1)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)},$$

де  $\dot{I}_{2(1)}$ ,  $\dot{I}_{2(2)}$  — струми зворотної послідовності, зумовлені  $\dot{E}_{2(1)}$  та  $\dot{E}_{2(2)}$ .

За результатами симетрування напруги у вузлі  $A$  отримаємо струми через опори  $z_1$  та  $z_2$ :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{2\Sigma(z_1)} &= \frac{\dot{E}_{2(2)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} - \frac{\dot{E}_{2(1)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} - \frac{(\dot{E}_{2(1)} + \sqrt{3}\dot{I}_2 z_1)}{\sqrt{3}z_1} = -\frac{\dot{E}_{2(1)}}{\sqrt{3}z_1}; \\ \dot{I}_{2\Sigma(z_2)} &= \frac{\dot{E}_{2(2)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} - \frac{\dot{E}_{2(1)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} + \frac{(\dot{E}_{2(1)} + \sqrt{3}\dot{I}_2 z_1)}{\sqrt{3}z_2} = \dot{I}_2 + \frac{(\dot{E}_{2(1)} + \sqrt{3}\dot{I}_2 z_1)}{\sqrt{3}z_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Можна вказати на такі характерні закономірності, які проявляються у разі повного симетрування напруги у вузлі  $A$ .

1. Через опір  $z_1$  буде протікати струм зворотної послідовності  $-\frac{\dot{E}_{2(1)}}{\sqrt{3}z_1}$  та, відповідно, виникатимуть додаткові втрати  $\Delta P_2 \neq 0$ . Якщо виконується таке співвідношення між параметрами:

$$\frac{|\dot{I}_{2\Sigma(z_1)}|}{|\dot{I}_2|} > 1$$

або

$$\left| \dot{E}_{2(1)} \left( 1 + \frac{z_2}{z_1} \right) \right| > \left| \dot{E}_{2(2)} - \dot{E}_{2(1)} \right|, \quad (2)$$

то струм через  $z_1$  зростає в порівнянні із вихідним значенням  $\dot{I}_2$  та відповідно зростають втрати  $\Delta P_2$  в активній складовій опорі  $z_1$ . В інших випадках втрати  $\Delta P_2$  — зменшуються.

2. Струм зворотної послідовності через опір  $z_2$  змінюється на величину  $\frac{(\dot{E}_{2(1)} + \sqrt{3}\dot{I}_2 z_1)}{\sqrt{3}z_2}$ , а також змінюються і втрати  $\Delta P_2$ .

Визначальним для забезпечення нерівності (2) є відносна фаза  $\dot{E}_{2(1)}$  та  $\dot{E}_{2(2)}$ . Забезпечити ту або іншу фазу ЕРС можна під'єднанням несиметричних навантажень до мережі

або під'єднанням ліній із несиметричними електроприймачами до збірних шин. Згадані технічні заходи це різновиди практичної реалізації задачі внутрішнього симетрування.

### Внутрішнє симетрування та втрати $\Delta P_2$ в живильних та розподільних мережах у разі симетрування напруг

Задача внутрішнього симетрування навантажень полягає в такому під'єднанні групи однофазних електроприймачів до мережі, якому відповідає найменший (за модулем) струм зворотної послідовності, що створюється цими навантаженнями. Відомі наукові роботи [4, 5] передбачають знаходження розв'язків, виходячи саме з такої умови. Кінцева фаза струму зворотної послідовності (відповідно і ЕРС) до уваги не береться. Зауважимо, що задача внутрішнього симетрування має альтернативні оптимальні розв'язки. Таких розв'язків три, кожний з яких відрізняється за кінцевим ефектом тим, що отримані струми зворотної послідовності однакового модуля, а фази відрізняються на  $120^\circ$ . Для локальної задачі (що вирішується для окремого вузла) всі розв'язки рівнозначні.

У випадку, для якого зображена заступна схема (див. рис. 1), є можливість приймати до реалізації те або інше з оптимальних рішень внутрішнього симетрування, змінюючи відносну фазу між  $\dot{E}_{2(1)}$  та  $\dot{E}_{2(2)}$ . Факт залежності втрат  $\Delta P_2$  від взаємної фази  $\dot{E}_{2(1)}$  та  $\dot{E}_{2(2)}$  є відомим, наприклад [3]. Дослідимо залежність додаткових втрат  $\Delta P_2$  у разі симетрування напруг за допомогою СП та значень напруг зворотної послідовності у вузлах мережі від того, який із оптимальних розв'язків задачі внутрішнього симетрування прийнято до реалізації.

