

УДК 621.314

**ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ
ТРИФАЗНОЇ ЧОТИРИПРОВІДНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ
З ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ**

Артеменко М. Ю., Засімович В. І.

Київський національний університет технологій та дизайну

Батрак Л. М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

В статті проаналізований ефект підвищення коефіцієнта корисної дії трифазної чотирипровідної системи живлення з нелінійним навантаженням шляхом збільшення коефіцієнта потужності за допомогою паралельного активного фільтра.

Ключові слова: трифазна чотирипровідна система живлення, коефіцієнт потужності, коефіцієнт корисної дії, паралельний активний фільтр

Сучасний прогрес у засобах перетворювальної техніки та мікропроцесорних системах дозволяє створити нові способи покращення якості електроенергії у трифазних системах живлення.

Постановка завдання

Так у випадку живлення нелінійного несиметричного навантаження коефіцієнт корисної дії системи доволі низький, але його можна суттєво покращити за рахунок збільшення коефіцієнта потужності, що досягається підключенням до трифазної чотирипровідної системи живлення паралельного активного фільтра з системою керування.

Результати досліджень

На рис. 1 представлена трифазна чотирипровідна система живлення з паралельним активним фільтром. Як нелінійне навантаження у даній системі використано трифазну схему випрямляча з нульовим виводом, зібрану по схемі Міткевича (рис. 2) і навантажену на активний опір. Часові діаграми роботи даної схеми представлено на рис. 3.

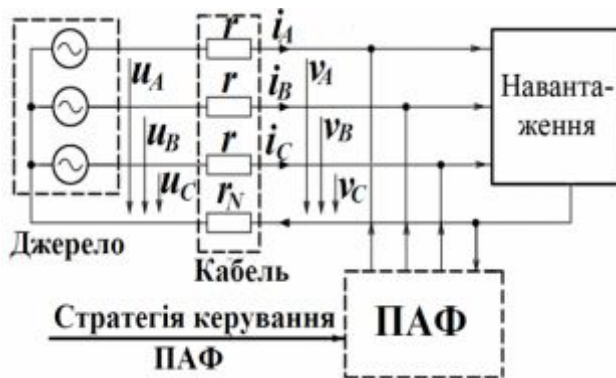


Рис. 1. Трифазна чотирипровідна живлення з ПАФ

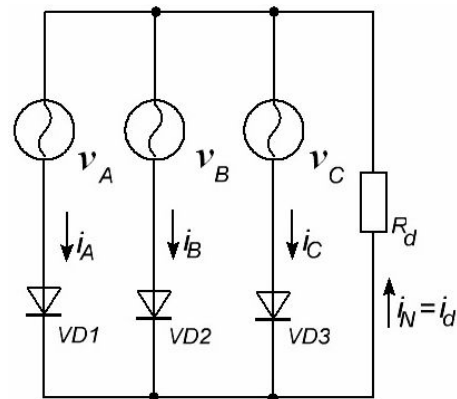


Рис. 2. Еквівалентна схемасистема навантаження

Аналітично опишемо фазні напруги та струми:

$$v_A = U_m \cos \omega t; \quad i_A = \frac{U_m}{r_d} \cos \omega t, \text{ для } -\frac{T}{6} < t < \frac{T}{6};$$

$$v_B = U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \quad i_B = \frac{U_m}{r_d} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \text{ для } \frac{T}{6} < t < \frac{T}{2};$$

$$v_C = U_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}); \quad i_C = \frac{U_m}{r_d} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}), \text{ для } \frac{T}{2} < t < \frac{5T}{6}.$$

Визначимо активну потужність навантаження:

$$P = \frac{1}{T} \left[\int_{-\frac{T}{6}}^{\frac{T}{6}} \frac{U_m^2}{r_d} \cos^2 \omega t dt + \int_{\frac{T}{6}}^{\frac{T}{2}} \frac{U_m^2}{r_d} \cos^2(\omega t + \frac{2\pi}{3}) dt + \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{5T}{6}} \frac{U_m^2}{r_d} \cos^2(\omega t - \frac{2\pi}{3}) dt \right] = \frac{3U_m^2}{Tr_d} Int.$$

$$\text{де } Int = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{6}}^{\frac{T}{6}} \cos^2 \omega t dt.$$

