

**Літковець С. П., к.т.н.** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,  
s.p.litkovets@nuwm.edu.ua)

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ БАГАТОКООРДИНАТНОГО КЕРУВАННЯ СТАТИЧНИМ ТИРИСТОРНИМ КОМПЕНСАТОРОМ З ПРИМУСОВОЮ КОМУТАЦІЄЮ**

**В роботі проаналізовано типи існуючих статичних компенсаторів реактивної потужності та їх особливості. Визначено інтегральні показники енергетичного процесу статичного тиристорного компенсатора (СТК) з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю у випадку його живлення напругою прямокутної форми у разі незалежного керування комутуючими тиристорами. Вибрано критерій ефективності першого роду для системи керування СТК, що є ступенем досягнення системою мети управління в заданій області скалярної множини кутів керування. Запропоновано вдосконалений спосіб багатокоординатного керування СТК з примусовою комутацією, суть якого полягає у незалежному керуванні всіма комутуючими тиристорами відповідно до мети управління, яка визначається за умови, що питомі втрати активної потужності під час регулювання реактивної потужності не перевищують їх економічно обґрунтованого рівня, що дозволяє реалізувати ефективні технології керування реактивною потужністю.**

**Ключові слова:** статичні тиристорні компенсатори; примусова комутація; критерій ефективності; мета управління; багатокоординатне керування.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Компенсація реактивної потужності є важливою складовою підвищення ефективності роботи електричних мереж та промислових споживачів, оскільки дозволяє зменшити активні втрати в електричній мережі та в статичному компенсаторі, забезпечити належну швидкодію та пофазне керування реактивною потужністю. Тому пошук і розробка ефективних способів та алгоритмів керування пристроями компенсації реактивної потужності є актуальним завданням.

Основні типи СТК реактивної потужності з напівпровідниковими

комутуючими пристроями, можна віднести до таких груп:

- керовані тиристорами шунтувальні реактори – СТК з реакторами;
- керовані тиристорами батареї конденсаторів – СТК з конденсаторами;
- компенсатори реактивної потужності зі штучною комутацією.

Розглянемо більш детально зазначені типи компенсаторів.

Для мереж та промислових споживачів, що потребують компенсації ємнісних струмів, застосовуються компенсатори реактивної потужності у вигляді реактора, послідовно з яким, ввімкнені зустрічно-паралельні тиристори [1]. В цих компенсаторах під час регулювання кутів відмикання тиристорів  $\alpha$ , відбувається зміна першої гармоніки струму. Перевагами цих пристроїв є їх надійність, відносна простота конструкції та можливість пофазного керування реактивною потужністю. До явних недоліків слід віднести викривлення форми синусоїдного струму мережі під час регулювання, що призводить до додаткових електричних втрат в мережі, а також низьку швидкість та неможливість незалежного керування комутуючими тиристорами.

Забезпечити зниження впливу гармонік струму на мережі можна за допомогою компенсаторів, що містять понижуючий трансформатор, трифазний керований випрямляч і, підключений у коло постійного струму реактор.

Під час регулювання кутів відмикання тиристорів при кутах близьких до  $90^\circ$  у цьому компенсаторі здійснюється регулювання реактивної потужності. У разі значної величини індуктивності та майже відсутності активного опору у колі випрямленого струму, вплив пульсацій носить менш виражений характер [2].

Один із напрямків, спрямованих на підвищення коефіцієнта потужності, базується на використанні комутованих тиристорами конденсаторів, які підключаються до мережі безпосередньо або через понижувальний трансформатор [3]. У цих компенсаторах регулювання ємнісного струму здійснюється під час його переходу через нуль, а для усунення викривлень струму мережі вмикання тиристорів необхідно здійснювати під час максимумів напруги мережі. В компенсаторах цієї групи залишаються невирішеними питання дискретного регулювання реактивної потужності, пов'язаного з вмиканням чергових конденсаторних батарей тільки за умови досягнення напругою мережі максимального значення.

В СТК, що містять конденсатор, паралельно якому, підключені реактор і тиристори за зустрічно-паралельною схемою [4; 5] значні викривлення вихідної напруги та вхідного струму призводять до значних втрат у мережі і компенсаторі. До недоліків цієї категорії компенсаторів слід також віднести порівняно невелику швидкодію, незадовільні габаритні показники та масу.

Покращити енергетичні характеристики в системах, які утворені за допомогою вентиляного перетворювача та реактивного елемента.

Дані пристрої поділяються за типом вентиляного перетворювача, що вмикається разом із реактивним елементом, на такі типи:

- статичні автономні інвертори струму та інвертори напруги [6– 8];
- безпосередні перетворювачі частоти з природною або примусовою комутацією [8].

