

УДК 621.314

С.П. Денисюк, докт. техн. наук (Ін-т електродинаміки НАН України, Київ),
М.В. Тименко (Нац. техн. ун-т України “Київський політехнічний інститут”),
І.П. Радиш (Закарпатський регіональний центр енергоефективних технологій, Мукачеве)

АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КОЛАХ З НЕСИНУСОЇДАЛЬНИМИ СТРУМАМИ ТА НАПРУГАМИ

Проаналізовано складові додаткових втрат електроенергії в колах з несинусоїдальними струмами та напругами. Визначено характер їх поведіння, розміщення екстремальних значень в залежності від рівнів несинусоїдальності та несиметрії сигналів.

Проанализированы составляющие дополнительных потерь электроэнергии в цепях с несинусоидальными токами и напряжениями. Определен характер их поведения, размещения экстремальных значений в зависимости от уровней несинусоидальности и несимметрии сигналов.

При оцінці енергетичних процесів у колах з несинусоїдальними сигналами важливо проаналізувати складові навантажувальних втрат електроенергії P_H , величини яких обумовлені різними факторами неякості електроенергії, зокрема, наявністю вищих гармонічних складових, несиметрії тощо [1, 2, 4, 5]. Так, при оптимізації параметрів та режимів роботи виділеного класу кіл (наприклад, при розробці рекомендацій по усуненню (компенсації) складових реактивної потужності Фризе) необхідно, поряд із співставленням дольового внеску окремих складових втрат, знати характер поведіння та зміщення їх екстремальних значень.

Виділення складових потужності навантажувальних втрат P_H розглянемо для схеми, де система напруг генератора симетрична і синусоїдальна, а через j -ту фазу n_Φ -фазної схеми протікають несинусоїдальні та несиметричні струми [1–3]:

$$i_j(t) = \sqrt{2} (I_j \sin(\omega t + \varphi_j) + \sum_{k=1}^{N_\Gamma} (I_{jk} \sin(k\omega t + \psi_{jk}^i))), \quad j = 1, \dots, n_\Phi. \quad (1)$$

Для одного періоду T роботи схеми потужність навантажувальних втрат P_H представляється сумою номінальних $P_{H,H}$ та додаткових P_D втрат ($P_H = P_{H,H} + P_D$) [1, 2]. Номінальні втрати визначаються умовами роботи схеми при номінальних режимах та оптимальному виборі параметрів кіл з несинусоїдальними сигналами:

$$P_{H,H} = (R_s/n_\Phi) \left(\sum_{j=1}^{n_\Phi} I_j \cos \varphi_j \right)^2 = R_s P^2 / (n_\Phi U^2). \quad (2)$$

З урахуванням виразів (1), (2) на основі принципів декомпозиції потужності Фризе Q_Φ додаткові втрати можна представити сумою шести складових [1, 3, 6]:

$$P_D = P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} + P_{D4} + P_{D5} + P_{D6}. \quad (3)$$

Складові втрати P_D у виразі (3) обумовлені наступними факторами неякості електроенергії у виділеному перетині схеми: симетричністю реактивної потужності основної частоти – P_{D1} ; несиметричністю реактивної потужності основної частоти – P_{D2} ; несиметричністю активної потужності основної частоти – P_{D3} ; симетричністю реактивної потужності вищих гармонік – P_{D4} ; несиметричністю реактивної потужності вищих гармонік – P_{D5} ; несиметричністю активної потужності вищих гармонік – P_{D6} .

Характер поведіння складових P_{D1}, \dots, P_{D6} розглянемо на прикладі фрагменту трифазної схеми, в електричних лініях якої протікають несинусоїдальні та несиметричні струми:

$$\begin{aligned}
 i_A(t) &= \sqrt{2} I_A \sin(\omega t - \varphi_A) + \sqrt{2} I_{A(3)} \sin(3\omega t - \varphi_{A(3)}); \\
 i_B(t) &= \sqrt{2} I_B \sin(\omega t - \varphi_B) + \sqrt{2} I_{B(3)} \sin(3\omega t - \varphi_{B(3)}); \\
 i_C(t) &= \sqrt{2} I_C \sin(\omega t - \varphi_C) + \sqrt{2} I_{C(3)} \sin(3\omega t - \varphi_{C(3)}),
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

а система напруг діючого трифазного генератора ЕРС симетрична. Таку трифазну систему можна розглядати як еквівалентну модель кола, в якій третя гармоніка струму визначена на умовах еквівалентності впливу додаткових втрат від довільного спектра вищих гармонік.

Використовуючи традиційний алгоритм розрахунку втрат [4–6], навантажувальні втрати P_H в перетині системи генератор – навантаження можна знайти зі співвідношення

$$P_H = R_s (I_A^2 + I_{A(3)}^2 + I_B^2 + I_{B(3)}^2 + I_C^2 + I_{C(3)}^2). \tag{5}$$

Числове значення навантажувальних втрат P_H , визначене згідно з (5), не дає можливості визначити якісний склад навантажувальних втрат, зокрема, оцінити рівні додаткових втрат, обумовлених третьою гармонікою струму. Згідно зі співвідношенням (2) номінальні навантажувальні втрати, обумовлені передачею в схемі симетричної активної потужності, визначаються співвідношенням

$$P_{H,H} = R_s (I_A \cos \varphi_A + I_B \cos \varphi_B + I_C \cos \varphi_C)^2 / 3. \tag{6}$$

Розклад на складові величини $P_D = P_H - P_{H,H}$, де P_H та $P_{H,H}$ визначаються за формулами (5) та (6), здійснимо при врахуванні таких факторів неякості електроенергії у виділеному елементі схеми [1–3]: симетричної реактивної потужності першої гармоніки P_{D1} ; несиметричності реактивної потужності першої гармоніки P_{D2} ; несиметричності активної потужності першої гармоніки P_{D3} ; симетричної реактивної потужності третьої гармоніки P_{D4} ; несиметричності реактивної потужності третьої гармоніки P_{D5} ; несиметричності активної потужності третьої гармоніки P_{D6} .