Знайдемо числове значення інтегралу:

$$Int = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{6}} \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{T}{6T} + \frac{1}{2T\omega} \int_0^{\frac{T}{6}} \cos \omega t d(2\omega t) = \frac{1}{6} + \frac{1}{4\pi} \sin \frac{2\pi}{3} = \frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi};$$

$$P = \frac{3U_m^2}{r_d} \cdot Int = \frac{U_m^2}{r_d} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \right) \approx 0,70675 \frac{U_m^2}{r_d}.$$

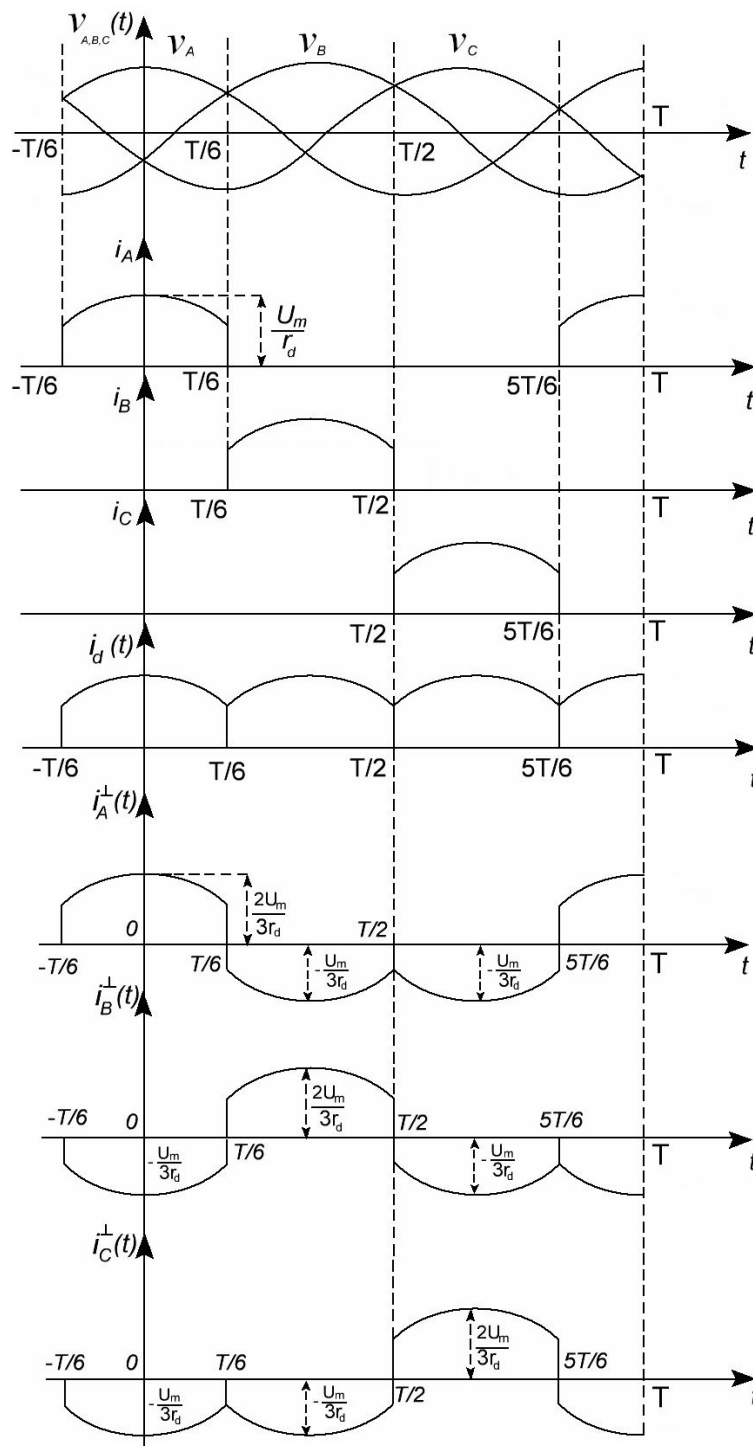


Рис. 3. Часові діаграми роботи схеми Міткевича

Визначимо коефіцієнт потужності трифазної схеми випрямляча з нульовим виводом відповідно до формули, яку виведено у [2]:

$$K_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{[U_{\perp}^2 + (1 - \sigma_0)U_0^2] [I_{\perp}^2 + I_0^2 / (1 - \sigma_0)]}} \quad (1)$$

