

УДК 621.316.722.076.12

*О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук, В.Ю. Качалка*

*(Україна, м. Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)*

## **ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КЕРОВАНОВОГО КОМПЕНСАТОРА МЕТОДОМ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ**

**Вступ.** Збільшення числа приєднувачів, що споживають несинусоїдальний струм, призводить до зниження якості електроенергії. Це призводить до спотворення форми кривої напруги мережі, що в свою чергу веде до збільшення втрат в електричних машинах і апаратах, збільшення інтенсивності старіння ізоляції, появи перенапруг через резонансні явища в мережі, погіршення роботи пристроїв релейного захисту і автоматики та інше [1]. Сьогодні існує кілька варіантів вирішення проблем підвищення якості електроенергії. Один із них – використання компенсаторів реактивної потужності. Окрім статичних тиристорних компенсаторів широко використовують компенсатори з активними фільтрами. Основна перевага активних фільтрів полягає в можливості компенсувати широкий спектр неосновних гармонік [2]. Якість роботи фільтра залежить, в основному, від застосування методу формування керуючих впливів на силову частину фільтра та від раціонально вибраних самих елементів для накопичення енергії.

**Матеріал та результати досліджень.** Для керування компенсатором реактивної потужності використовують системи регулювання, основу яких складають блоки визначення потужності. Для аналізу

параметрів режиму компенсатора вибрано два варіанти розрахунку реактивної потужності: за теорією Фрізе, як найпростішою, та за теорією миттєвої потужності, як найсучаснішою.

У роботі [3] було запропоновано використовувати дві складові повної потужності  $S$ : активну (ефективну)  $D$  і пасивну (фіктивну або реактивну за теорією Фрізе)  $Q_0$ , визначаючи пасивну потужність як

$$Q_0 = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (1)$$

Фізично реактивну потужність можна інтерпретувати таким чином: пасивна потужність  $Q_0$  – це та потужність, середнє значення якої за період дорівнює нулю і яка відповідає енергії, що коливається між джерелом та навантаженням.

При визначенні  $D$  та  $Q_0$  Дослідник виходив з розкладу струму  $I$  на дві складові ( $I_p + I_q = I$ ), перша з яких  $I_p$  має ту саму форму, що і значення напруги (знаходиться у фазі) та визначає  $D$  ( $P = UI_p$ ), а друга  $I_q$  – ортогональна до напруги або зв'язана з нею в квадратурі та визначає  $Q_0$  ( $Q_0 = UI_q$ ) [3].

Відповідно до теорії Фрізе, активний і реактивний струми для однофазного споживача знаходяться за такими співвідношеннями:

$$i_p(t) = \frac{P}{U^2} u(t), \quad (2)$$

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t), \quad (3)$$

де  $i_q(t), i(t), i_p(t)$  – реактивний, повний та активний струми відповідно;  $u(t)$  – напруга у вузлі мережі, для

якого виконуються розрахунки;  $U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$  – діюче значення напруги, В;  $D$  – активна потужність, Вт.

Сучасна теорія миттєвої потужності орієнтована на трифазні мережі і передбачає визначення складових активної та реактивної потужностей шляхом перетворення напруги та струму з координат  $a, b, c$  в координати  $\alpha, \beta$  з використанням перетворення Кларка [4].

Миттєве значення напруги мережі

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Миттєве значення струму навантаження

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для визначення миттєвих значень активної та неактивної потужностей застосовують співвідношення

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Не менш важливим при побудові ефективного алгоритму та системи керування є вибір режиму ШІМ та параметрів силового перетворювача, який найчастіше реалізують за схемою трифазного мостового перетворювача, приєднаного до мережі через реактори та конденсаторне навантаження [2,5]. Так, згідно з роботою [5], максимальна частота імпульсів керування перетворювачем

$$f_{\max} = \frac{U_c}{4 \cdot L \cdot \Delta I_L}, \quad (7)$$

де  $U_c$  – напруга на конденсаторі АІН;  $L$  – індуктивність вхідного реактора АІН;  $\Delta I_L$  – амплітуда струму, який проходить через реактор у момент відкритого стану транзисторних ключів.