Додаткові навантажувальні втрати для виділеного перетину визначаються за такими співвідношеннями:

$$P_{D1} = R_s (I_A \sin \varphi_A + I_B \sin \varphi_B + I_C \sin \varphi_C)^2 / 3; \tag{7}$$

$$P_{D2} = R_s [(I_A \cos \varphi_A - I_B \cos \varphi_B)^2 + (I_B \cos \varphi_B - I_C \cos \varphi_C)^2 + (I_C \cos \varphi_C - I_A \cos \varphi_A)^2] / 3; \tag{8}$$

$$P_{D3} = R_s [(I_A \sin \varphi_A - I_B \sin \varphi_B)^2 + (I_B \sin \varphi_B - I_C \sin \varphi_C)^2 + (I_C \sin \varphi_C - I_A \sin \varphi_A)^2] / 3; \tag{9}$$

$$P_{D4} = R_s (I_{A(3)} \sin \varphi_{A(3)} + I_{B(3)} \sin \varphi_{B(3)} + I_{C(3)} \sin \varphi_{C(3)})^2 / 3; \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 P_{D5} = R_s [(I_{A(3)} \sin \varphi_{A(3)} - I_{B(3)} \sin \varphi_{B(3)})^2 + (I_{B(3)} \sin \varphi_{B(3)} - I_{C(3)} \sin \varphi_{C(3)})^2 + \\
 + (I_{C(3)} \sin \varphi_{C(3)} - I_{A(3)} \sin \varphi_{A(3)})^2] / 3;
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 P_{D6} = R_s [(I_{A(3)} \cos \varphi_{A(3)} - I_{B(3)} \cos \varphi_{B(3)})^2 + (I_{B(3)} \cos \varphi_{B(3)} - I_{C(3)} \cos \varphi_{C(3)})^2 + \\
 + (I_{C(3)} \cos \varphi_{C(3)} - I_{A(3)} \cos \varphi_{A(3)})^2] / 3.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Згідно зі співвідношеннями (7)–(12) величина P_D є функцію дванадцяти змінних: $P_D = f(I_A, I_B, I_C, I_{A(3)}, I_{B(3)}, I_{C(3)}, \varphi_A, \varphi_B, \varphi_C, \varphi_{A(3)}, \varphi_{B(3)}, \varphi_{C(3)})$.

Для спрощення подальшого викладу матеріалу покладемо: $R_s = 1,5$ Ом, $I_A = I_B = I_C = 100$ А, $I_{A(3)} = I_{B(3)} = I_{C(3)} = 20$ А. Аналіз виразів (7)–(12) показує, що форми поверхонь трійки складових P_{D1} , P_{D2} , P_{D3} та P_{D4} , P_{D5} , P_{D6} у декартових координатах мають однаковий вигляд, але з різними масштабними коефіцієнтами. З урахуванням чисельних значень величин R_s , I_A ,

$I_B, I_C, I_{A(3)}, I_{B(3)}, I_{C(3)}$ видно, що складові втрат, обумовлені дією струмів першої та третьої гармонік, залежать відповідно від трійки змінних $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ та $\varphi_{A(3)}, \varphi_{B(3)}, \varphi_{C(3)}$. Покладемо, що у декартовій системі координат значення відповідних величин втрат $P_{Д4}, P_{Д5}$ чи $P_{Д6}$ будемо відкладати по координаті Z , а по координатах X та Y – значення кутів $\varphi_{A(3)}$ та $\varphi_{B(3)}$. При цьому величина кута $\varphi_{C(3)}$ є змінним параметром.

Проаналізуємо кожну складову з виділенням відповідних сімейств тривимірних поверхонь $P_{Дj} = f(\varphi_{A(3)}, \varphi_{B(3)})$ при $\varphi_{C(3)} = const; j = 4, 5, 6$.

1. Складова $P_{Д4}$.

Графік зміни складової $P_{Д4}$ зображено на рис. 1 ($\varphi_{C(3)} = 0$), з якого видно, що складова $P_{Д4}$ має дві діагональні симетрії. Це пояснюється тим, що доданок $I_{C(3)} \sin \varphi_{C(3)}$ рівний нулю, а інші дві складові суми в першому і третьому квадрантах додаються, оскільки мають однакові знаки, тоді як у другому і четвертому квадрантах маємо їх різницю ($\sin(-\varphi) = -\sin(\varphi)$).

На рис. 2 наведені перерізи цієї функції по осі $\varphi_{B(3)}$ вздовж осі $\varphi_{A(3)}$, що представляють собою

функцію двох невідомих $P_{Д4} = f(\varphi_{A(3)}, \varphi_{B(3)})$ ($\varphi_{B(3)}$ – параметр). З графіків на рис. 2 видно діагональну симетрію мінімуму, а також зменшення малого максимуму (обширна зона нуля відсутня і нульовий рівень зміщується вздовж однієї прямої). Також можна побачити, що з

ростом величини $\varphi_{B(3)}$ мінімум зміщується в бік від'ємних кутів, тобто ліворуч від початку координат. Складова втрат $P_{Д4}$ досить неоднорідна, і для її зменшення в зонах максимумів достатньо в межах $[-\pi/2, \pi/2]$ змінювати різницю фаз між струмом і напругою у одній із фаз, що досить різко регулюватиме величину складової реактивної потужності у трифазній системі.