Оскільки $v_A(t) + v_B(t) + v_C(t) = 0$, $U_0 = 0$;

Розрахуємо квадрат діючого значення напруги, позбавленої складової нульової послідовності:

$$U_{\perp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [v_A^2(t) + v_B^2(t) + v_C^2(t)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T [(U_m \cdot \cos \omega t)^2 + (U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}))^2 + (U_m \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}))^2] dt = \frac{3}{T} \int_0^T [(U_m \cdot \cos \omega t)^2] dt = \frac{3U_m^2}{2}.$$

Розрахуємо квадрат діючого значення струму нульової послідовності. Для цього знайдемо миттєве значення вектора струму нульової послідовності:

$$\mathbf{i}_0(t) = \frac{i_A(t) + i_B(t) + i_C(t)}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{i_d(t)}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Звідси:

$$I_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_0^T(t) \mathbf{i}_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{i_d^2(t)}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} dt = \frac{3}{9T} \int_0^T i_d^2(t) dt =$$

$$= \frac{3}{9T} \int_{-\frac{T}{6}}^{\frac{T}{6}} \frac{U_m^2}{r_d^2} \cos^2 \omega t dt = \frac{U_m^2}{r_d^2} \cdot \int_{-\frac{T}{6}}^{\frac{T}{6}} \cos^2 \omega t dt = \frac{U_m^2}{r_d^2} \cdot \left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \right) \approx 0,238 \frac{U_m^2}{r_d^2}.$$

Розрахуємо квадрат діючого значення струму, позбавленого складової нульової послідовності:

$$I_{\perp}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{i}_{\perp}^T(t) \mathbf{i}_{\perp}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [(i_A^T)^2 + (i_B^T)^2 + (i_C^T)^2] dt = \frac{3}{T} \int_0^T (i_A^T)^2 dt =$$

$$= \frac{3}{T} \left[\int_{-T/6}^{T/6} \left(\frac{2U_m}{3r_d} \cos \omega t \right)^2 dt + \int_{T/6}^{T/2} \left(\frac{U_m}{3r_d} \cos \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)^2 dt + \int_{T/2}^{5T/6} \left(\frac{U_m}{3r_d} \cos \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)^2 dt \right] =$$

$$3 \left[\left(\frac{2U_m}{3r_d} \right)^2 + \left(\frac{U_m}{3r_d} \right)^2 + \left(\frac{U_m}{3r_d} \right)^2 \right] \frac{1}{T} \int_{-T/6}^{T/6} (\cos^2 \omega t) dt = 3 \left[\frac{4+1+1}{9} \right] \frac{U_m^2}{r_d^2} \cdot \int_{-T/6}^{T/6} \cos^2 \omega t dt =$$

$$= \frac{2U_m^2}{r_d^2} \cdot \left(\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \right) \approx 0,476 \frac{U_m^2}{r_d^2}.$$

Підставивши дані у формулу (1), отримаємо значення коефіцієнта потужності:

$$K_P = \frac{P}{S} = \frac{0,70675 \frac{U_m^2}{r_d}}{\sqrt{\frac{3U_m^2}{2} \left[0,476 \frac{U_m^2}{r_d^2} + 0,238 \frac{U_m^2}{r_d^2 (1-\sigma_0)} \right]}} = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-\sigma_0}}} \quad (2)$$

Визначимо діапазон значень коефіцієнта послаблення складової нульової послідовності

$$\sigma_0 = \frac{3r_N}{r + 3r_N},$$

задавши три величини співвідношень опорів фазних та нульового проводів:

$$r_N = 3r; \quad r_N = r; \quad 3r_N = r.$$

Значення коефіцієнта σ_0 для усіх трьох зазначених випадків, відповідно, дорівнюють:

$$\sigma_0^1 = \frac{3 \cdot 3r}{r + 3 \cdot 3r} = 0,9; \quad \sigma_0^2 = \frac{3r}{r + 3r} = 0,75; \quad \sigma_0^3 = \frac{3r_N}{3r_N + 3r_N} = 0,5.$$

