

# Наука і сучасні технології

УДК 621.316.11

DOI: 10.31471/1993-9868-2018-2(30)-49-54

## ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕННЯ ФАЗ ЛІНІЙ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПІДПРИЄМСТВ НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ

Ю. Ф. Романюк, О. В. Соломчак, В. М. Черноус

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727172,  
e-mail: [erep@nupg.edu.ua](mailto:erep@nupg.edu.ua)

Досліджено вплив несиметрії навантаження фаз на втрати потужності в лініях електропередавання. Проаналізовано вплив перерозподілу навантаження фаз на втрати потужності у трифазній трипровідній лінії з ізолюваною нейтраллю. Показано, що в такій лінії виникають додаткові втрати потужності, які квадратично залежать від відносної зміни навантаження фаз. Досліджено вплив опору нульового проводу у чотирипровідній трифазній мережі на втрати потужності за різних режимів несиметрії. Показано, що втрати потужності у такій мережі значно більші, ніж у трипровідній мережі за однакової несиметрії навантаження фаз і залежать від опору нульового проводу. Значний економічний ефект можна одержати, збільшивши поперечний переріз нульового проводу. При цьому одночасно зменшуються втрати потужності та підвищується надійність роботи електричної мережі.

Ключові слова: електрична мережа, несиметричне навантаження, втрати потужності, нейтральний провід.

Исследовано влияние несимметрии нагрузки фаз на потерю мощности в линиях электропередач. Проанализировано влияние перераспределения нагрузки фаз на потерю мощности в трехфазной трехпроводной линии с изолированной нейтралью. Показано, что в такой линии возникают дополнительные потери мощности, которые квадратично зависят от относительного изменения нагрузки фаз. Исследовано влияние сопротивления нулевого провода в четырехпроводной трехфазной сети на потери мощности при различных режимах несимметрии. Показано, что потери мощности в такой сети значительно выше, чем в трехпроводной сети при одинаковой несимметрии нагрузки фаз и зависят от сопротивления нулевого провода. Значительный экономический эффект можно получить при увеличении поперечного сечения нулевого провода. При этом одновременно уменьшаются потери мощности и повышается надежность работы электрической сети.

Ключевые слова: электрическая сеть, несимметричные нагрузки, потери мощности, нейтральный провод.

The influence of phase load asymmetry on power losses in electric lines is investigated. The influence of phase load redistribution on power losses in three-phase three-conductor line with the insulated neutral is analyzed. It is demonstrated that additional power losses occur in this line which are in quadratic dependency on the relative change of phase loads. The influence of neutral conductor resistance in the four-conductor three-phase electric network on power losses in different asymmetry modes is investigated. It is shown that power losses in this network are much larger than in three-conductor network with identical phase load asymmetry and depend on the neutral conductor resistance. Significant economic effect can be obtained by increasing the cross-section of neutral conductor. At the same time, the simultaneous decrease of power losses and increase of the operational reliability of electric network are observed.

Keywords: electric network, asymmetrical loads, power losses, neutral conductor.

### Постановка і актуальність проблеми

Одним з ефективних технічних заходів щодо зниження втрат електроенергії в розподільчих електричних мережах підприємств наф-

тогазової галузі є симетрування несиметричних режимів навантаження, що дає змогу значно зменшити втрати електроенергії та видатки на її оплату.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема енергозаощадження останнім часом є надзвичайно актуальною для України у зв'язку зі здорожчанням електроенергії. Значна кількість наукових робіт була присвячена питанням економії електроенергії в електричних мережах електропостачальних систем [1-12] та інші. Наприклад, оптимізація та підвищення енергоефективності електричних мереж нафтогазових промислів може бути досягнута шляхом правильного вибору типу, економічно доцільної потужності та розміщення компенсуювальних пристроїв [4]. Важливими напрямками енергозаощадження є забезпечення економічних режимів роботи трансформаторів знижувальних підстанцій та оптимізація рівнів напруги в центрах живлення. Аналіз методів розрахунку втрат електроенергії та питання вибору технічних та організаційних заходів щодо їх зниження розглядаються в [5-7]. Одним з ефективних технічних заходів зниження втрат і підвищення якості електроенергії є симетрування навантаження у трифазних мережах електропостачальних систем [8-12]. У даній роботі розглядаються питання впливу несиметрії навантаження та опору нульового проводу в трифазній мережі на величину сумарних втрат потужності.