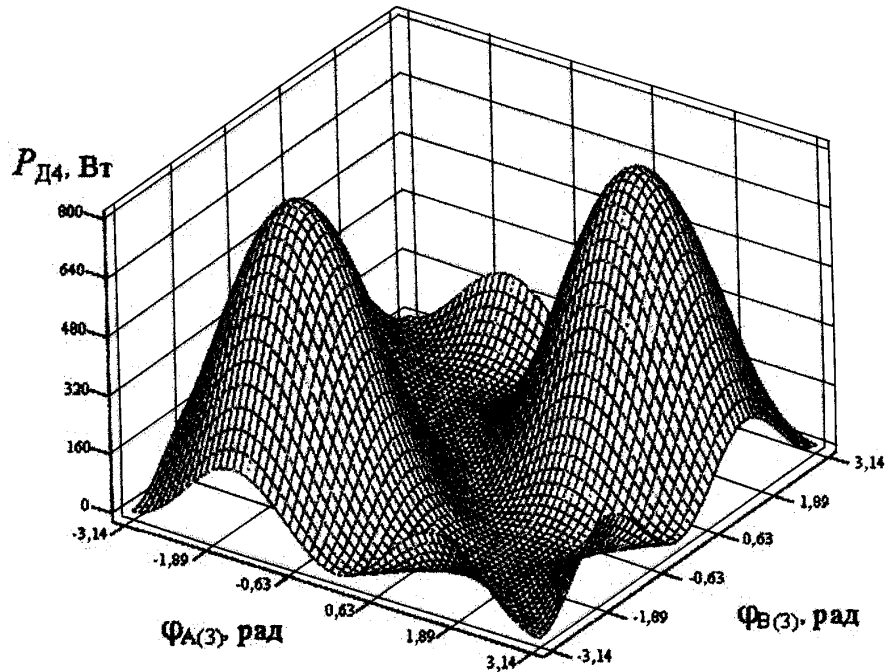


Рис. 1

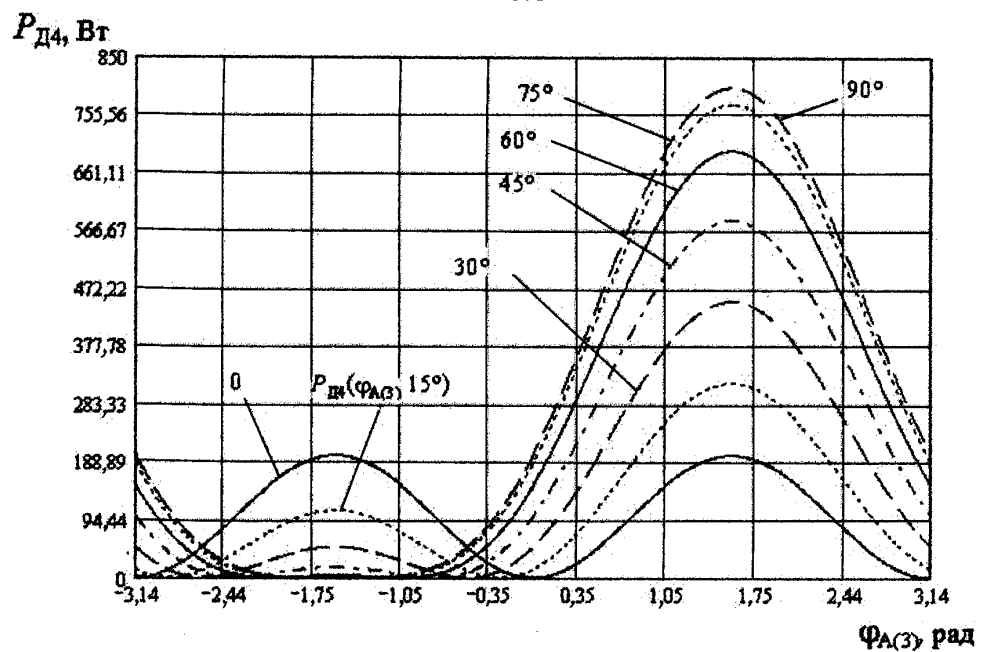


Рис. 2

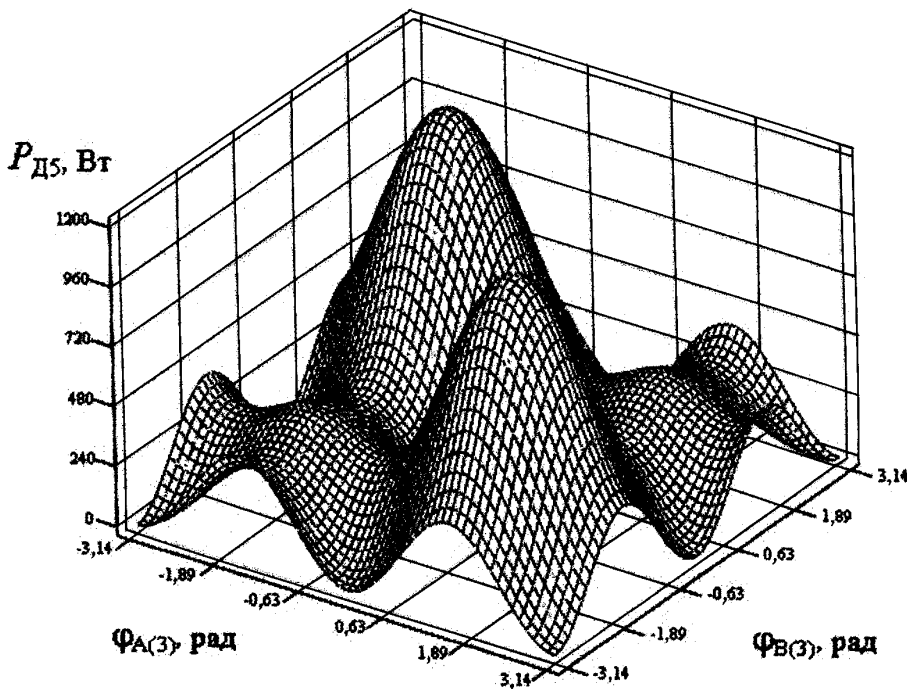


Рис. 3

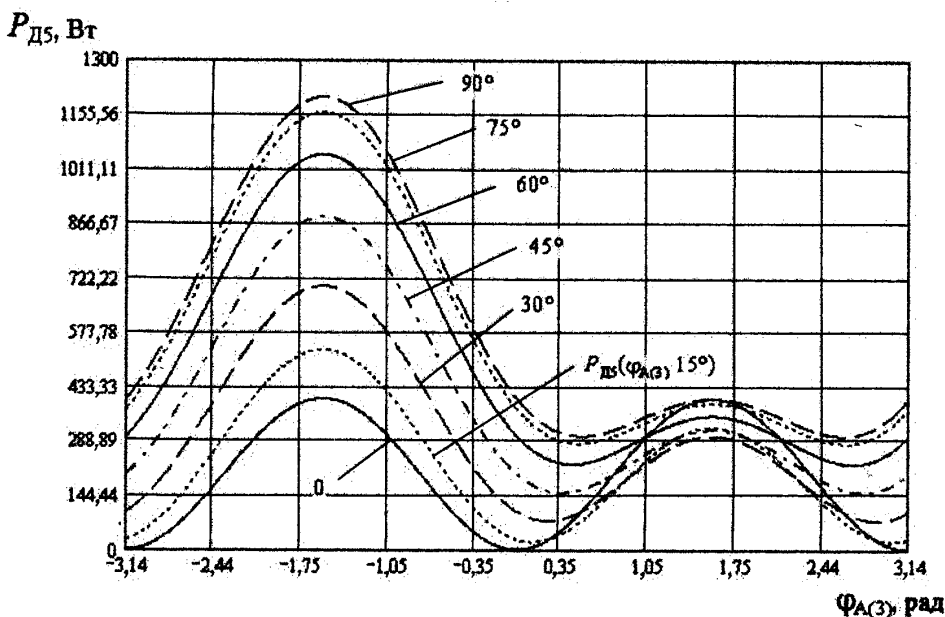


Рис. 4

2. Складова $P_{Д5}$.

Графік зміни складової $P_{Д5}$ зображено на рис. 3 ($\varphi_{С(3)} = 0$). Представлений вид поверхні $P_{Д5}$ на рис. 3 обумовлений тим, що в другому і четвертому квадрантах різниця $(I_{A(3)} \sin \varphi_{A(3)} - I_{B(3)} \sin \varphi_{B(3)})^2$ буде максимальною. З графіка видно, що складова $P_{Д5}$ також має діагональну симетрію, причому одна з ліній симетрії проходить по зоні локальних максимумів. На рис. 4 показано перерізи функції $P_{Д5}$ вздовж осі $\varphi_{A(3)}$. При

зростанні кута $\varphi_{B(3)}$ відбувається збільшення максимуму в другому квадранті та зменшення відповідного максимуму в першому квадранті.

Аналізуючи величину $P_{Д5}$, можна зробити висновок, що її поведінка має більш складну форму, ніж складової $P_{Д4}$. Компенсація складової $P_{Д5}$ досягається в більшості випадків зміною двох фазних кутів.

3. Складова $P_{Д6}$. Графік зміни складової $P_{Д6}$ зображено на рис. 5 ($\varphi_{С(3)} = 0$). З рис. 5 видно, що функція $P_{Д6}$ має найбільшу ступінь симетрії у порівнянні з складовими $P_{Д4}$ та $P_{Д5}$, що обумовлено симетричністю косинусної функції. Складова $P_{Д6}$ симетрична відносно діагоналей і відносно прямих початку координат. Лише на краях в зонах великих кутів спостерігається обширна зона максимумів. На рис. 6 наведено перерізи поверхні, з поведінки яких можна зробити висновок, що для зони мінімуму характерним є коливальний процес.

Для компенсації $P_{Д6}$ необхідно змінювати три фазні кути.