Перша група компенсаторів містить перетворювачі, що виконані на GTO-тиристорах та IGBT-транзисторах. Під час комутації повністю керованих вентилів основна гармоніка струму на виході компенсатора зсунута на 90 градусів відносно напруги мережі. Реактивна потужність компенсаторів в цьому випадку визначається: для інвертора струму – індуктивністю; для інвертора напруги – ємністю у колах постійного струму. Реактори, що ввімкнені між мережею та перетворювачем, призначені для обмеження вихідних струмів і зниження рівня вищих гармонік у кривій напруги перетворювачів.

Пристрої другого типу, що використовують нерегульований генератор високої частоти, застосовуються для систем зі змінним навантаженням. У випадку застосування примусової комутації використовуються додаткові індуктивно-ємнісні елементи. Зміна знаку струму в комутуваних групах вентилів здійснюється за рахунок напруги конденсаторних блоків. Ці пристрої мають обмежені функціональні можливості по суміщенню функцій стабілізації напруги та компенсації реактивної потужності. Наявність у загальній структурі реактивних елементів, виконаних на повну реактивну потужність навантаження, значно збільшує геометричні розміри цих пристроїв та втрати в самих компенсаторах. Залишаються не вирішеними питання незалежного керування кутами відкриття та закриття комутуючих тиристорів.

Аналіз зазначених вище технічних рішень свідчить про те, що актуальними є питання створення систем багатокоординатного керування СТК з незалежним регулюванням кутів відкриття та закрит-

тя комутуючих тиристорів за певними критеріями, які забезпечують суттєве зменшення активних втрат в електричних мережах та компенсуючих пристроях.

Метою статті є вдосконалення способу багатокоординатного керування статичним тиристорним компенсатором з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Під час подачі прямокутної напруги на первинну обмотку трансформатора, який входить у склад СТК з ізольованою нейтраллю, на його вторинних обмотках формується система трифазних лінійних прямокутних напруг. Лінійні напруги на затискачах вторинної обмотки трансформатора являють собою прямокутні біполярні імпульси тривалістю 120 градусів. Відстань між цими імпульсами складає 60 градусів, їх амплітуда у два рази більша за амплітуду імпульсів фазних напруг. Зазначені вище лінійні напруги зсунуті одна від одної на 120 градусів.

Відповідно до алгоритму роботи СТК з примусовою комутацією, під час дії як позитивної, так і негативної півхвилі напруги живлення спочатку відкривається перший комутуючий тиристор, потім відкривається другий комутуючий тиристор й закриває перший. Для існуючих способів регулювання реактивної потужності кути відкриття та закриття цих тиристорів залежать від кута керування першого комутуючого тиристора. Тобто здійснюється регулювання реактивної потужності за однією координатою, що не дозволяє ефективно вирішити оптимізаційні задачі компенсації.

Унікальною особливістю СТК з примусовою комутацією є можливість незалежного керування кутами відкриття та закриття комутуючих тиристорів. Виберемо в якості критерію ефективності системи керування критерій ефективності першого роду, що є ступенем досягнення системою мети управління в заданій області. Для СТК з примусовою комутацією мету управління можна задати скалярною множиною кутів керування комутуючих тиристорів. У цьому випадку регулювання реактивної потужності буде багатокоординатним, оскільки цей процес здійснюється за допомогою незалежної зміни всіх кутів керування комутуючими тиристорами.

Теоретично в СТК з примусовою комутацією можна виділити чотири незалежних кути керування комутуючими тиристорами:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  та  $\alpha_4$ . Причому, кути  $\alpha_1$  та  $\alpha_3$  – це кути відкриття першого комутуючого тиристора, відповідно, під час дії позитивної та негати-

вної півхвилі напруги живлення, а кути  $\alpha_2$  та  $\alpha_4$  – це кути відкриття другого комутуючого тиристора й, відповідно закриття першого комутуючого тиристора. Практично лише кути керування  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  та  $\alpha_3$  є незалежними. Кут керування  $\alpha_4$  має визначатись моментом переходу струму фазного реактора через нуль. При цьому, квазіусталений режим силового кола настає за один період живлячої напруги, що забезпечує належну швидкодію СТК з примусовою комутацією.

Інтегральні показники енергетичного процесу СТК з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю визначимо за допомогою часових діаграм, які наведені на рис. 1.

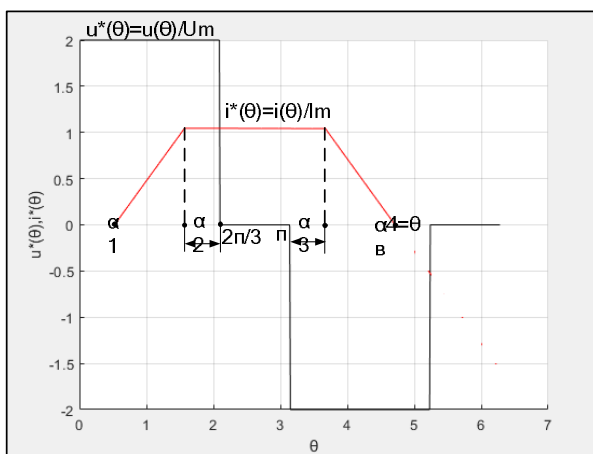


Рис. 1. Форми напруги живлення  $u^*(\theta)$  та струму  $i^*(\theta)$  через навантаження у відносних одиницях для СТК з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю у разі незалежного керування комутуючими тиристорами