### Невирішені частин загальної проблеми

Симетрування навантаження з метою зменшення втрат електроенергії та підвищення надійності електропостачання здійснюють, в основному, в електропостачальних організаціях шляхом періодичного вирівнювання навантаження фаз у низьковольтних розподільчих мережах, в той час як на підприємствах нафтогазової галузі цій роботі приділяється недостатня увага, або вона взагалі не проводиться.

Що стосується збільшення перерізу нульового проводу в сучасних мережах згідно з чинними правилами, то це зумовлено, в першу чергу, необхідністю підвищення надійності електропостачання, оскільки через збільшення кількості нелінійних електроприймачів через нульовий провід протікають струми, співмірні з фазними, тому переріз нульового проводу вибирають рівним перерізу фазних проводів, що, в свою чергу, призводить також до зменшення втрат електроенергії.

Для того, щоб оцінити економічний ефект від симетрування навантаження, потрібно встановити загальні кількісні співвідношення між втратами за симетричного й несиметричного навантажень, тобто визначити відносний приріст втрат у випадку порушення симетрії навантаження. Другим важливим завданням є дослідження впливу опору нульового проводу на величину цих втрат з метою оцінки доцільності його заміни на провід з більшим поперечним перерізом у діючих електроустановках.

### Мета та завдання досліджень

Метою роботи є аналіз впливу перерозподілу навантаження фаз на втрати потужності у трифазній трипровідній мережі з ізольованою

нейтраллю та чотирипровідній мережі з глухо заземленою нейтраллю.

Для вирішення поставленої проблеми сформульовано такі завдання досліджень:

- аналіз втрат потужності у трифазних електричних мережах за різних режимів несиметрії;
- залежність втрат потужності від відносної зміни навантаження фаз;
- оцінка впливу опору нульового проводу на відносне збільшення втрат потужності в трифазних лініях за різних режимів несиметрії навантаження.

### Результати досліджень

#### *Вплив несиметрії навантаження фаз ліній електропередавання на економічність роботи електропостачальних систем*

Крім трифазних електроприймачів, в електричних мережах часто використовують однофазні електроприймачі. Несиметрія навантаження фаз призводить до збільшення втрат потужності та енергії в лініях і трансформаторах електропостачальних систем. Через нерівномірне навантаження фаз трифазної мережі виникає несиметрія лінійних і фазних напруг, яка негативно впливає на роботу електроприймачів. За умови різних відхилень напруги від номінального значення їх робота погіршується. Так, наприклад, у випадку зниження напруги зменшується світловий потік ламп та освітленість робочих місць, що призводить до зниження продуктивності праці й виникнення травм на виробництві. Якщо ж напруга підвищена, то навпаки, світловий потік ламп збільшується, але значно зменшується термін їх служби (підвищення напруги на 10 % порівняно з номінальним значенням зумовлює скорочення терміну служби ламп майже утричі).

Несиметрія напруг призводить також до перегрівання електродвигунів і зміни їх характеристик. За несиметричної системи напруг у двигуні виникає магнітне поле оберненої послідовності, яке обертається у зворотному напрямі відносно ротора і наводить у роторі змінний струм подвійної частоти. За цих умов виникають додаткові втрати в обмотці і сталі ротора, двигун перегрівається, а його ізоляція швидко старіє. Крім того, за несиметрії напруг зменшується обертовий момент і підвищується вібрація двигунів. Отже, несиметрія навантаження фаз, яка супроводжується несиметрією напруг, значною мірою впливає на ефективність роботи електропостачальних систем та їх електроприймачів.

#### *Вплив несиметрії навантаження фаз ліній на втрати потужності*

Втрати активної потужності у трифазній мережі з ізольованою нейтраллю за нерівномірного навантаження фаз дорівнюють

$$\Delta P_H = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) r_\phi, \quad (1)$$

де  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – струми навантаження фаз лінії;

$r_\phi$  – опір фаз лінії.