Підставивши отримані значення у співвідношення (2), отримаємо:

$$K_P^1 = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-\sigma_0^1}}} = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-0,9}}} = \frac{0,70675}{\sqrt{4,284}} = 0,341;$$

$$K_P^2 = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-\sigma_0^2}}} = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-0,75}}} = \frac{0,70675}{\sqrt{2,142}} = 0,483;$$

$$K_P^3 = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-\sigma_0^3}}} = \frac{0,70675}{\sqrt{0,714 + \frac{0,357}{1-0,5}}} = \frac{0,70675}{\sqrt{1,428}} = 0,591.$$

ККД системи без паралельного активного фільтра розраховується за формулою, яку виведено у [1]:

$$\eta = \frac{1}{0,5(P_0/P_L) - \sqrt{0,25(P_0/P_L)^2 - (P_0/P_L) - a_k}}; \quad (3)$$

де $a_k = \frac{1}{k_p^2} - 1$; K_p - коефіцієнт потужності трифазної схеми з нульовим виводом; P_L - активна потужність навантаження (5 кВт); P_0 - активна потужність короткого замикання.

У [5] надано детальний опис розрахунку співвідношення P_0/P_L . Графіки залежностей ККД від відношення потужностей P_0/P_L при різних значеннях K_p наведені на рис. 4.

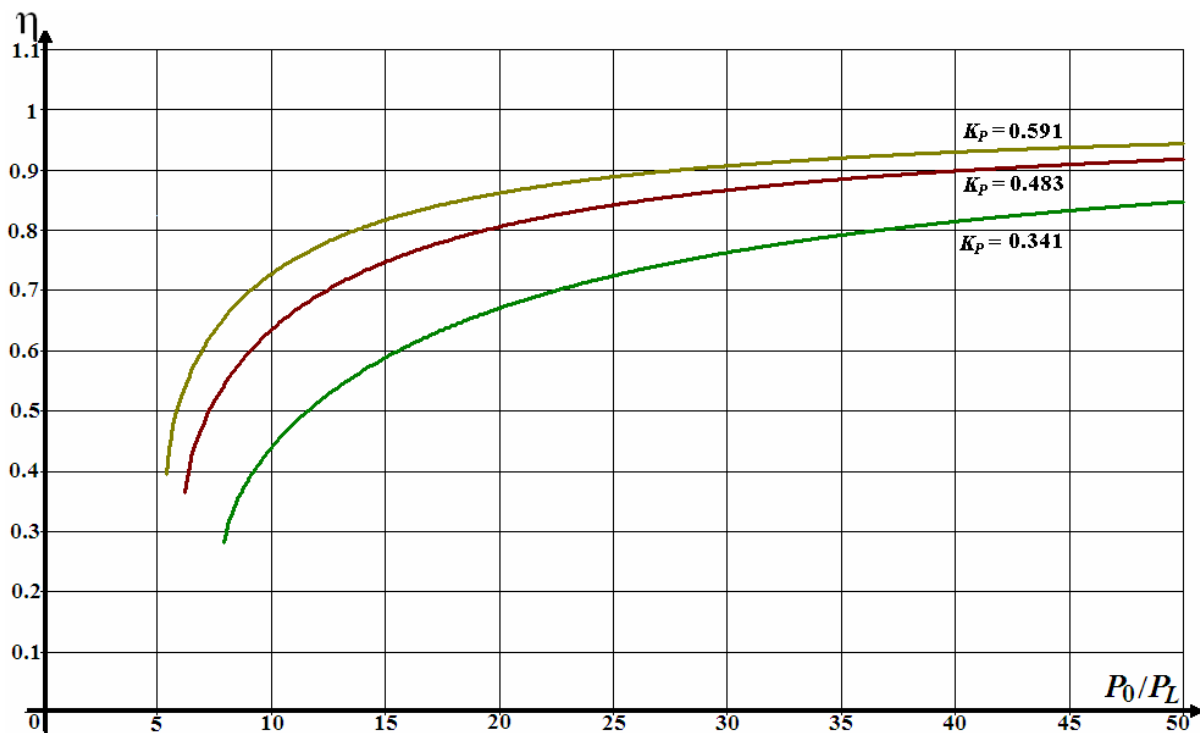


Рис. 4. Залежність коефіцієнту корисної дії системи від співвідношення P_0/P_L

При підключенні до системи паралельного активного фільтру коефіцієнт потужності трифазної схеми з нульовим виводом збільшується до 1 (параметр $a'_k = 0$). Постачання енергії в навантаження з одиничним коефіцієнтом потужності забезпечує стратегія управління ПАФ, детально розглянута у [6].