Проаналізуємо поведінку складових втрат $P_{Д4}$, $P_{Д5}$ і $P_{Д6}$ за допомогою введення кута $\Delta\varphi$, що відображає несиметричність фаз (зміщення кутів $\varphi_{B(3)}$ та $\varphi_{С(3)}$ відносно $\varphi_{A(3)}$ згідно зі

співвідношеннями $\varphi_{B(3)} = \varphi_{A(3)} + \Delta\varphi$ та $\varphi_{C(3)} = \varphi_{A(3)} - \Delta\varphi$. Зміну амплітуди третьої гармоніки будемо задавати коефіцієнтом пульсацій $K_{ПЗ}$. Введення коефіцієнта пульсації $K_{ПЗ}$ дозволяє записати такі співвідношення:

$$I_{A(3)} = I_A K_{ПЗ};$$

$$I_{B(3)} = I_B K_{ПЗ};$$

$$I_{C(3)} = I_C K_{ПЗ}.$$

Тоді складові $P_{Д4}$, $P_{Д5}$, $P_{Д6}$ розраховуються за формулами:

$$P_{Д4} = R_s (I_A K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)}) + I_B K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)} + \Delta\varphi) + I_C K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)} - \Delta\varphi))^2 / 3;$$

$$P_{Д5} = R_s [(I_A K_{ПЗ} \sin\varphi_{A(3)} - I_B K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)} + \Delta\varphi))^2 + (I_B K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)} + \Delta\varphi) - I_C K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)} - \Delta\varphi))^2 + (I_C K_{ПЗ} \sin(\varphi_{A(3)} - \Delta\varphi) - I_A K_{ПЗ} \sin\varphi_{A(3)})^2] / 3; \quad (13)$$

$$P_{Д6} = R_s [(I_A K_{ПЗ} \cos\varphi_{A(3)} - I_B K_{ПЗ} \cos(\varphi_{A(3)} + \Delta\varphi))^2 + (I_B K_{ПЗ} \cos(\varphi_{A(3)} + \Delta\varphi) - I_C K_{ПЗ} \cos(\varphi_{A(3)} - \Delta\varphi))^2 + (I_C K_{ПЗ} \cos(\varphi_{A(3)} - \Delta\varphi) - I_A K_{ПЗ} \cos\varphi_{A(3)})^2] / 3.$$

Значення складових $P_{Д4}$, $P_{Д5}$ і $P_{Д6}$ в залежності від зміни коефіцієнта пульсації $K_{ПЗ}$ наведено в таблиці для двох значень кута $\varphi_{A(3)}$ ($\pi/6$ та $\pi/3$).