За симетричного рівномірного навантаження фаз ( $I_A = I_B = I_C = I_{CP}$ ) втрати потужності

$$\Delta P = 3 I_{CP}^2 r_\phi, \quad (2)$$

де  $I_{CP} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$  – середнє значення струму.

Коефіцієнт збільшення втрат потужності в лінії з ізольованою нейтраллю за нерівномірного навантаження фаз

$$K_H = \frac{\Delta P_H}{\Delta P} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3 I_{CP}^2}. \quad (3)$$

В електричних мережах із заземленою нейтраллю за нерівномірного навантаження фаз виникає струм нульової послідовності  $I_0$ , який протікає через землю в мережах напругою 110 кВ і вище, або через нульовий провід – у низьковольтних мережах.

Струм у нульовому проводі

$$I_N = 3 I_0 = I_A + a^2 I_B + a I_C, \quad (4)$$

де  $a = e^{j120^\circ}$  – оператор повороту вектора струму на  $120^\circ$  проти годинникової стрілки.

Згідно з [1] струм у нульовому проводі можна визначити з виразу

$$I_N^2 = 1,5 (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) - 4,5 I_{CP}^2. \quad (5)$$

Сумарні втрати потужності у трифазній лінії з нульовим проводом за нерівномірного навантаження фаз

$$\Delta P_H = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) r_\phi + I_N^2 r_N, \quad (6)$$

де  $r_\phi, r_N$  – відповідно опори фаз і нульового проводу.

За рівномірного навантаження фаз струм через нульовий провід не протікає ( $I_N = 0$ ). При цьому втрати потужності визначають згідно з (2).

Коефіцієнт збільшення втрат потужності за нерівномірного навантаження фаз у трифазній лінії з нульовим проводом [2] обчислюються за виразом

$$K_H = \frac{\Delta P_H}{\Delta P} = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3 I_{CP}^2} \left( 1 + 1,5 \frac{r_N}{r_\phi} \right) - 1,5 \frac{r_N}{r_\phi}. \quad (7)$$

Якщо опір нульового проводу  $r_N = r_\phi$ , то одержимо

$$K_H = \frac{2,5 (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)}{3 I_{CP}^2} - 1,5. \quad (8)$$

За рівномірного навантаження фаз, коли  $I_A = I_B = I_C = I_{CP}$ , коефіцієнт нерівномірності  $K_H = 1$ , при цьому  $\Delta P_H = \Delta P$ .

У загальному випадку втрати потужності за нерівномірного навантаження фаз трифазної мережі можна визначити за формулою

$$\Delta P_H = K_H \Delta P, \quad (9)$$

де  $\Delta P$  – втрати потужності за рівномірного навантаження.

Визначимо втрати активної потужності у трифазній чотирипровідній лінії напругою 380/220 В, виконаної кабелем марки АПВ-4\*35 довжиною  $l = 500$  м. Сумарне навантаження лінії становить 15 кВт. Розрахунок виконаємо для рівномірного навантаження фаз ( $P_A = P_B = P_C = 5$  кВт) та нерівномірного навантаження ( $P_A = 5$  кВт,  $P_B = 4$  кВт,  $P_C = 6$  кВт).

Активні опори фаз і нульового проводу лінії приймаємо однаковими:

$$r_\phi = r_N = r_0 l = 0,445 \text{ Ом.}$$

Струми фаз за їх рівномірного навантаження

$$I_A = I_B = I_C = I_{CP} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{ном}} = \frac{15 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 22,7 \text{ А.}$$

Втрати потужності в лінії за рівномірного навантаження фаз

$$\Delta P = 3 I_{CP}^2 r_\phi = 3 \cdot 22,7^2 \cdot 0,445 \cdot 10^{-3} = 0,69 \text{ кВт.}$$