Для напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП —  $\dot{U}_{2A}$  можна записати

$$\dot{U}_{2A} = \dot{E}_{2(1)} + \sqrt{3}i_2 z_1 = \frac{\dot{E}_{2(1)} z_2 + \dot{E}_{2(2)} z_1}{z_2 + z_1}.$$

Якщо вважати, що внутрішнє симетрування навантажень виконано в мережах споживача, то в залежності від того, який із альтернативних оптимальних розв'язків реалізовано, можна отримати такі варіанти для  $\dot{U}_{2A}$  (вибравши положення дійсної осі комплексної площини таким, що збігається із вектором  $\dot{E}_{2(1)}$ ):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2A(1)} &= \frac{E_{2(1)} z_2 e^{j\beta_2} + E_{2(2)} z_1 e^{j(\alpha+\beta_1)}}{z_2 e^{j\beta_2} + z_1 e^{j\beta_1}}; \\ \dot{U}_{2A(2)} &= \frac{E_{2(1)} z_2 e^{j\beta_2} + E_{2(2)} z_1 e^{j(\alpha+\beta_1-120)}}{z_2 e^{j\beta_2} + z_1 e^{j\beta_1}}; \\ \dot{U}_{2A(3)} &= \frac{E_{2(1)} z_2 e^{j\beta_2} + E_{2(2)} z_1 e^{j(\alpha+\beta_1+120)}}{z_2 e^{j\beta_2} + z_1 e^{j\beta_1}}, \end{aligned}$$

де  $\alpha$  — кут, що визначає відносне положення вектора  $\dot{E}_{2(2)}$  у вживаній системі відліку;

$\beta_1 = \arctg\left(\frac{x_1}{r_1}\right)$ ,  $r_1 + jx_1 = z_1$ ;  $\beta_2 = \arctg\left(\frac{x_2}{r_2}\right)$ ,  $r_2 + jx_2 = z_2$ ;  $\dot{U}_{2A(1)}$ ;  $\dot{U}_{2A(2)}$ ;  $\dot{U}_{2A(3)}$  — можливі

випадки отримання  $\dot{U}_{2A}$  в залежності від альтернативних фаз  $\dot{E}_{2(1)}$ .

Найменше значення  $U_{2A}$  буде забезпечене для випадку, якому відповідає  $\min\{U_{2A(1)}; U_{2A(2)}; U_{2A(3)}\}$ . Всі зазначені випадки в тому числі і той, який забезпечує мінімальне  $U_{2A}$ , проілюстровано на рис. 2.

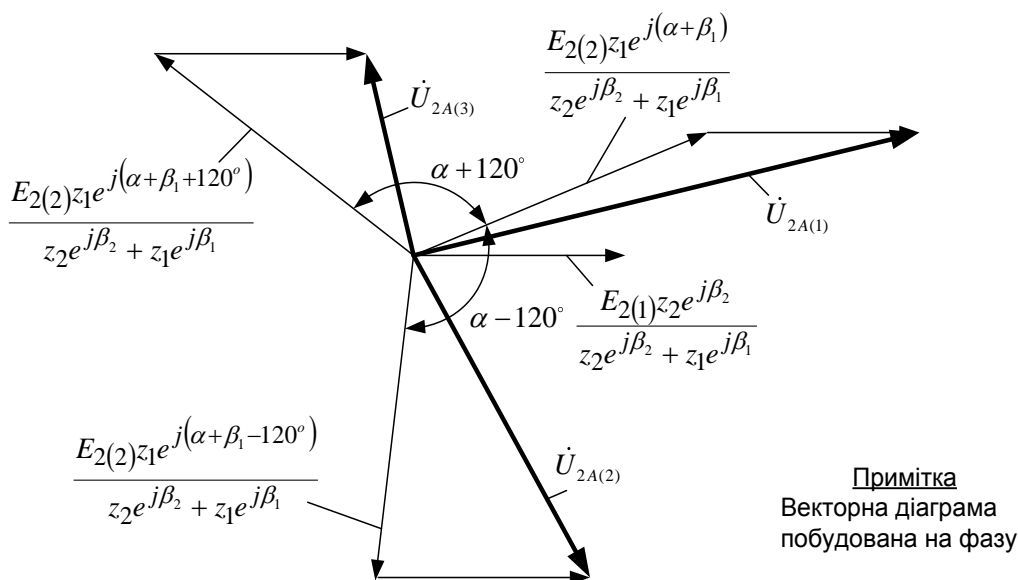


Рис. 2. Варіанти формування вектора  $\dot{U}_{2A}$

Із рис. 2 видно, що найменше  $U_{2A}$  буде, коли кут між векторами  $\frac{\dot{E}_{2(1)}z_2}{z_2 + z_1}$  та  $\frac{\dot{E}_{2(2)}z_1}{z_2 + z_1}$  максимально наблизатиметься до  $180^\circ$ .

