

сплавов / **И.Г. Сапченко, О.Н. Комаров** // Современные проблемы металлургического производства: Материалы Международной конференции. - Волгоград, 2002. - С. 378-380.

5. **Комаров, О.Н.** Возможности получения отливок термитным методом / **И.Г. Сапченко, О.Н. Комаров** // Принципы и процессы создания неорганических материалов: Материалы Международного симпозиума (Вторые Самсоновские чтения). - Хабаровск, 2002. - С. 123-124.

Рукопис подано до редакції 23.03.13

УДК 621.314+621.316

А.П. СІНОЛИЦЬЙ, д-р техн. наук, проф., В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц.,  
В.С. КОЗЛОВ, аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

## КЕРУВАННЯ СИЛОВИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ СТРУМУ В УМОВАХ НЕСИМЕТРИЧНОЇ НЕСИНУСОЇДНОЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

Розглянуто основні стратегії керування силовим активним фільтром струму, що підключений до мережі із несиметричною несинусоїдною напругою. Подано математичний апарат виділення струму корекції, який має бути генерований до мережі. На основі моделювання зроблено порівняльну оцінку методів компенсації.

**Ключові слова:** активний фільтр струму, енергозбереження, несиметрія напруги, реактивна потужність.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Силові активні фільтри (САФ) є доволі ефективним рішенням для задачі компенсації реактивної потужності, усунення вищих гармонік, симетрування навантаження тощо [1]. Однією з основних переваг активних фільтрів є гнучкість та можливість працювати за різними стратегіями компенсації (наприклад, усунення вищих гармонік струму або обмеження максимального значення струму фази). Інтелектуальну частину САФ умовно можна розділити на дві основні складові: визначення струму корекції та керування силовою частиною для безпосередньої генерації струму корекції у мережу.

На сьогоднішній день існує велика кількість математичних апаратів для керування силовими активними фільтрами різної конфігурації. Однак не всі існуючі способи керування мають можливість вибору серед декількох різних стратегій роботи. Також слід додати, що деякі популярні «теорії потужності», що застосовують для керування САФ, генерують невірний сигнал корекції в умовах несиметричної несинусоїдної напруги [2].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Можливість вибору різних критеріїв оптимальності для САФ в умовах «неідеальної» напруги може забезпечити, наприклад, СРС (Currents' Physical Components) теорія потужності [3]. Але зазначена теорія не використовується на практиці через необхідність у великій кількості обчислень. P-q теорія та її похідні, що є доволі розповсюдженими при побудові САФ, генерують невірний струм корекції за наявності несиметрії або несинусоїдності напруги [2].

Позитивний результат з деякими обмеженнями дає FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock) метод [4], що є продовженням методу Фрізе.

**Постановка завдання.** Виділити основні критерії оптимальності, за якими може працювати САФ струму в умовах несиметричної несинусоїдної напруги живлення. Привести математичні викладки для обрахунку струму корекції та на основі моделювання зробити оцінку вищезазначених критеріїв компенсації.

**Викладення матеріалу та результати.** Перш за все, доцільно розглянути найбільш актуальні критерії оптимальності, за якими можуть працювати пристрої компенсації енергетичного потоку (табл. 1).

У таблиці:  $u, t, p$  - миттєві значення напруг, струмів та потужності відповідно;  $i_A, i_B, i_C, I_A, I_B, I_C$  - миттєві та діючі значення струмів фаз А, В, С відповідно;  $U$  - діюче значення фазної напруги;  $P$  - активна потужність;  $t$  - поточне значення часу;  $T$  - період напруги живлення;  $U^{(n)}, I^{(n)}$  - амплітуди напруги та струму  $n$ -ї гармоніки;  $n$  - порядковий номер гармоніки;  $\omega$  - кругова частота основної гармоніки;  $\phi^{(n)}$  - зсув фаз  $n$ -ї гармоніки;  $I_{m, \max}$  - уставка максимального граничного значення струму,  $R^{(n)}$  - еквівалентний опір  $n$ -ї гармоніки.