Струми фаз за нерівномірного навантаження:

$$I_A = \frac{P_A}{U_\phi} = \frac{5 \cdot 10^3}{220} = 22,7 \text{ А;}$$

$$I_B = \frac{P_B}{U_\phi} = \frac{4 \cdot 10^3}{220} = 18,18 \text{ А;}$$

$$I_C = \frac{P_C}{U_\phi} = \frac{6 \cdot 10^3}{220} = 27,27 \text{ А.}$$

Нехтуючи зміщенням нейтралі у разі нерівномірного навантаження, струм у нульовому проводі визначимо з виразу (5):

$$I_N^2 = 1,5 (22,7^2 + 18,18^2 + 27,27^2) - 4,5 \cdot 22,7^2 = 65,38 \text{ А;}$$

$$I_N = \sqrt{65,38} = 8,1 \text{ А.}$$

Сумарні втрати потужності за нерівномірного навантаження згідно з (6)

$$\Delta P_H = \left[ (22,7^2 + 18,18^2 + 27,27^2) \cdot 0,445 + 8,1^2 \cdot 0,445 \right] \cdot 10^{-3} = 0,737 \text{ кВт.}$$

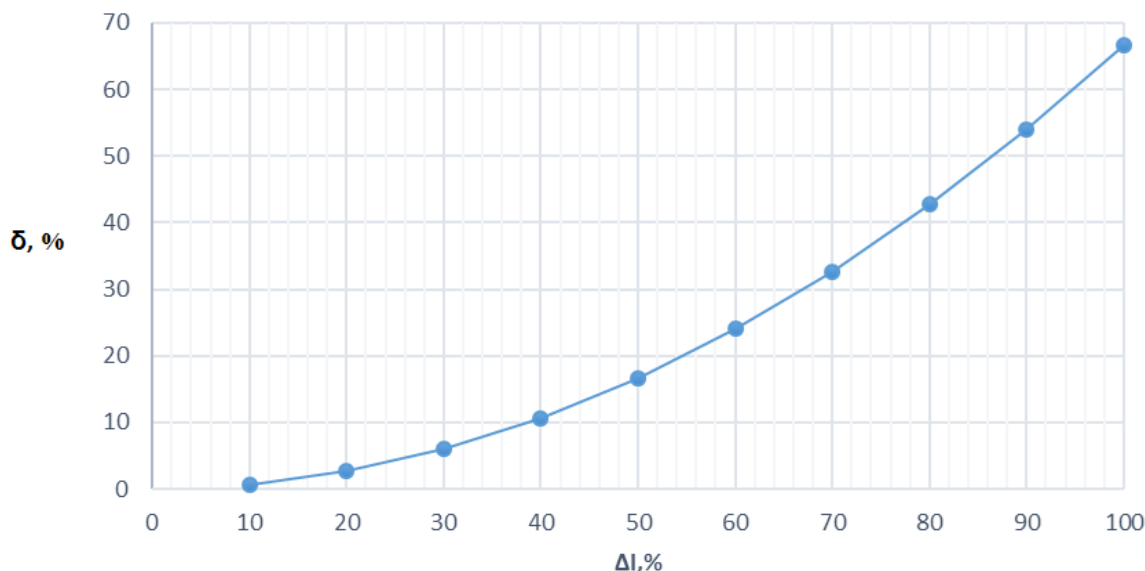
Відносне збільшення втрат потужності за нерівномірного навантаження фаз, виражене у відсотках порівняно з рівномірним навантаженням,

$$\delta = \frac{\Delta P_H - \Delta P}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{0,737 - 0,69}{0,69} \cdot 100 = 6,8 \text{ \%}.$$

Проаналізуємо у загальному вигляді, як впливає перерозподіл навантаження фаз на втрати потужності у трифазній трипровідній лінії з ізольованою нейтраллю.

**Таблиця 1 – Результати розрахунку додаткових втрат потужності залежно від відносної зміни навантаження фаз B і C трифазної лінії з ізолюваною нейтраллю**

Відносна зміна навантаження фаз $\Delta I$ , %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Коефіцієнт збільшення втрат $K_H$	1,007	1,027	1,06	1,107	1,167	1,24	1,327	1,427	1,54	1,667
Відносне збільшення втрат $\delta$ , %	0,7	2,7	6	10,7	16,7	24	32,7	42,7	54	66,7



**Рисунок 1 – Графік залежності додаткових втрат потужності  $\delta$  % від відносної зміни навантаження фаз  $\Delta I$  %**