На рис. 7 наведені графіки, які характеризують дольовий внесок кожної з цих складових у сумарну величину втрат $P_{\Sigma} = P_{Д4} + P_{Д5} + P_{Д6}$ в залежності від значень кута $\varphi_{A(3)}$, де по осі Y (у відсотках) показано внесок кожної складової у сумарну

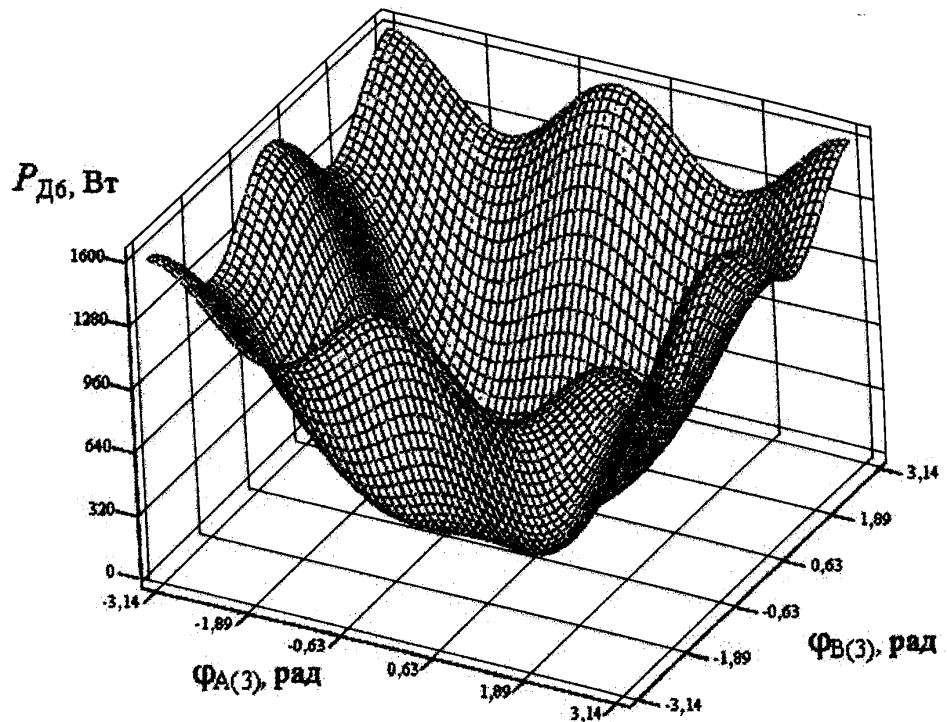


Рис. 5

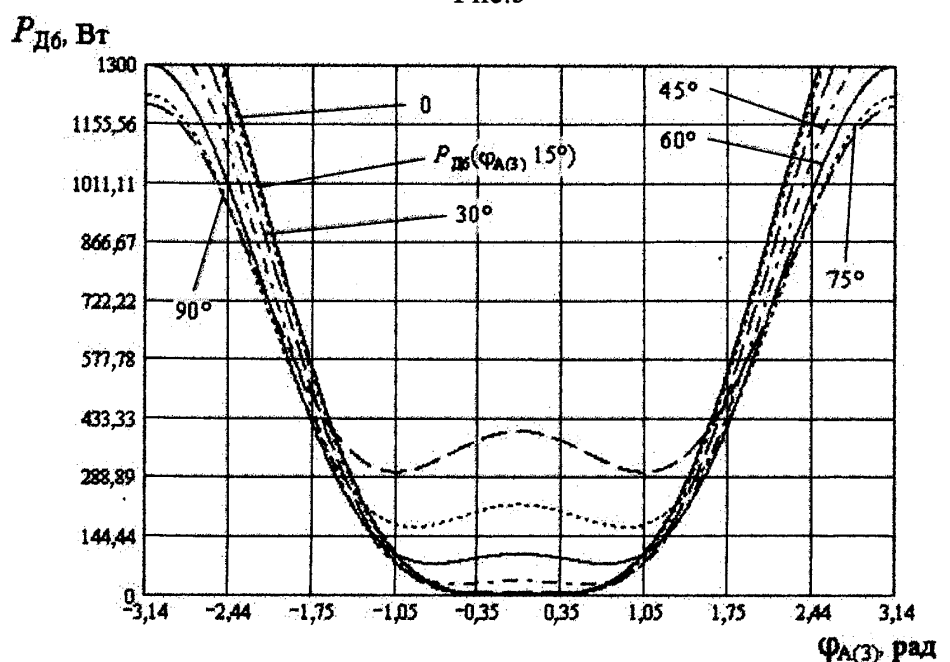


Рис. 6

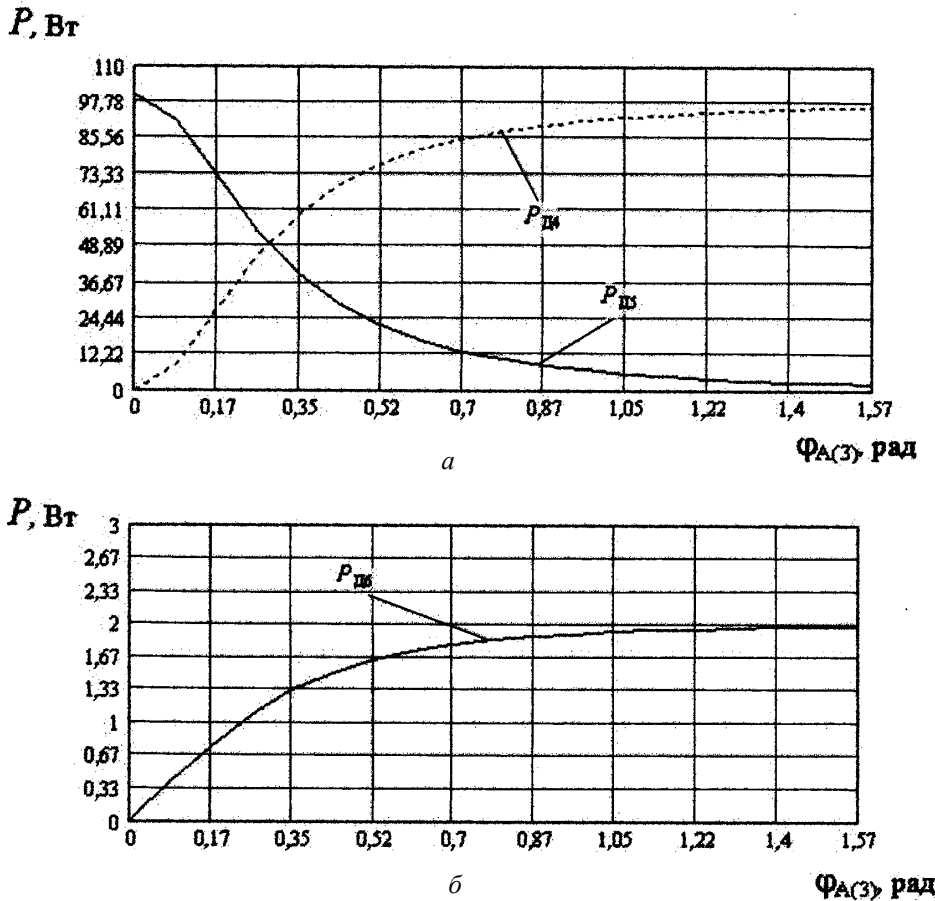


Рис. 7

величину втрат P_{Σ} .

З графіків видно, що на початковій ділянці зміни аргументу (приблизно

$$\varphi_{A(3)} = 0 \dots \frac{\pi}{2})$$

спостерігається нелінійна залежність зміни дольового впливу між складовими, а потім настає режим, який можна назвати “квазі-усталеним”, при якому дольовий внесок кожної складової практично залишається незмінним.

Розглянемо визначення складових P_{D4} , P_{D5} і P_{D6} та їх суми $P_{\Sigma} = P_{D4} + P_{D5} + P_{D6}$ для низки граничних варіантів несиметричної системи відносно третьої гармоніки.

Варіант 1:

$\varphi_{A(3)} = \varphi_{B(3)} = \varphi_{C(3)}$. Несиметрична система вироджується в симетричну. Складові P_{D5} , P_{D6} , які обумовлені несиметричністю навантаження, рівні нулю. Втрати, які з’являються в результаті наявності третьої гармоніки, визначаються лише передачею в навантаження симетричної реактивної потужності третьої гармоніки. Ця складова втрат рівна нулю, якщо $\varphi_{A(3)} = 0 \pm k\pi$, і максимальною, якщо $\varphi_{A(3)} = \pi/2 \pm k\pi$, де $k = 1, 2, \dots$. Величина максимуму знаходиться зі співвідношення