В такому випадку ККД системи розраховується за формулою, яку виведено у [1]:

$$\eta_F = \frac{P_L / P'_L}{0,5(P_0 / P'_L) - \sqrt{0,25(P_0 / P'_L)^2 - (P_0 / P'_L) - a'_k}}; \quad (4)$$

де $P'_L = P_L + P_F$ - сумарна активна потужність навантаження та ПАФ, $a'_k = 0$ оскільки $K'_p = 1$;

P_F – потужність втрат ПАФ.

Розрахуємо ККД для значень P_F , що складають 0, 5, та 10% від P_L . Графіки залежностей ККД від відношення потужностей P_0/P_L при різних значеннях P_F наведені на рис. 5.

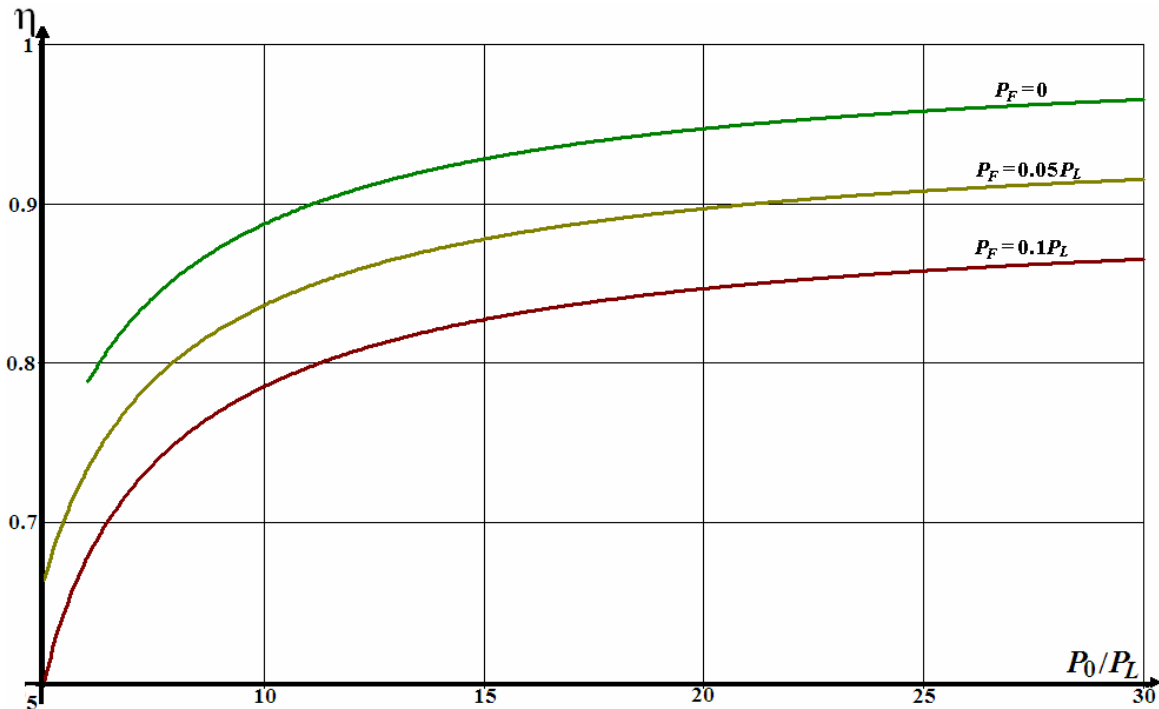


Рис. 5. Залежність коефіцієнту корисної дії системи з ПАФ від співвідношення P_0/P_L

Як видно з графіка, представленого на рис. 5, ККД системи з ПАФ суттєво підвищується. За відсутності втрат коефіцієнт корисної дії системи живлення з паралельним активним фільтром зростає на 5-15% порівняно з системою живлення з низькоомною нейтраллю та на 15-30% порівняно з системою живлення з високоомною нейтраллю.