Якщо, наприклад, струм навантаження фази B зменшиться на  $\Delta I$ , а у фазі C – збільшиться на таку саму величину порівняно зі струмом фази A, то сумарні втрати потужності в лінії з однаковими опорами фаз r дорівнюватимуть

$$\begin{aligned} \Delta P_H &= I_A^2 r + \left( I_A - \frac{\Delta I\%}{100} I_A \right)^2 r + \left( I_A + \frac{\Delta I\%}{100} I_A \right)^2 r = \\ &= 3 I_A^2 r + 2 \left( \frac{\Delta I\%}{100} I_A \right)^2 r = \Delta P + 2 \left( \frac{\Delta I\%}{100} I_A \right)^2 r. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким чином, у зв'язку з квадратичною залежністю втрат потужності від струмів навантаження окремих фаз, втрати в лінії збільшаться порівняно з втратами за рівномірного навантаження на додаткову величину

$$\Delta P_{\text{дод}} = 2 \left( \frac{\Delta I\%}{100} I_A \right)^2 r, \quad (11)$$

а відносне збільшення втрат

$$\delta = \frac{\Delta P_H - \Delta P}{\Delta P} 100\%. \quad (12)$$

Наприклад, у разі зменшення струму фази B порівняно з фазою A на 20% та збільшення струму фази C на таку саму величину втрати потужності дорівнюватимуть

$$\Delta P_H = I_A^2 r + (0,8 I_A)^2 r + (1,2 I_A)^2 r = 3,08 I_A^2 r,$$

а коефіцієнт збільшення втрат

$$K_H = \frac{\Delta P_H}{\Delta P} = \frac{3,08 I_A^2 r}{3 I_A^2 r} = 1,027.$$

Аналогічний результат одержимо з виразу (10).

Відносне збільшення втрат потужності

$$\delta = \frac{1,027 \Delta P - \Delta P}{\Delta P} 100 = 2,7\%.$$

Отже, втрати потужності в лінії у цьому випадку збільшаться на 2,7% порівняно з режимом рівномірного навантаження.

У таблиці 1 наведені результати розрахунку коефіцієнта збільшення втрат потужності  $K_H$  і відносне збільшення втрат потужності  $\delta$  залежно від відносної зміни навантаження фаз  $\Delta I$ , %.

Графічна залежність відносного збільшення втрат потужності від відносної зміни навантаження фаз B і C трифазної лінії зображена на рисунку 1.

Як видно з рисунка 1, додаткові втрати потужності зі збільшенням ступеня несиметрії навантаження квадратично збільшуються. Так, наприклад, у разі розвантаження фази B і збільшення навантаження фази C відповідно на 50% втрати потужності в лінії збільшаться на 16,7%, а при повному розвантаженні фази B і збільшенні навантаження фази C на 100% сумарні втрати потужності в лінії збільшаться на 66,7%.

**Таблиця 2 – Результати розрахунку відносного збільшення втрат потужності у три- та чотирипровідній мережі за різних значень струмів навантаження фаз лінії**

Вид електричної мережі		Струми навантаження фаз, А			Середнє значення струму $I_{CP}, A$	Коефіцієнт збільшення втрат потужності $K_H$	Відносне збільшення втрат потужності $\delta, \%$
		$I_A$	$I_B$	$I_C$			
Трифазна трипровідна мережа з ізольованою нейтраллю		2	1	3	2	1,167	16,7
		2	0	4	2	1,67	67
Трифазна чотирипровідна мережа з глухозаземленою нейтраллю	$r_N = r_\phi$ $r_\phi = 1 \text{ Ом}$	2	1	3	2	1,417	41,7
		2	0	4	2	2,67	167
	$r_N = 1,25r_\phi$	2	1	3	2	1,48	48
		2	0	4	2	2,92	192
	$r_N = 1,5r_\phi$	2	1	3	2	1,54	54
		2	0	4	2	3,17	217
	$r_N = 1,75r_\phi$	2	1	3	2	1,61	61
		2	0	4	2	3,42	242
	$r_N = 2r_\phi$	2	1	3	2	1,67	67
		2	0	4	2	3,67	267

**Вплив опору нульового проводу на відносне збільшення втрат потужності в трифазних лініях за різних режимів несиметрії**

Припустимо, що струми навантаження фаз трифазної лінії з однаковими опорами фаз  $r_A = r_B = r_C = r_\phi = 1 \text{ Ом}$  відповідно дорівнюють  $I_A = 2 \text{ А}, I_B = 1 \text{ А}, I_C = 3 \text{ А}$ .