Критерій № 1 є виконанням закону

$$u/i=R=\text{const}, \quad (1)$$

де  $R$  - активний опір навантаження.

Критерії оптимальності при споживанні електроенергії

Номер критерію	Критерій	Формули
1	Передача максимуму енергії до навантаження	$\frac{u}{i} = \frac{U^2}{P} = const$
2	Рівномірне споживання енергії [5]	$p = P, t \in [0, T]$
3	Мінімізація реактивної потужності [5]	$U^{(n)} \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi^{(n)}) =$ $= R^{(n)} \cdot I^{(n)} \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi^{(n)})$
4	Симетрування фазних струмів (напруг)	$\begin{cases} i_A + i_B + i_C = 0 \\ I_A = I_B = I_C \end{cases}$
5	Мінімізація миттєвих значень струму	$i \leq I_{m,MAX}$

Вираз (1) відповідає закону Ома при активному незалежному від часу та частоти опорі, тобто мінімумі втрат енергії при її передачі від генератора до навантаження. Для зазначеного критерію виконується рівність

$$P = S, \quad (2)$$

де  $P, S$  - значення активної та повної потужностей.

Отже, критерій № 1 включає до себе виконання критерію мінімізації рівню реактивної потужності (критерій № 3).

Під мінімізацією рівня реактивної потужності мається на увазі усунення зсуву фаз між однойменними гармоніками напруги та струму у відповідній фазі мережі (табл. 1).

Виконання критерію № 2 забезпечує рівномірне споживання енергії на всьому інтервалі часу  $T$ . Критерій № 2 виконує р-q теорія миттєвої потужності [6], включаючи часткове виконання критерію мінімізації рівня реактивної потужності.

Критерій № 4 базується на формуванні у мережі синусоїдних струмів, рівних за амплітудою та зсунутих на  $120^\circ$ .

Необхідно зауважити, що виконання цього критерію часто пропонується для пристроїв компенсації, що працюють в умовах «неідеальної» напруги.

Критерій № 5 накладає обмеження на максимальне (пікове) значення миттєвого струму в системі.

Його виконання забезпечує захист електротехнічного обладнання системи від перевищення сигналами заданих рівнів.

Отже, основними критеріями для САФ струму, що працюють в умовах несиметричної несинусоїдної напруги живлення є:

передача максимуму енергії до навантаження (№ 1 в табл. 1) - яка частіше за все обирається через енергоефективність;

симетрування фазних струмів (№ 4 в табл. 1) - обирається через відносну простоту реалізації та є близьким до попереднього критерію (№ 1 в табл. 1) за умови незначної несиметрії або несинусоїдності.

Варто більш детально розглянуто реалізацію обох критеріїв.

*Перший варіант роботи.* Для реалізації критерію передачі максимуму енергії до навантаження пропонується використовувати метод Фрізе [7], до якого включено корекцію несиметрії.

Зазначений метод базується на знаходженні еквівалентної активної провідності навантаження.

На відміну від оригінального методу Фрізе пропонується обчислювати узагальнену активну провідність споживача (за трьома фазами) та при обчислюванні струмів корекції враховувати несиметрію напруги

$$G_e = \frac{P_A}{U_A^2} + \frac{P_B}{U_B^2} + \frac{P_C}{U_C^2} / 3, \quad (3)$$

де  $G_e$  - еквівалентна активна провідність;  $P_A, P_B, P_C$  - активні потужності фаз А,В,С відповідно,  $U_A, U_B, U_C$  - діючі значення напруг фаз А,В,С відповідно

$$\begin{bmatrix} P_A \\ P_B \\ P_C \end{bmatrix} = \frac{1}{T} \cdot \begin{bmatrix} T \\ \int u_A \cdot i_A dt \\ 0 \\ T \\ \int u_B \cdot i_B dt \\ 0 \\ T \\ \int u_C \cdot i_C dt \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$  - миттєві значення напруг та струмів фаз А,В,С відповідно.