Індуктивності реактора згідно з [5]

$$L = \frac{\sqrt{2} \cdot U_n^2}{Q \cdot (U_n \cdot k_f \cdot f^* \cdot 10^{-3} - \sqrt{2} \cdot \omega)}, \quad (8)$$

де  $U_n$  – діюче значення напруги мережі;  $Q$  – величина реактивної потужності, яка запасється в реакторі;  $\omega$  – кутова швидкість мережі;  $f^*$  – прийняте значення;  $k_f$  – коефіцієнт, що показує відношення максимальної частоти до заданої.

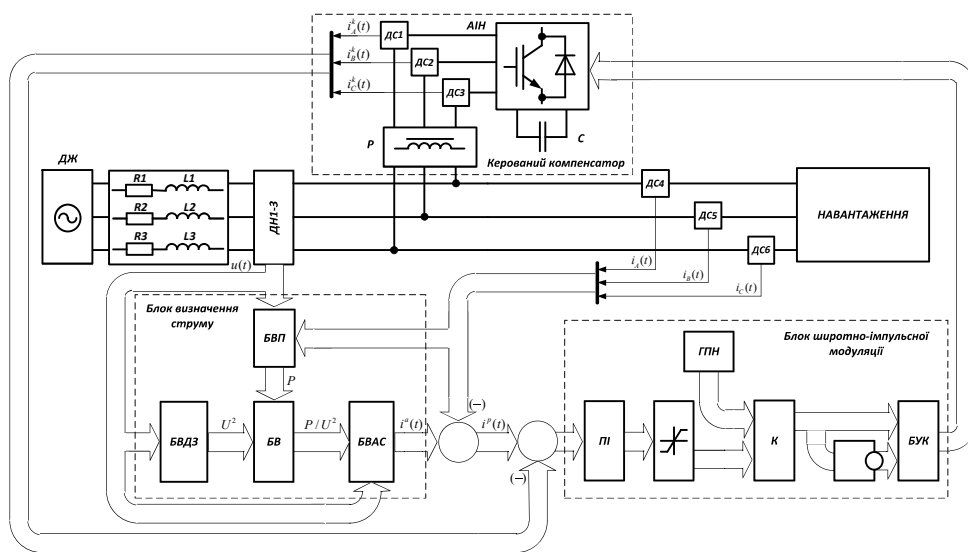
Параметр ємності конденсаторної батареї, яка служить для зниження реактивної потужності споживача, згідно з роботою [5], визначається як

$$C \geq \frac{U_n \cdot f_{\max} \cdot Q_n - \sqrt{2} \cdot Q_n \cdot \omega}{0,118 \cdot U_n^3 \cdot f_{\max}}, \quad (9)$$

де  $Q_n$  – реактивна потужність, що генерується конденсатором.

При цьому, під час розрахунків приймається ціла межа наближень та припущень, які ставлять під сумнів ефективність визначення параметрів взагалі. Оцінку якості визначення вказаних параметрів виконано в результаті досліджень методом планування експерименту.