Будемо вважати, що попереднім заходом в мережах стало широке впровадження задач внутрішнього симетрування навантажень з урахуванням аргументів підсумкового струму зворотної послідовності альтернативних оптимальних розв'язків. Саме такий підхід рекомендовано в [6], оскільки це дасть можливість знизити несиметрію напруг в окремих вузлах мережі і, як наслідок, зменшити встановлену потужність СП.

Виконаємо подальший аналіз властивостей втрат  $\Delta P_2$ , припустивши, що попередньо реалізовані зазначені заходи із внутрішнього симетрування навантажень.

За результатами впровадження внутрішнього симетрування забезпечується

$$\arg \dot{E}_{2(2)} \approx \arg \dot{E}_{2(1)} - 180^\circ,$$

і для різниці  $\dot{E}_{2(2)} - \dot{E}_{2(1)}$  з вибраною орієнтацією комплексної площини можна записати:

$$\dot{E}_{2(2)} - \dot{E}_{2(1)} \approx E_{2(2)} + E_{2(1)}.$$

Для однорідних мереж  $\beta_2 = \beta_1$ , а для інших реальних випадків можна припустити, що  $\beta_2 \approx \beta_1$ . З урахуванням цього, вираз (2) запишеться

$$\frac{z_2}{z_1} > \frac{E_{2(2)}}{E_{2(1)}},$$

що дозволяє провести поглиблений аналіз варіантів можливих змін  $\Delta P_2$  в активній складовій  $z_1$  та  $z_2$ .

В підтвердження правомірності отриманих результатів розглянемо епюру напруг, рис. 3, де  $z_{1*} = \frac{z_1}{z_6}$ ;  $z_{2*} = \frac{z_2}{z_6}$ ;  $E_{2(1)*} = \frac{E_{2(1)}}{E_6}$ ;  $E_{2(2)*} = \frac{E_{2(2)}}{E_6}$ ;  $z_6$ ;  $E_6$  — деякі базисні опір та ЕРС. По осі абсцис епюри напруг шкали опорів  $z_{1*}$  та  $z_{2*}$  такі, що для будь-якої точки виконується  $z_{1*} + z_{2*} = \text{const}$ . Це дає можливість оцінити характер зміни  $\Delta P_2$  в активних складових опорів  $z_{1*}$  та  $z_{2*}$  у разі переміщення точки  $A$  вздовж радіальної лінії електропередач.

Проаналізуємо зміни втрат  $\Delta P_2$  в опорі  $z_1$  за умови симетрування напруги у вузлі  $A$  або у вузлі  $A'$ . У відповідності з епюрою напруги вихідне значення напруги зворотної послідовності у вузлі  $A - U_{2A}$ , а у вузлі  $A' - U_{2A'}$ .

Основні етапи такого аналізу, який паралельно проводився для випадків, коли симетрування напруги виконується у вузлі  $A$  або у вузлі  $A'$ , наведені в табл. 1.

Для будь-якої точки на відрізку  $[a; b]$ , рис. 3, характерним є те, що за напрямком струму  $I_2$  напруга  $U_2$  зростає. Зворотну властивість мають точки, які знаходяться на відрізку  $[b; c]$ . За напрямком струму  $I_2$  напруга  $U_2$  зменшується.

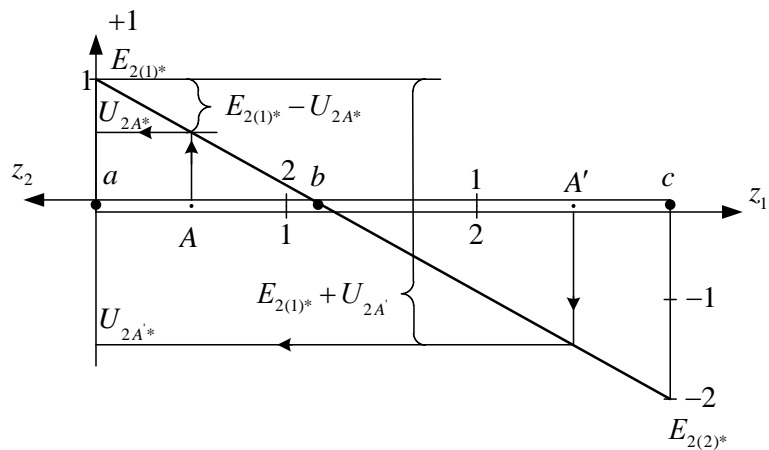


Рис. 3. Епюра напруг  $U_2$  вздовж радіальної лінії електричної мережі

Таблиця 1

Аналіз зміни  $\Delta P_2$  в активній складовій  $z_1$  у разі симетрування напруг