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = G_e \begin{bmatrix} \frac{2u_A - u_B - u_C}{3} \\ \frac{2u_B - u_A - u_C}{3} \\ \frac{2u_C - u_A - u_B}{3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $i_{cA}, i_{cB}, i_{cC}$  - струм корекції, що має бути генерований до фаз А,В,С відповідно.

Нижче представлено результати моделювання активного фільтру струму, який підключено до трипровідної несинусоїдної несиметричної мережі живлення 0,4 кВ з нелінійним навантаженням, яке є джерелом вищих гармонік струму та реактивної потужності.

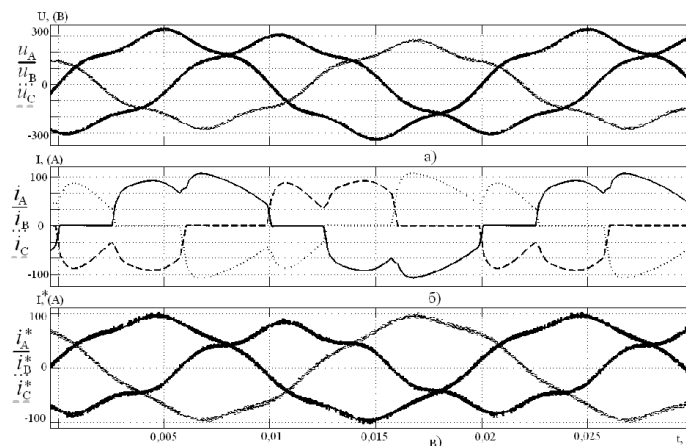


Рис. 1. Напруга мережі а, струм мережі до корекції б, струм мережі після корекції в

Детальний аналіз результатів моделювання приведений нижче під час порівняння двох методів у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння результатів моделювання

Параметр	До корекції	Корекція за першим варіантом	Корекція за другим варіантом
Коефіцієнт гармонік фазних струмів, %	32	8,9	2,5
Коефіцієнт гармонік фазних напруг, %	10,3	10,3	10,3
Коефіцієнт несиметрії напруги, %	12,7	12,7	12,7
Коефіцієнт потужності	0,804	1,0	0,97
Похибка моделювання (за активною потужністю)		до 2,1 %	

*Другий варіант роботи.* Для симетрування фазних струмів пропонується використовувати математичний апарат, основна задача якого зводиться до визначення вектору струму першої гармоніки прямої послідовності та фази вектору напруги першої гармоніки прямої послідовності. Струм корекції обраховується за виразом

$$\begin{bmatrix} i_{cA} \\ i_{cB} \\ i_{cC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - I_f^{(1)} \cdot \cos(\varphi_{fU}^{(1)} - \varphi_{fI}^{(1)}) \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi_{fU}^{(1)}) \\ \sin(\omega t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_{fU}^{(1)}) \\ \sin(\omega t + \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_{fU}^{(1)}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $I_f^{(1)}$  - амплітудне значення вектору струму першої гармоніки прямої послідовності;  $\varphi_{fU}^{(1)}$ ,  $\varphi_{fI}^{(1)}$  - фази векторів напруги та струму першої гармоніки прямої послідовності.

Результати моделювання САФ, що використовує представлений математичний апарат, представлені на рис. 2.

Із табл. 2 видно, що при обох варіантах корекції гармонійний спектр фазних струмів поліпшується, однак більш ефективним з точки зору усунення вищих гармонік є другий варіант.

Корекція за першим способом приводить до максимального поліпшення коефіцієнту потужності (повне усунення реактивної потужності), чого не відбувається при корекції за другим варіантом роботи.