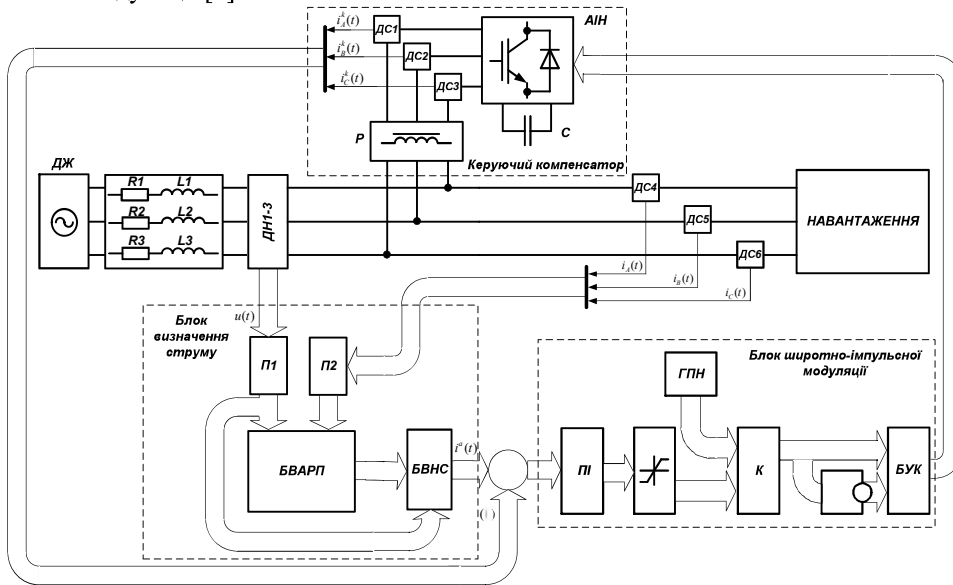
Дослідження виконано для двох моделей схем регулювання: за методом Фрізе (рис. 1) та за методом  $\alpha$ - $\beta$  перетворення (рис. 2).



**Рис. 1. Функціональна схема системи керування трифазного фільтрокомпенсуючого пристрою за методом Фрізе**

Джерело живлення (ДЖ) є лінією електропередачі з активним та індуктивним опорами, підключеною через датчики струму (ДС4-ДС6) до навантаження. Напруга у точці підключення контролюється датчиками (ДН1-ДН3). Паралельно навантаженню приєднані блок реакторів (Р) та датчики струму (ДС1-ДС3), автономний інвертор напруги (АІН) з конденсатором в колі постійного струму, які утворюють керований компенсатор. Згідно з виразами (1) – (3) сигнали, що відповідають напрузі мережі та струму навантаження, поступають на блок визначення активної потужності (БВП), вихід якого зв'язаний з входом блока визначення амплітуди активної складової струму (БВ), а вхід – з блоком визначення квадрату діючого значення напруги (БВДЗ). Сигнал реактивного струму з виходу БВ поступає на вхід блока визначення активної складової струму (БВАС). Різниця між поточним струмом навантаження та активною його складовою – реактивний струм, який є сигналом завдання для системи регулювання режиму АІН. Результат порівняння цього сигналу з поточним струмом АІН (виходи ДС1– ДС3) є керуючим для ПІ – регулятора, вихідний сигнал якого обмежений відповідно до [2]. Генератор опорної пилкоподібної на-

пруги (ГПН), компаратор (К), логічний інвертор та блок керування ключами (БУК) складають блок широтно-імпульсної модуляції [2].



**Рис. 2. Функціональна схема системи керування трифазного фільтрокомпенуючого пристрою за методом  $\alpha$ - $\beta$  перетворення**

Відмінність схеми на рис. 2 від схеми на рис. 1 полягає у блоці визначення реактивної складової струму, реалізується згідно з виразами (4) – (6), шляхом перетворення струму та напруги навантаження (П1, П2) визначення миттєвих значень активної та реактивної потужностей (БВАРП), та визначення неактивної складової струму (БВНС).