Втрати потужності у трифазній мережі з ізольованою нейтраллю за нерівномірного навантаження фаз

$$\Delta P_H = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) r_\phi = 2^2 + 1^2 + 3^2 = 14 \text{ Вт.}$$

Середнє значення струму

$$I_{CP} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = \frac{2+1+3}{3} = 2 \text{ А.}$$

Втрати потужності за симетричного рівномірного навантаження фаз лінії

$$I_A = I_B = I_C = I_{CP} \text{ дорівнюватимуть}$$

$$\Delta P = 3 I_{CP}^2 r_\phi = 3 \cdot 2^2 = 12 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт збільшення втрат потужності в мережі з ізольованою нейтраллю за нерівномірного навантаження фаз

$$K_H = \frac{\Delta P_H}{\Delta P} = \frac{14}{12} = 1,167.$$

Відносне збільшення втрат потужності за нерівномірного навантаження фаз

$$\delta = \frac{\Delta P_H - \Delta P}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{14 - 12}{12} \cdot 100 = 16,7 \%.$$

У таблиці 2 наведені результати розрахунку відносного збільшення втрат потужності для три- і чотирипровідної мережі за різних значень струмів навантаження фаз.

Проаналізувавши результати розрахунку, бачимо, що у чотирипровідній мережі втрати потужності за однакової несиметрії навантаження фаз значно більші, ніж у трипровідній, а їх величина залежить від опору нульового про-

воду. Так, наприклад, за однакових значень опорів фаз і нульового проводу та відносної зміни навантаження фаз  $\Delta I = 50 \%$  втрати потужності у чотирипровідній мережі збільшуються на 41,7 % порівняно з рівномірним навантаженням, а у трипровідній тільки на 16,7 %. У разі збільшення опору нульового проводу удвічі порівняно з опором фазних проводів (відповідно зменшенні удвічі його поперечного перерізу) втрати потужності збільшаться на 67%.

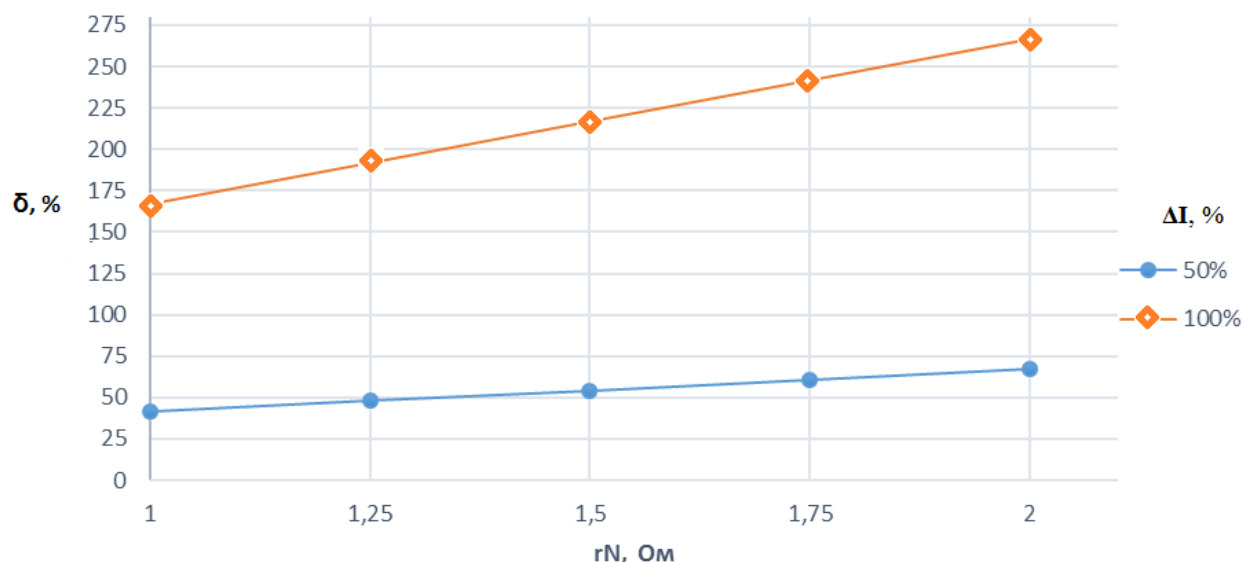
Таким чином, відносне збільшення втрат значною мірою залежить від відносної зміни навантаження фаз. Так, за відносної зміни навантаження фаз  $\Delta I = 100 \%$  (повне розвантаження фази **B** з одночасним збільшенням удвічі навантаження фази **C**) втрати потужності у чотирипровідній мережі збільшуються на 167 % порівняно з рівномірним навантаженням фаз, тобто їх відносне значення збільшується учетверо порівняно з попереднім прикладом.