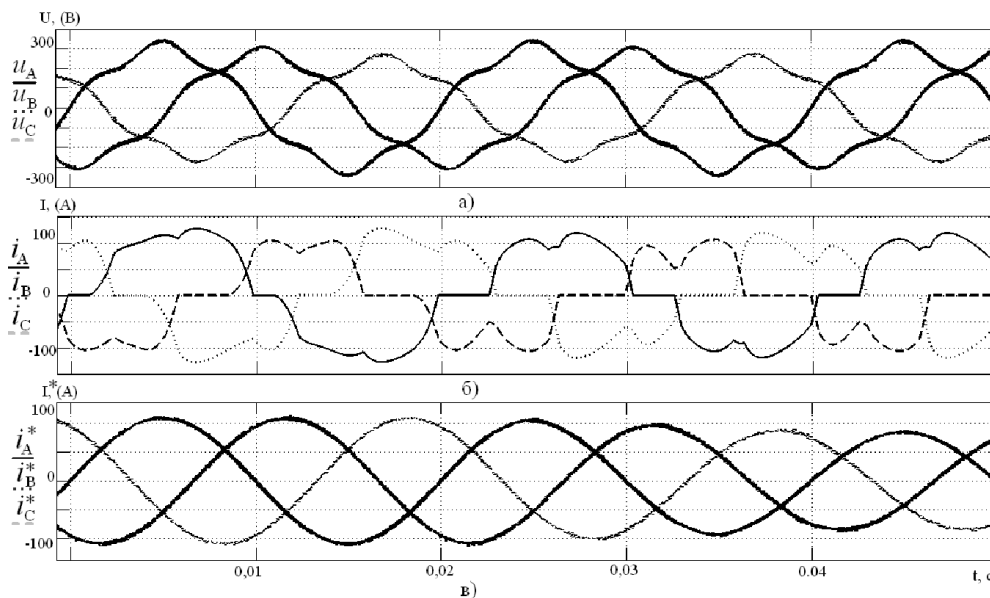


Рис. 2. напруга мережі а, струм мережі до корекції б, струм мережі після корекції в

Слід зауважити, що максимальне значення струму після корекції є меншим, ніж вихідне значення струму мережі.

Пікове значення струму фази після корекції є меншим при другому варіанті роботи.

Також додамо, що при синусоїдній симетричній нарузі живлення результати за обома варіантами корекції будуть однаковими.

**Висновки:** серед різних стратегій компенсації, що застосовують до пристроїв корекції енергопотуку виділено дві найбільш актуальні, які доцільно використовувати в умовах несиметричної несинусоїдної напруги живлення:

передача максимуму енергії до навантаження, при якій струм повторює форму напруги з урахуванням несиметрії;

симетрування фазних струмів, при якому струми фаз набувають синусоїдної форми, є рівними за амплітудою та зсунутими на  $120^\circ$  один від одного.

Перший варіант є більш доцільним з енергетичної точки зору.

Переваги другого варіанту - мінімальний коефіцієнт гармонік та зменшення пікового значення фазного струму.

#### Список літератури

1. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of science, Technical sciences. – 2006. – vol. 54. – P. 255-269.
2. Czarnecki L.S. On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory / L.S. Czarnecki // IEEE Trans. On Power Electronics Vol. 19. – 2004. – No. 3. – P. 828-836.
3. Czarnecki L.S. Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental of Power Theory / L.S. Czarnecki // Przegląd elektrotechniczny, R84. – 2008. – No. 6. – P. 28-37.
4. Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations / M. Depenbrock // IEEE Transactions on Power Systems – 1993. – Volume: 8, Issue: 2. – P. 381-387.
5. Баланс энергий в электрических цепях / И.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк [и др.]; – К.: Науко-

ва Думка, 1992. – 312 с.

6. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – New York: Wiley, 2007. – 379 p.

7. Fryze S. Wrink-, Blind-, and Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // Elekt. Zeitschrift – 1932. – Vol. 53. – № 25. – P. 596-599.