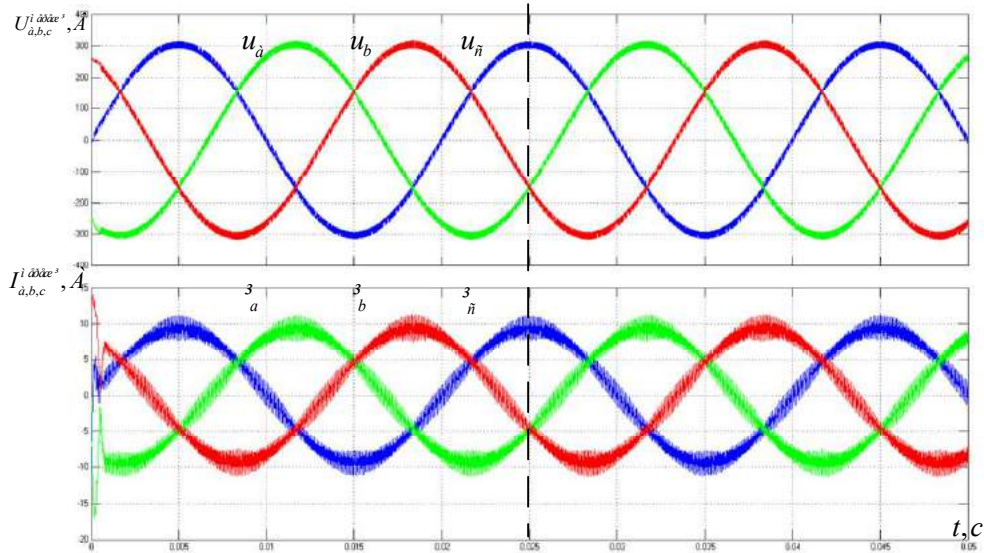
Досліди проведено для лінійного, нелінійного та несиметричного навантаження за умови дії симетричної та синусоїдної напруги джерела живлення ( $U=380\text{ В}$ ,  $f=50\text{ Гц}$ ). Види навантажень та їх параметри наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри силових елементів функціональних схем		
Види навантаження	Зображення у матмоделі	Навантаження
Лінійне		$R_H=10,4\text{ Ом}$ $L_H=0,058\text{ Гн}$
Нелінійне		$R_H=10,4\text{ Ом}$ $L_H=0,058\text{ Гн}$ $I_{доп A}=I_{доп B}=I_{доп C}=3\text{ А}$ $f_{доп A}=f_{доп B}=f_{доп C}=150\text{ Гц}$
Несиметричне		$R_{HA}=5,2\text{ Ом}$ $R_{HB}=10,4\text{ Ом}$ $R_{HC}=5,2\text{ Ом}$ $L_H=0,058\text{ Гн}$

У результаті попередніх досліджень та налагодження моделей отримані графіки зміни напруги та струму мережі (рис. 3.), досягнуто компенсацію реактивної складової струму, при цьому комутація ключів АІН призводить до виникнення високочастотних складових у струмі та напрузі мережі. У зв'язку з цим, зважаючи на мету досліджень, сформований цілий ряд параметрів, які підлягають виміру, розрахунку та дослідженню.

Виходячи з основної задачі компенсатора, компенсація реактивної потужності, яка оцінюється відповідною складовою струму її, очевидно, і треба дослідити. Окрім неї слід звернути увагу на вищі гармоніки струму генеровані компенсатором.



**Рис. 3. Графіки трифазних струмів та напруг при роботі конденсатора**

Таким чином, як параметри оптимізації [4] вибираємо діюче значення основної і вищих гармонік струму конденсатора та струму мережі при використанні методу  $\alpha-\beta$  перетворювання та діюче значення основної і вищих гармонік струму конденсатора та струму мережі при використанні методу Фрізе. Як фактори експерименту прийнятий вплив: частота імпульсів керування  $f$ , Гц –  $x_1$ ; ємності конденсатора  $C$ , Ф –  $x_2$ ; індуктивності реактора  $L$ , Гн –  $x_3$ . Відповідно до формул (7) – (9) для навантаження за табл. 1. визначені початкові значення  $f = 7500$  Гц;  $C = 7,5 \cdot 10^{-6}$  Ф;  $L = 0,00405$  Гн. Під час проведення експерименту вибрано два рівні зміни параметрів:  $p^{\min}$  і  $p^{\max}$ . Згідно з цим матриця експерименту має такий вигляд:

$$N = p^k = 2^3 = 8,$$

де  $k$  – кількість змінних.