	Симетрування напруги у вузлі $A$	Симетрування напруги у вузлі $A'$
Струм через $z_1$ до симетрування напруги	$I_{2(z_1)}^{до} = -\frac{E_{2(1)} + E_{2(2)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} = -\frac{E_{2(1)} - U_{2A}}{\sqrt{3}z_1}$	$I_{2(z_1)}^{до} = -\frac{E_{2(1)} + E_{2(2)}}{\sqrt{3}(z_1 + z_2)} = -\frac{E_{2(1)} + U_{2A'}}{\sqrt{3}z_1}$
Струм через $z_1$ після повного симетрування напруги	$I_{2(z_1)}^{після} = -\frac{E_{2(1)}}{\sqrt{3}z_1}$	$I_{2(z_1)}^{після} = -\frac{E_{2(1)}}{\sqrt{3}z_1}$
Співвідношення між струмами $I_{2(z_1)}^{до}$ та $I_{2(z_1)}^{після}$	$I_{2(z_1)}^{після} > I_{2(z_1)}^{до}$	$I_{2(z_1)}^{після} < I_{2(z_1)}^{до}$
$\frac{z_{2*}}{z_1} \diamond \frac{E_{2(2)*}}{E_{2(1)*}}$	$\frac{2,5}{0,5} > \frac{2}{1}$	$\frac{0,5}{2,5} < \frac{2}{1}$
Висновок про зміни $\Delta P_2$ в активній складовій $z_1$	$\frac{\Delta P_2^{після}}{\Delta P_2^{до}} > 1$	$\frac{\Delta P_2^{після}}{\Delta P_2^{до}} < 1$
Узагальнення		
Така ж зміна $\Delta P_2$ відбувається у разі симетрування напруги в будь-якій точці на відрізку	$[a; b]$	$[b; c]$

Можливі варіанти зміни додаткових втрат  $\Delta P_2$  в опорі  $z_2$  оцінюються, аналізуючи другу складову виразу (1), яка описує зміну струму  $I_2$  у разі повного симетрування напруги у вузлі  $A$ . Якщо взяти до уваги спрощення, які можна ввести за умови, що попередньо виконано внутрішнє симетрування, то другу складову виразу (1) можна записати

$$-\frac{E_{2(1)}}{\sqrt{3}z_2} + I_2 \frac{z_1}{z_2},$$

і в тих випадках, коли

$$-\frac{E_{2(1)}}{\sqrt{3}z_2} + I_2 \frac{z_1}{z_2} > 0$$

відбувається зростання струму  $I_2$  в опорі  $z_2$  і, відповідно,  $\Delta P_2$  в активній складовій цього опору.

З цієї нерівності можна отримати:

$$-E_{2(1)} + U_{2(z_1)} > 0.$$

Якщо  $U_{z_1} = E_{2(2)} - U_{2A}$ , то:

$$E_{2(2)} - E_{2(1)} > U_{2A}.$$

У разі зворотної нерівності,  $E_{2(2)} - E_{2(1)} < U_{2A}$ , струм в опорі  $z_2$  зменшується і, відповідно, втрати  $\Delta P_2$  в його активній складовій також зменшуються у разі симетрування напруги у вузлі  $A$ .

Аналогічні результати отримані у випадку зворотного напрямку струму  $I_2$  із мереж енергопостачальної організації в мережу споживача.

### Узагальнення за отриманими результатами

Результати аналізу, отримані у розглянутих випадках, дають можливість зробити узагальнення на всі інші можливі випадки, які наведені в табл. 2, де  $\Delta P_2^{до}$ ;  $\Delta P_2^{після}$  — додаткові втрати  $\Delta P_2$  до і після симетрування напруги у вузлі  $A$ .