$$P_{D4} = R_s (I_{A(3)} \sin(\pi/2) + I_{B(3)} \sin(\pi/2) + I_{C(3)} \sin(\pi/2))^2/3 = R_s (I_{A(3)} + I_{B(3)} + I_{C(3)})^2/3.$$

Для нашого прикладу $P_{D4} = 1800$ Вт. Графік зміни складових показано на рис. 8 а.

Варіант 2: $\varphi_{A(3)} = \varphi_{C(3)}$, а $\varphi_{B(3)} = \varphi_{A(3)} + 2\pi/3$. Для даного випадку несиметричності додаткові втрати за третьою гармонікою визначаються складовою P_{D4} , піднятою на постійну величину (див. рис. 8 б), яка утворюється сумою двох інших складових, які йдуть у протифазі. Такий вигляд графіка впливає з того, що для P_{D4} можна записати вираз $P_{D4} =$

$$= R_s (I_{A(3)} \sin(\varphi_{A(3)}) + I_{B(3)} \sin(\varphi_{A(3)} + 2\pi/3) + I_{C(3)} \sin(\varphi_{A(3)}))^2/3 = R_s I^2/3 (1.5 \sin^2(\varphi_{A(3)}) + \sqrt{3}/2 \cdot \cos(\varphi_{A(3)}))^2 + (2 \cos^2(\varphi_{A(3)}) - 4 \cos(\varphi_{A(3)} + \frac{2\pi}{3}) \cos(\varphi_{A(3)}) + 2 \cos^2(\varphi_{A(3)} + \frac{2\pi}{3}))^2).$$

Мінімум сумарної функції $P_{\Sigma} = P_{D4} + P_{D5} + P_{D6}$ буде в точках, рівних $-\pi/6 \pm k\pi$, де $k = 1, 2, \dots$. Максимум сумарної функції для нашого прикладу рівний 1800 Вт, максимумами

складових рівні $P_{Д4} = 600$ Вт, а $P_{Д5}$ і $P_{Д6}$ максимум рівний 1200 Вт. Мінімум сумарної функції рівний 1200 Вт, а складові мають нульові мінімуми.