Для отримання рівнянь регресії, які будуть адекватними досліджуваному процесу, та графіків коефіцієнтів регресії використано пакет програми Statgraphics [8].

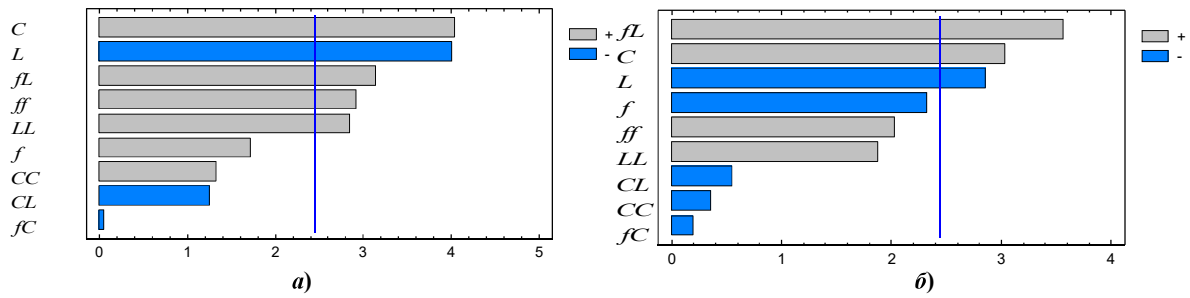
Остаточні рівняння регресії першої гармоніки діючого значення струму конденсатора для моделі на рис. 1 та моделі на рис. 2 такі:

$$\begin{aligned} y_{1\dot{e}i\dot{i}}_{\alpha-\beta} &= 8,87 - 5,57 \cdot 10^{-5} \cdot f - 858,6 \cdot \tilde{N} - 104,58 \cdot L + 2,49 \cdot 10^{-9} \cdot f^2 - \\ &- 0,05 \cdot f \cdot C + 5,35 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot L + 1,13 \cdot 10^9 \cdot C^2 - 2,15 \cdot 10^9 \cdot C \cdot L + 8330,15 \cdot L^2; \\ y_{1\dot{e}i\dot{i}}_{\dot{o}\dot{\sigma}\dot{\zeta}\dot{\alpha}} &= 12,22 - 5,25 \cdot 10^{-4} \cdot f + 148854 \cdot C - 911,55 \cdot L + 1,71 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 - \\ &- 1,78 \cdot f \cdot C + 0,06 \cdot f \cdot L - 3,01 \cdot 10^9 \cdot C^2 - 9,29 \cdot 10^6 \cdot C \cdot L + 54366,6 \cdot L^2. \end{aligned}$$

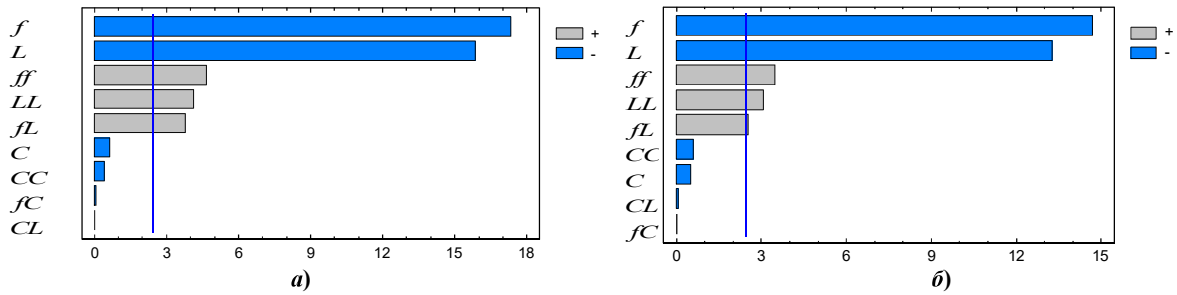
Вища гармонійних складових для таких самих умов відповідно:

$$\begin{aligned} y_{3\dot{e}i\dot{i}}_{\alpha-\beta} &= 4,26 - 4,09 \cdot 10^{-4} \cdot f + 17076,5 \cdot C - 699,88 \cdot L + 1,40 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 - \\ &- 0,25 \cdot f \cdot C + 0,02 \cdot f \cdot L - 1,28 \cdot 10^9 \cdot C^2 - 27160,5 \cdot C \cdot L + 42857,3 \cdot L^2; \\ y_{3\dot{e}i\dot{i}}_{\dot{o}\dot{\sigma}\dot{\zeta}\dot{\alpha}} &= 3,86 - 3,57 \cdot 10^{-4} \cdot f + 31091,8 \cdot C - 603,44 \cdot L + 1,21 \cdot 10^{-8} \cdot f^2 - \\ &- 0,09 \cdot f \cdot C + 0,01 \cdot f \cdot L - 2,15 \cdot 10^9 \cdot C^2 - 440741 \cdot C \cdot L + 36870,7 \cdot L^2. \end{aligned}$$

Довірчий інтервал зображений у вигляді лінії на графіках (рис.4,5), відповідно [7].



**Рис. 4.** Графіки коефіцієнтів рівняння регресії, що характеризують діюче значення першої гармоніки струму компенсатора для схем на рис. 1 а) та рис. 2 б)



**Рис. 5.** Графіки коефіцієнтів рівняння регресії, що характеризують діюче значення вищих складових струму компенсатора для схем на рис. 1 а) та рис. 2 б)

Після побудови графіків коефіцієнтів регресії наступним шагом є отримання оптимальних значень параметрів компенсатора. Для цього визначався максимум струму компенсатора для першої гармоніки та вищих складових. Причому допустиме відхилення вищих складових прийнято  $\pm 10\%$ , що затверджено стандартами з якості електричної енергії.

Результати розв'язання оптимізаційних задач для функцій регресії та значення параметрів компенсатора при різних характерах навантаження наведені у табл. 2 – 5.

Таблиця 2

**Результати розв'язання оптимізаційних задач з урахуванням лінійного навантаження**

Метод розрахунку	Всі коефіцієнти, А		Впливаючі коефіцієнти, А		$f$ , кГц		$C$ , мкФ		$L$ , мГн		Відхилення, %				
	$I_I$	$I_h$	$I_I$	$I_h$	Коефіцієнти						$\Delta I_I$	$\Delta I_h$	$\Delta f$	$\Delta C$	$\Delta L$
					всі	впл.	всі	впл.	всі	впл.					
<b>Струм компенсатора</b>															
$\alpha - \beta$	8,443	0,705	8,752	0,659	5	5	5	5	5,4	5,4	3,66	6,56	0	0	0
Фрізе	9,078	0,907	11,92	1,192	5	5	10	10	4,37	2,92	31,33	31,33	0	0	33,07

Таблиця 3

**Результати розв'язання оптимізаційних задач з урахуванням нелінійного навантаження**

Метод розрахунку	Всі коефіцієнти, А		Впливаючі коефіцієнти, А		$f$ , кГц		$C$ , мкФ		$L$ , мГн		Відхилення, %				
	$I_I$	$I_h$	$I_I$	$I_h$	Коефіцієнти						$\Delta I_I$	$\Delta I_h$	$\Delta f$	$\Delta C$	$\Delta L$
					всі	впл.	всі	впл.	всі	впл.					
<b>Струм компенсатора</b>															
$\alpha - \beta$	8,713	0,42	8,406	0,85	9,7	7,1	10	5	5	5,1	3,51	102,52	26,44	50	1,54
Фрізе	9,651	0,912	16,938	0,993	9,7	9,4	10	5	5,4	5,4	75,50	8,892	3,16	50	0