У [1] детально розглянута умова доцільності застосування ПАФ. Це є нерівність $\eta_F > \eta$, розв'язок якої за умови, що застосування ПАФ підвищує коефіцієнт потужності до одиниці:

$$a_k > P_0 P_F / P_L^2. \quad (5)$$

Застосування ПАФ є доцільним для системи з низькоомною нейтраллю за умови $P_0 / P_L < 18.6$ при $P_F = 0.1P_L$ та $P_0 / P_L < 37.2$ при $P_F = 0.05P_L$.

Для підтвердження отриманих даних у програмному комплексі Matlab Simulink була побудована модель трифазної чотирипровідної системи живлення з ПАФ та без нього.

Модель без паралельного активного фільтра представлена на рис. 6. Вона складається з трьох джерел живлення, що реалізують трифазне джерело, опорів фазних (RA, RB, RC) та нульового (RN) проводів. До них підключена система приладів для виміру потужності, що складається в вольтметрів та амперметрів та блока Subsystem 5, в якому виділяється середня активна потужність джерела живлення, значення якої виводиться на Display 1. Навантаження представлено трифазним випрямлячем з нульовим виводом, що складається з Diode A, B, C та RL. За допомогою математичних блоків виділяється середня потужність навантаження та виводиться на Display 3. Коефіцієнт корисної дії всієї системи живлення є відношенням отриманих потужностей.

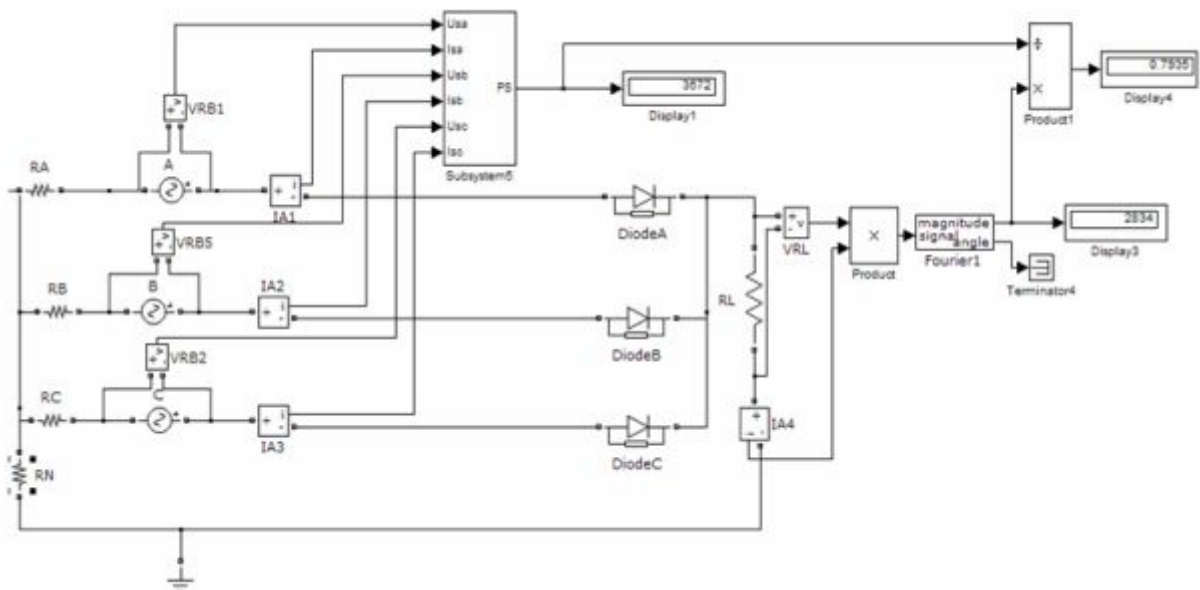


Рис. 6. Модель трифазної чотирипровідної системи живлення без ПАФ

Модель трифазної чотирипровідної системи живлення з ПАФ представлена на рис. 7.