Варіант 3: $\varphi_{В(3)} = \varphi_{А(3)} + 2\pi/3$; $\varphi_{С(3)} = \varphi_{А(3)} - 2\pi/3$. У цьому випадку система є симетричною, додаткові втрати не мають коливального характеру і вироджуються у постійну складову. До того ж складова передачі в навантаження симетричної реактивної потужності третьої гармоніки $P_{Д4}$ буде дорівнювати нулю, а інші дві складові будуть рівні між собою. Для вибраного прикладу вони рівні 900 Вт.

Варіант 4: $\varphi_{В(3)} = \varphi_{А(3)}$, $\varphi_{С(3)} = \varphi_{А(3)} - 3\pi/2$. У цьому випадку характер складових втрат $P_{Д4}$ буде більш складним. Для часткового випадку, коли рівні амплітуди струмів третьої гармоніки, складова $P_{Д4}$ буде мати вигляд (на рис. 8 в показано суцільною лінією) $P_{Д4} = \frac{R_s I_{A(3)}^2}{3} (2\sin(\varphi_{А(3)}) + \cos(\varphi_{А(3)}))$.

Мінімум цієї складової визначається величиною кута $\varphi_{А(3)} = \arctg\left(-\frac{1}{2}\right) = -0,46365 \pm \pm k\pi$, а максимум зсунутий на кут $\pi/2$. Для вибраного прикладу мінімум цієї складової набуває нульового значення, а максимум дорівнює 1000 Вт.