Рукопис подано до редакції 23.03.13

УДК 681.5.015: 622.7-52

В.Б. ХОЦКІНА, канд. техн. наук, доц., КЕІ ДВНЗ «Криворізький національний університет»

## РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЧИМИ ПОТУЖНОСТЯМИ ПІДПРИЄМСТВА

Розроблено інформаційну систему інтелектуального керування групою виробничого обладнання на прикладі фабрики огрудкування. Досліджено її структуру та логіко-динамічні моделі процесу керування в умовах виникнення складних аномальних явищ і виробничих проблемних ситуацій.

**Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Проблеми раціонального використання рудної сировини тісно пов'язані з можливостями процесів збагачення, огрудкування і випалення обкотишів, які в багатьох випадках залежать від ефективності узгодженого управління стадіями технологічного процесу збагачення магнетитових руд, а також їх узгодженого паралельного управління секціями збагачення в умовах завдань фабрики огрудкування концентрату в обкотиші. В останні десять років на збагачувальних фабриках ПАТ «ЦГЗК» і ПАТ «ПівнГЗК», які виробляють високосортні концентрати і обкотиші, склалась тенденція до погіршення якості сирової руди, що надходить на збагачення при значно підвищених вимогах до якості концентрату наступною стадією його переділу в обкотиші. Збільшення потоків сирової руди, яку послідовно переробляють на дробильній та збагачувальній фабриках, у свою чергу значно збільшило ціну помилок при управлінні, які в умовах ринкової економіки потрібно зменшити до мінімуму за рахунок багаторівневого адаптивного управління [1]. Виникає проблема: яким чином в умовах невизначеності, нелінійності, значної інерційності і квазістаціонарності, високої розмірності побудувати надійні системи автоматичного керування складними технологічними процесами, як постадійного так і паралельного управління секціями збагачувальної фабрики, продукція (концентрат) якої надходить на фабрику огрудкування. Актуальність даної проблеми витікає із ряду задач, поставлених перед збагачувальниками: зменшення втрат корисних компонентів і підвищення їх вилучення в концентрат з мінімізацією коливань масової частки заліза в концентраті, що надходить на огрудкування. Ці задачі, відповідно, визначені стратегічною політикою підприємств групи «Метінвест» щодо збереження сировинних ресурсів і необхідністю подолання екологічних і техногенних проблем [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Узгоджене адаптивне управління складними технологічними процесами на збагачувальних фабриках підприємств групи «Метінвест» пов'язане з великою розмірністю (багатомірністю) з одного боку, а з іншого - складною декомпозицією вихідних (вхідних) систем як по вертикалі ієрархічного підпорядкування, так і по горизонталі в межах одного рівня ієрархії [1]. По вертикалі система адаптивного управління технологічними процесами збагачення багатьма вченими розподіляється на три рівні [3-5]: нижній, який керує окремими локальними системами адаптивного управління; середній, який керує трьома стадіями процесів збагачення, тобто окремими контурами і технологічними агрегатами; верхній (концептуальний) [3], до функцій якого входить координація роботи  $n$  - технологічних секцій з метою забезпечення заданої продуктивності і якості продукції фабрики огрудкування. Цю задачу формулюватимемо як задачу оптимізації проблемного середовища інтелектуальних систем управління групою технологічних секцій з урахуванням невизначеності щодо текстурних характеристик руди, яка надходить на збагачення. Отже, висока розмірність та інерційність процесів, яка дорівнює в часі розвитку нестационарності, зумовлює основні труднощі щодо моделювання й управління об'єктами збагачувальної технології, а відповідно і побудови робастних автоматизованих систем керування групою технологічних секцій, що працюють на фабрику огрудкування. Дослідження в статті виконано за трьома основними аспектами актуальної проблеми: зменшення розмірності задачі управління, моделювання нестационарних об'єктів, а також по-