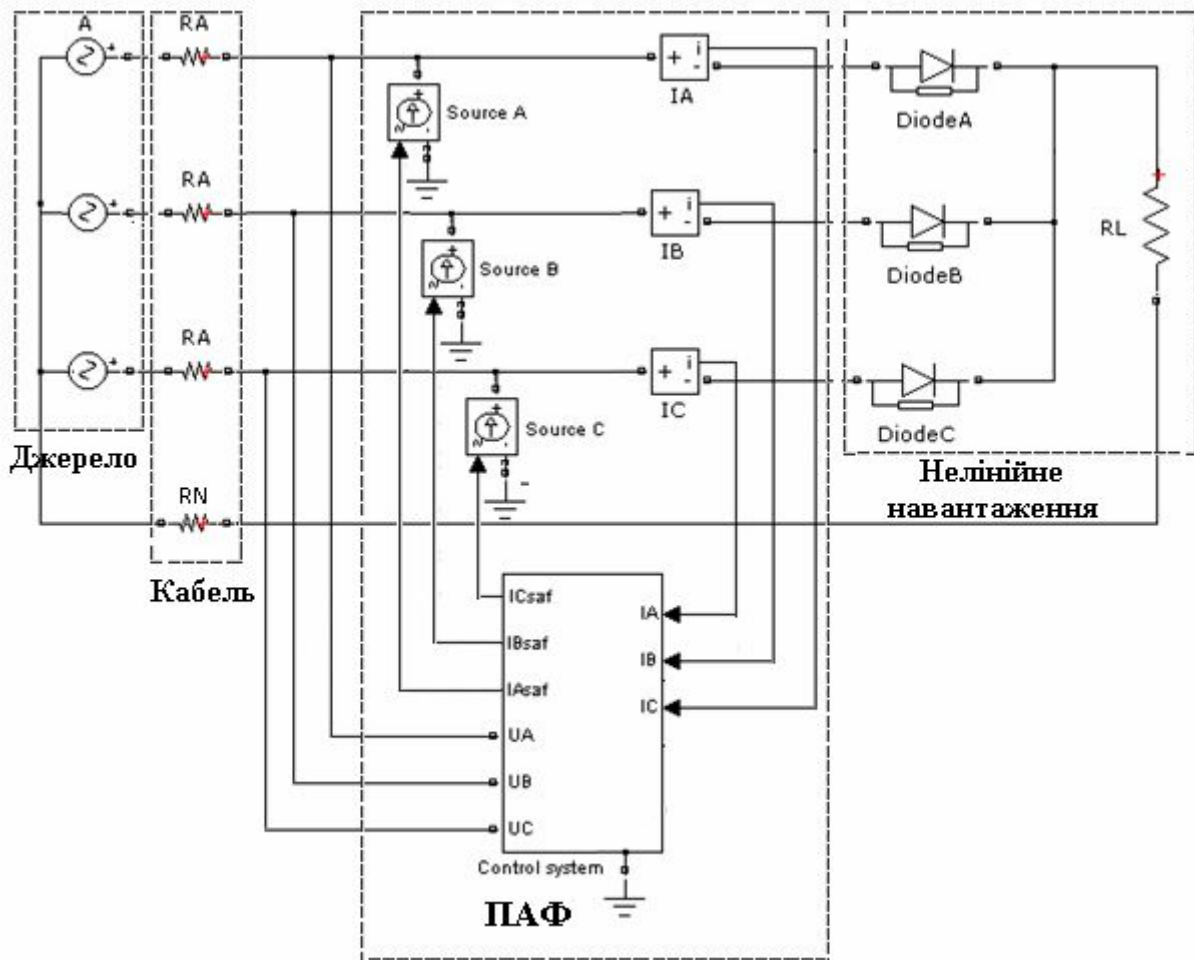


Рис. 7. Модель трифазної чотирипровідної системи живлення з ПАФ

ПАФ представлений трьома керуваними джерелами струму Source A, B, C та системою керування. Система керування реалізує стратегію формування вектора миттєвих струмів трифазного джерела пропорційно вектору миттєвих значень фазних напруг [3].

Результати моделювання для трьох значень опорів фазних проводів при трьох різних значеннях опору нейтрального проводу наведені в табл. 1, 2, 3.

Дані моделювання ККД відрізняються від теоретичних кривих не більше, ніж на 2%.