Складова $P_{Д5}$ на

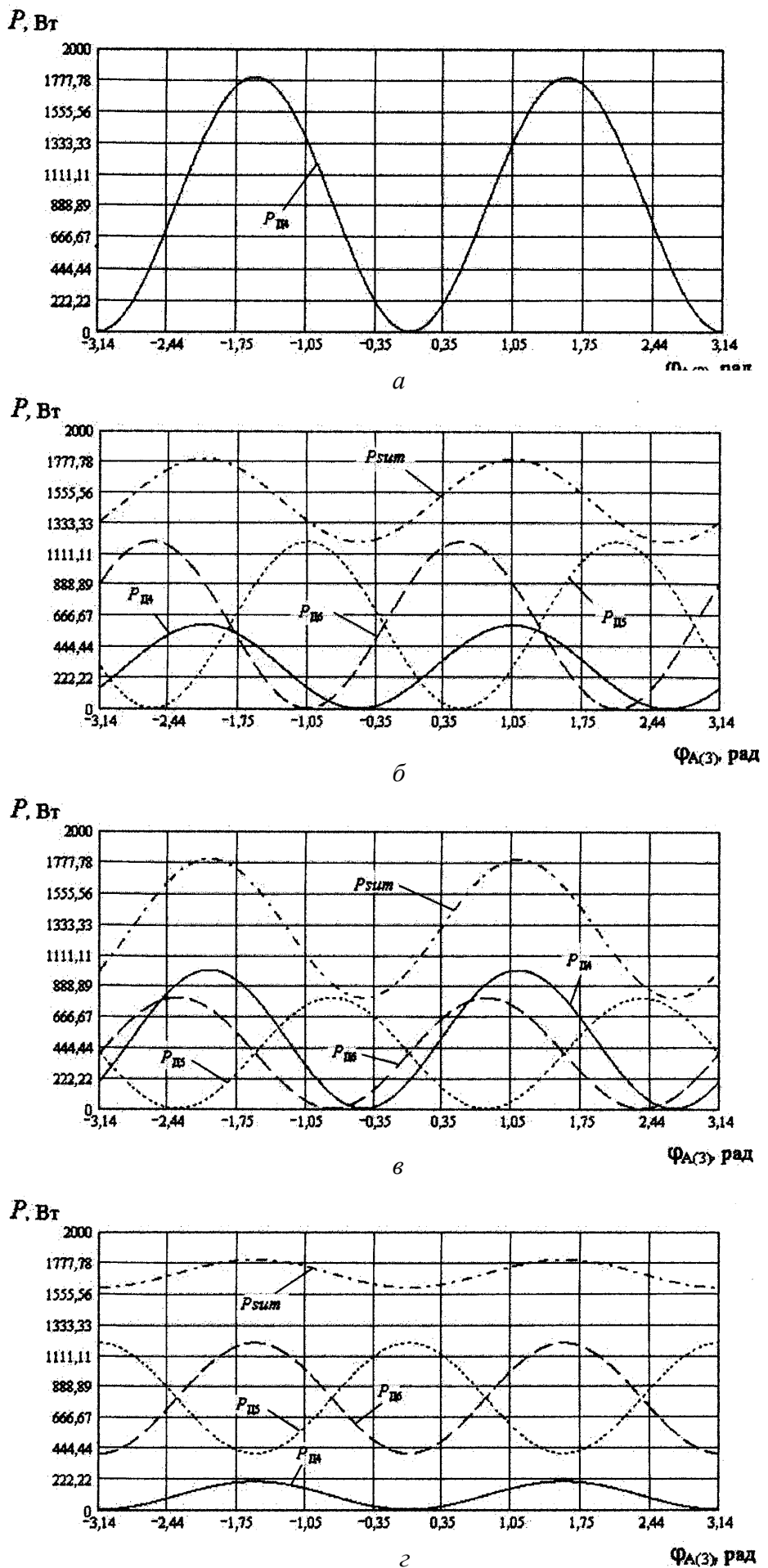


Рис. 8

$\varphi_{A(3)}$	$\Delta\varphi$	K_{II}	P_{D4}	P_{D5}	P_{D6}
$\pi/6$	0	0,2	450	0	0
		0,4	1800	0	0
		0,6	4050	0	0
		0,8	7200	0	0
		1	11250	0	0
		1,2	16200	0	0
	$\pi/6$	0,2	373,20508	226,79492	80,38476
		0,4	1492,82032	907,17968	321,53903
		0,6	3358,84573	2041,15427	723,46282
		0,8	5971,28129	3628,71871	1286,15612
		1	9330,12702	5669,87298	2009,61894
		1,2	13435,38291	8164,61709	2893,85128
	$\pi/3$	0,2	200	700	300
		0,4	800	2800	1200
		0,6	1800	6300	2700
		0,8	3200	11200	4800
		1	5000	17500	7500
		1,2	7200	25200	10800
	$\pi/2$	0,2	50	1000	600
		0,4	200	4000	2400
		0,6	450	9000	5400
		0,8	800	16000	9600
		1	1250	25000	15000
		1,2	1800	36000	21600
$\pi/3$	0	0,2	1350	0	0
		0,4	5400	0	0
		0,6	12150	0	0
		0,8	21600	0	0
		1	33750	0	0
		1,2	48600	0	0
	$\pi/6$	0,2	1119,61524	80,38476	226,79492
		0,4	4478,46097	321,53903	907,17968
		0,6	10076,53718	723,46282	2041,15427
		0,8	17913,84388	1286,15612	3628,71871
		1	27990,38106	2009,61894	5669,87298
		1,2	40306,14872	2893,85128	8164,61709
	$\pi/3$	0,2	600	300	700
		0,4	2400	1200	2800
		0,6	5400	2700	6300
		0,8	9600	4800	11200
		1	15000	7500	17500
		1,2	21600	10800	25200
	$\pi/2$	0,2	150	600	1000
		0,4	600	2400	4000
		0,6	1350	5400	9000
		0,8	2400	9600	16000
		1	3750	15000	25000
		1,2	5400	21600	36000

рис. 8 в показана пунктирною лінією. Аналітичний вид функції має вигляд

рис. 8 в показана пунктирною лінією. Аналітичний вид функції має вигляд

$$P_{Д5} = \frac{2R_S I_{A(3)}^2}{3} (\sin(\varphi_{A(3)}) - \cos(\varphi_{A(3)}))^2.$$

Аналіз цієї складової показує, що мінімум буде рівний нулю у випадку $\varphi_{A(3)} = \frac{\pi}{4} \pm k\pi$.

Максимум цієї складової буде при $\varphi_{A(3)} = \frac{3\pi}{4} \pm k\pi$, і для нашого прикладу він рівний 800 Вт.

Складова $P_{Д6}$ знаходиться у протифазі до $P_{Д5}$ (відповідно максимумами і мінімумами зсунуті на $\pi/2$ відносно $P_{Д5}$), а величина максимуму така ж сама. Сумарна величина є функцією $P_{Д4}$, піднятою на рівень максимуму $P_{Д5}$. Оскільки величини $P_{Д5}$ і $P_{Д6}$ знаходяться у протифазі, максимум буде в точках $\varphi_{A(3)} = \frac{\pi}{4} \pm k\pi$ і рівний для часткового випадку 1800 Вт, а мінімум 800 Вт.

Варіант 5: $\varphi_{B(3)} = \varphi_{A(3)} + \pi/2$, $\varphi_{C(3)} = \varphi_{A(3)} - \pi/2$. Для даного випадку характерним є більш складний коливальний процес (див. рис. 8 з). Як видно з графіка, складові $P_{Д5}$ і $P_{Д6}$ йдуть у протифазі, тому сумарна складова дорівнює величині $P_{Д4}$, піднятій на величину постійної складової.

Аналітичний вид характеристики $P_{Д5}$ має вигляд

$$P_{Д5} = \frac{2R_S I_{A(3)}^2}{3} (1 + 2\cos^2(\varphi_{A(3)})).$$

Максимум відповідає кутам $\varphi_{A(3)} = 0 \pm k\pi$ і рівний $P_{Д5} = 2R_S I_{A(3)}^2$ і для вибраного прикладу рівний 1200 Вт, а мінімум зсунутий на $\pi/2$ відносно максимуму і рівний

$P_{Д5} = \frac{2R_S I_{A(3)}^2}{3}$ (для нашого прикладу 400 Вт). Складова $P_{Д4}$ визначається зі співвідношення

$$P_{Д4} = \frac{R_S I_{A(3)}^2}{3} (\sin^2(\varphi_{A(3)})).$$

Як видно, мінімум рівний нулю при $\varphi_{A(3)} = 0 \pm k\pi$, а максимум $P_{Д4} = \frac{R_S \cdot I_{A(3)}^2}{3}$, і для вибраного прикладу він дорівнює 200 Вт.

Проведений аналіз показує, що при декомпозиції реактивної потужності Фризе складові додаткових втрат $P_{Д}$ в загальному випадку мають складний характер. Для компенсації реактивної потужності Фризе доцільно чітко розмежовувати складові реактивної потужності і компенсувати окремо кожну з них, у першу чергу ті, що мають додаткові втрати.

1. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Системи електроживлення електротехнічних установок і комплексів". – 1999. – С. 129–134.

2. Денисюк С.П. Оптимізація енергетичних процесів систем з перетворювачами електричної енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Енергоефективність. – Київ: ІЕД НАНУ, 2000. – С. 3–12.

3. Денисюк С.П., Радши І.П. Оцінка складових втрат електроенергії в системах електроживлення з нелінійними нестационарними перетворювачами електроенергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка. – Київ: ІЕД НАНУ, 2000. – С. 60–70.

4. Железко Ю.С. Стратегія зниження потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6–12.

5. Крогерис А.Ф., Рашевец К.К., Трейманис Э.П., Шинка Я.К. Мощность переменного тока. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.

6. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я. и др. Баланс энергий в электрических цепях. – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.