На рисунку 2 зображена графічна залежність відносного збільшення втрат потужності від опору нейтрального проводу  $r_N$  для двох значень відносної зміни навантаження фаз лінії -  $\Delta I = 50 \%$  і  $\Delta I = 100 \%$ .

**Висновки**

Нерівномірне навантаження фаз призводить до суттєвого збільшення втрат потужності, а їх відносна величина залежить від відносної зміни навантаження та опору нульового проводу.

Суттєвий економічний ефект можна одержати шляхом збільшення поперечного перерізу нульового проводу. При цьому одночасно підвищується надійність роботи електричної мережі та зменшуються втрати потужності та енергії.



**Рисунок 2 – Графічні залежності відносного приросту втрат від опору  $r_N$  нульового проводу для різних значень відносної зміни навантаження фаз лінії**

Під час експлуатації електричних мереж економічно доцільно вирівнювати навантаження фаз з метою зменшення втрат потужності в електропостачальних системах та підвищення якості електроенергії.

#### Література

1 Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

2 Воротницкий В. Э. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В. Э. Воротницкий, Ю. С. Железко, З. Н. Казанцев [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

3 Поспелов Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 216 с.

4 Романюк Ю. Ф. Вибір типу й оптимальної потужності джерел компенсації реактивного навантаження споживачів з використанням функції Лагранжа / Ю. Ф. Романюк, О. В. Соломчак // Нафтогазова енергетика. – 2016. – № 1(23). – С. 61.

5 Романюк Ю. Ф. Підвищення економічної ефективності роботи трансформаторів знижувальних підстанцій підприємств нафтогазової галузі / Ю. Ф. Романюк, К. В. Коломойцев // Нафтогазова енергетика. – 2014. – № 2(22). – С. 71.

6 Романюк Ю. Ф. Оптимізація рівнів напруги в електричних мережах з метою зменшення втрат потужності та енергії в трансформаторах / Ю. Ф. Романюк, О. В. Соломчак // Промелектро. – 2014. – № 6(90). – С. 45

7 Романюк Ю. Ф. Оптимізація режимів роботи трансформаторів знижувальних підстанцій нафтопромислових мереж / Ю. Ф. Романюк, М. Й. Федорів, Ю. О. Терлецький // Нафтогазова енергетика. – 2014. – № 2(22). – С. 63.

8 Dickson K. Chembe. Reduction of Power Losses Using Phase Load Balancing Method in Power Networks. // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, October 20-22, 2009, San Francisco, USA. - Vol I.

9 Izudin D'zafi'c, E. Halilovi'c, Rabih A. Jabr, Bikash C., Dino Ablakovi'c. Influence of Distribution Line Asymmetry on Power Flow Results. // 2014 IEEE PES General Meeting, 27-31 July 2014.

10 E. Shutov, T. Turukina, I. Elfimov. Unbalance Level Regulating Algorithm in Power Distribution Networks // Energy and Power Engineering, 2018, No. 10, p. 65-76

11 R. Sureshkumar. Three phase load balancing and energy loss reduction in distribution network using labiew. / R.Sureshkumar and P.Maithili. // International Journal of Pure and Applied Mathematics. - Volume 116 No. 11 2017, - p.181-189.

12 I. Dzafic, M. Gilles, R. A. Jabr, B. C. Pal, S. Henselmeyer, "Real time estimation of loads in radial and unsymmetrical three-phase distribution networks", IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 4, pp. 4839-4848, Nov. 2013.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
03.12.18

Рекомендована до друку  
професором **Костишиним В.С.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Бурбелом М.Й.**  
(Вінницький національний технічний  
університет, м. Вінниця)