Таблиця 1

		$r = 3, r_N = 1$	$r = 3, r_N = 3$	$r = 3, r_N = 9$
P_L	без ПАФ	2838	2322	1404
	з ПАФ	3803	3802	3802
P_S	без ПАФ	3578	3235	2515
	з ПАФ	41585	41586	41587
η	без ПАФ	0.7931	0.7176	0.5585
	з ПАФ	0.9145	0.9143	0.9141

Таблиця 2

		$r = 1, r_N = 0.33$	$r = 1, r_N = 1$	$r = 1, r_N = 3$
P_L	без ПАФ	3837	3541	2835
	з ПАФ	4278	4278	4278
P_S	без ПАФ	4161	4005	3580
	з ПАФ	4412	4412	4412
η	без ПАФ	0.9222	0.8842	0.792
	з ПАФ	0.9697	0.9697	0.9697

Таблиця 3

		$r = 1,5 r_N = 0.5$	$r = 1,5 r_N = 1,5$	$r = 1,5 r_N = 4,5$
P_L	без ПАФ	3541	3157	2319
	з ПАФ	4151	4151	4151
P_S	без ПАФ	3993	3772	3237
	з ПАФ	4346	4346	4346
η	без ПАФ	0.8868	0.8371	0.7164
	з ПАФ	0.9551	0.9551	0.9552

Висновки

У даній статті проаналізовано ефект підвищення коефіцієнту корисної дії трифазної чотирипровідної системи живлення з паралельним активним фільтром, навантаженням якої є трифазна схема випрямляча з нульовим виводом (схема Міткевича) за рахунок підвищення коефіцієнту потужності. Показано, що коефіцієнт потужності схеми Міткевича лежить в межах від 0,341 до 0,591 в залежності від співвідношення опорів фазних та нейтрального проводів, що зумовлює низький ККД системи без фільтра. Застосування ПАФ забезпечує одиничне значення коефіцієнту потужності, за рахунок чого ККД системи збільшується на 5-15 відсотків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Артеменко М. Ю. Стратегії управління паралельним активним фільтром, що збільшують коефіцієнт корисної дії трифазної чотирипровідної системи живлення / М. Ю. Артеменко, Л. М. Батрак // V міжнародна науково-практична конференція «Обробка сигналів і неагусівських процесів». – 2015. – С.74-77.
2. Артеменко М. Ю. Повна потужність трифазної системи живлення в несинусоїдному режимі та енергоефективність засобів паралельної активної фільтрації / М. Ю. Артеменко // Електроніка та зв'язок. – 2014. – №6. – С. 38-47.
3. Полішук С. Й. Стратегія керування паралельним активним фільтром з частковим послабленням складової нульової послідовності напруг трифазної чотирипровідної

мережі / С. Й., Поліщук, М. Ю. Артеменко, В. М. Михальський, И. А. Шаповал, Л. М. Батрак // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – с. 12-19.

4. Жемеров Г. Г. КПД систем электроснабжения постоянного напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина, О. И. Ковальчук, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010, Ч. 2, С. 107-118.
5. Жемеров Г. Г. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2006. – С. 36-41.
6. Artemenko M. Yu. Apparent power of three-phase four-wire system in sinusoidal asymmetric mode and energy effectiveness of shunt active filters / M. Yu. Artemenko, L. M. Batrak, N. I. Domaskina // Proceedings of IEEE XXXV International Scientific Conference «Electronics and nanotechnology» – 2015. – P. 469- 474.

Артеменко М. Е., Засимович В. И.

Киевский национальный университет технологий и дизайна

Батрак Л. Н.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Увеличение коэффициента полезного действия трехфазной четырехпроводной системы питания с параллельным активным фильтром

В статье проанализирован эффект повышения коэффициента полезного действия трехфазной четырехпроводной системы питания за счет увеличения коэффициента мощности с помощью параллельного активного фильтра.

Ключевые слова: *трехфазная четырехпроводная сеть, система питания, коэффициент мощности, коэффициент полезного действия, параллельный активный фильтр*

Artemenko M. Yu., Zasyimovych V. I.

The Kiev National University technology and design

Batruk L. M.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

Increasing efficiency of three-phase four-wire power system with shunt active filter

In the article the effect of improving the efficiency of the three-phase four-wire power system by increasing the power factor by means of shunt active filter was analyzed.

Keywords: *tree-phase four-wire power system, power factor, efficiency, shunt active filter*