Таблиця 2

Можливі варіанти впливу СП на втрати  $\Delta P_2$  в мережах споживача та енергопостачальної організації

Можливий варіант	Заступна схема	$\frac{\Delta P_2^{після}}{\Delta P_2^{до}}$ в активній складовій опоры $z_1$	$\frac{\Delta P_2^{після}}{\Delta P_2^{до}}$ в активній складовій опоры $z_2$	Загальний висновок
1		>1	0	Втрати $\Delta P_2$ в мережах енергопостачальної організації зростають, а в мережах споживача зменшуються до нуля
2		0	>1	Втрати $\Delta P_2$ в мережах споживача зростають, а в мережах енергопостачальної організації зменшуються до нуля
3		>1, якщо $z_2/z_1 > E_{2(2)}/E_{2(1)}$	>1, якщо $E_{2(2)} - E_{2(1)} > U_{2A}$	Втрати $\Delta P_2$ в мережах споживача і енергопостачальної організації можуть як зменшуватися, так і зростати
		<1, якщо $z_2/z_1 < E_{2(2)}/E_{2(1)}$	<1, якщо $E_{2(2)} - E_{2(1)} < U_{2A}$	
4		>1, якщо $E_{2(1)} - E_{2(2)} > U_{2A}$	>1, якщо $z_1/z_2 > E_{2(1)}/E_{2(2)}$	
		<1, якщо $E_{2(1)} - E_{2(2)} < U_{2A}$	<1, якщо $z_1/z_2 < E_{2(1)}/E_{2(2)}$	

Отримано підтвердження того, що в результаті зміни струморозподілу у разі симетрування напруги за допомогою СП відбувається зміна додаткових втрат активної потужності  $\Delta P_2$ . Очевидно інтереси енергопостачальної організації та споживача в кінцевих результатах симетрування напруги суперечливі. Досконалі системи керування мають працювати з урахуванням цієї обставини. Інформація, наведена в табл. 2, може бути використаною під час розроблення алгоритмів керування несиметрією напруги в реальному масштабі часу.

## Висновки

1. Під'єднання СП для компенсації складових зворотної послідовності позначається на додаткових втратах електроенергії в електричних мережах. Їх зміна залежить від параметрів заступних схем для струмів зворотної послідовності та параметрів режиму, а характер зміни для мереж енергопостачальних організацій та споживачів може бути суперечливим.

2. Якщо однофазні електроприймачі під'єднані до мереж споживача, то у разі симетрування напруги за допомогою СП, під'єданого у вузлі розподілу балансової належності мереж, додаткові втрати активної потужності в мережах енергопостачальної організації зменшуються до нуля, а в мережах споживача зростають. Якщо несиметричне навантаження під'єдане до мереж енергопостачальної організації, то навпаки.

3. Симетрування напруги за допомогою СП має виконуватись після широкого впровадження внутрішнього симетрування навантажень, що знижує несиметрію напруги у вузлах мережі.

4. З під'єднанням несиметричних навантажень до мереж енергопостачальної організації та споживача характер зміни додаткових активних втрат в частинах мереж, які знаходяться на балансі різних суб'єктів господарювання, залежить від співвідношення ЕРС зворотної послідовності та опорів заступної схеми і може як зростати, так і зменшуватись.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. — К. : Техніка, 1981. — 160 с.
2. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. — Київ : Наукова думка, 1992. — 240 с. — ISBN № 5-12-002018-6.
3. Втрати активної потужності в системах електропостачання споживачів АПК та мережах живлення, зумовлені несиметрією режимів / Л. Б. Терешкевич, М. Й. Бурбело, В. В. Захаров, М. І. Цибульський // Вісник національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». — 2005. — Том 1, вип. 37. — С. 36—43.
4. Терешкевич Л. Б. Об одном алгоритме внутреннего симметрирования при управлении несимметричными режимами электрической сети / Л. Б. Терешкевич // Изв. вузов СССР «Энергетика» — 1980 — № 12 — С. 73—75.
5. Терешкевич Л. Б. Оптимальное внутреннее симетрування групи двоплечевих електроустановок / Л. Б. Терешкевич, Т. З. Сагайдак, В. В. Захаров // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2010 — № 6 — С. 48—52.
6. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов — К. : Наукова думка, 1985. — 268 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту

Стаття надійшла до редакції 13.05.11  
Рекомендована до друку 1.06.11

**Терешкевич Леонід Борисович** — завідувач кафедри, **Цибульський Максим Іванович** — асистент.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Бандура Ірина Олександрівна** — асистент кафедри енергопостачання Луцького національного технічного університету, Луцьк