Таблиця 4

**Результати розв'язання оптимізаційних задач з урахуванням несиметричного навантаження**

Метод розрахунку	Всі коефіцієнти, А				Впливаючі коефіцієнти, А				$f$ , кГц	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	Відхилення, %												
	$I_I$		$I_h$		$I_I$		$I_h$					$\Delta I_I$					$\Delta I_h$							
	Фази		Фази		Фази		Фази		Фази		Фази		Фази		Фази		Фази		Фази					
	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В	А	В				
<b>Струм компенсатора</b>																								
$\alpha - \beta$	10,1	9,13	0,46	0,55	9,23	8,99	0,69	0,6	10	8,9	10	10	5	5	9,13	1,56	48,2	24	0	5,15	50	50	7,1	13
Фрізе	10,6	9,65	0,37	0,32	8,14	14,5	0,47	0,4	10	10	10	10	5	5	23,5	50,6	25,2	35,2	0	8,52	50	50	0,2	3,3

Результати розв'язання оптимізаційних задач з урахуванням коефіцієнта зворотної послідовності

Метод розрахунку	Коефіцієнт зворотної послідовності ( $k_0$ ), в. о.		$f$ , кГц		$C$ , мкФ		$L$ , мГн		Відхилення, %			
	Коефіцієнти		Коефіцієнти						$\Delta k_0$	$\Delta f$	$\Delta C$	$\Delta L$
	всі	впл.	всі	впл.	всі	впл.	всі	впл.				
$\alpha - \beta$	0,044	0,114	5	5	10	5	2,7	2,7	159,058	0	50	0
Фрізе	0,0372	0,039	5	5	9	10	2,7	2,7	5,977	0	4,03	0

**Висновки.** Виходячи з побудованих графіків коефіцієнтів регресії, можна стверджувати, що при роботі фільтрокомпенсуючого пристрою з різним навантаженням на діюче значення основної і вищих гармонік струму компенсатора (параметри оптимізації) у більшості випадків впливає індуктивність вхідного реактора. Шляхом розв'язання оптимізаційних задач на основі функцій регресії знайдено оптимальні значення електричних параметрів індуктивності вхідного реактора, ємності конденсаторної батареї та частоти імпульсів у системі керування. На базі цього можна стверджувати про достовірність визначення індуктивності за формулою (8), а формули для розрахунку максимальної частоти ШІМ та ємності конденсаторної батареї потребують уточнення.

#### Список літератури

1. Бурлака В.В. Обзор методов управления активными фильтрами // 36. наук. пр. «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчук, 2011. – Вип. 1. – С. 51–54.
2. Матеріали наук.-техн. конф. «Проблеми сучасної електротехніки-2010», 31 травня – 4 червня 2010 р., м. Київ, Україна, 2010. – С. 64–69.
3. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. Баланс энергий в электрических цепях. Научное издание. – К.: «Наукова думка», 1992. – 312 с.
4. Домнін І.Ф., Жемеров Г.Г., Крилов Д.С., Сокол Е.І. Сучасні теорії потужності та їх використання в перетворюючих системах силової електроніки // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність, 2004, ч. 1. – С. 80-91.
5. Zakis J., Vinnikov D., Laugis J., Rankis I., Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation // Наук. прикл. журн. «Технічна електродинаміка» - К.: ІЕД НАН України, 2010 ч.2, с. 16-21.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. / Под ред. Г.С. Зиновьев. – Н.: НГТУ, 1999
7. Сучасний експеримент: підготовка, проведення, аналіз результатів / В.Г. Блохін, О.П. Глудкін, А.І. Гуров, М.А. Ханін; Під ред. О.П. Глудкіна. – М.: Радіо та зв'язок, 1997. – 232 с.
8. Програма для статичних розрахунків та побудови графіків. Режим доступу: <http://www.statgraphics.com/>

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*