Електромагнітні процеси у силовому колі СТК з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю описуються за допомогою узагальненого диференційного рівняння:

$$x_{|2-n|} \frac{di_n(\theta)}{d\theta} + r_{|2-n|} i_n(\theta) = 2(2-n)U_m, \quad (1)$$

де  $n = 1, 2, 3$  – номер ділянки на часовій діаграмі;  $U_m$  – амплітуда напруги живлення;  $\theta = \omega t$  – безрозмірний час;  $\omega$  – колова частота;  $r_1 = R_{2a} + R_{p1} + R_{p2} + R_{2b}$  ;  $x_1 = X_{2a} + X_{p1} + X_{p2} + X_{2b}$  ;  $r_0 = R_{p1} + R_{p2}$ ;  $x_0 = X_{p1} + X_{p2}$ . Через симетричність активних та

реактивних опорів силового кола СТК, тобто у разі, коли  $R_{2a} = R_{2b} = R_2$ ,  $X_{2a} = X_{2b} = X_2$ ,  $R_{p1} = R_{p2} = R_p$ ,  $X_{p1} = X_{p2} = X_p$ , опори  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $r_0$ ,  $x_0$ , відповідно, дорівнюють  $r_1 = 2(R_2 + R_p)$ ,  $x_1 = 2(X_2 + X_p)$ ,  $r_0 = 2R_p$ ,  $x_0 = 2X_p$ .

У разі незалежного керування комутуючими тиристорами на ділянці  $\alpha_1 \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} - \alpha_2$  до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора і фазного реактора прикладена напруга  $2U_m$ . На ділянці  $\frac{2\pi}{3} - \alpha_2 \leq \theta \leq \pi + \alpha_3$  напруга відсутня. На ділянці  $\pi + \alpha_3 \leq \theta \leq \theta_B$  до сумарного активно-індуктивного опору вторинної обмотки трансформатора і фазного реактора прикладена напруга  $-2U_m$ .

На підставі рівняння (1) та відповідних початкових умов струм на першій ділянці часової діаграми буде мати вигляд:

$$i_1(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} \left[ 1 - e^{\rho_1(\alpha_1 - \theta)} \right]. \quad (2)$$

Струми на другій та третій ділянках часової діаграми (рис. 2) матимуть вигляд:

$$i_2(\theta) = \frac{I_m}{\rho_1} \left[ 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right] \times e^{\rho_0 \left( \frac{2\pi}{3} - \alpha_2 - \theta \right)}, \quad (3)$$

$$i_3(\theta) = -\frac{I_m}{\rho_1} + \frac{I_m}{\rho_1} \left[ 1 + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \times e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right] e^{\rho_1(\pi + \alpha_3 - \theta)}. \quad (4)$$

Комутуючий тиристор закривається в момент, коли струм  $i_3(\theta)$  перетинає нульове значення, тобто в момент:

$$\theta_B = \pi + \alpha_3 + \frac{1}{\rho_1} \ln \left[ 1 + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \times e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right]. \quad (5)$$

Реактивна потужність та втрати активної потужності у відносних одиницях СТК з врахуванням виразів (2)–(5) будуть становити:

$$Q^*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{1}{\rho_1 \pi} \left[ 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta P^*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = & \frac{1}{\rho_1 \pi} \left[ \frac{2\pi}{3} + \frac{1}{\rho_1} e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} - \alpha_1 - \right. \\ & \left. - \alpha_2 + \frac{1}{\rho_1} \ln \left( 1 + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_1} \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

Для підвищення економічної ефективності СТК з примусовою комутацією необхідно, щоб питомі втрати активної потужності не перевищували економічно обґрунтованого рівня, що задається базовим варіантом:

$$\Delta P_Q(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \frac{\Delta P^*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)}{Q^*(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)} \leq \rho_1, \quad (8)$$

де  $\rho_1$  – питомий опір силового кола компенсатора.

За формулами (6)–(8) одержимо:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\rho_1} - \rho_1 + \frac{\rho_1 \left( \frac{2\pi}{3} - \alpha_1 - \alpha_2 \right) +}{\rho_1 \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right)} \times \\
 & + \ln \left( 1 + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right) \\
 & \frac{\phantom{+ \ln \left( 1 + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( \alpha_1 + \alpha_2 - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right)}}{\times \left( 1 + e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + \alpha_2 + \alpha_3 \right)} \right)} \leq 0. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Позначивши в (9)  $\alpha_1 + \alpha_2 = x$  та  $\alpha_2 + \alpha_3 = y$ , одержимо функцію мети системи керування СТК з примусовою комутацією:

$$z(x, y) = -\frac{1}{\rho_1} - \rho_1 + \frac{\rho_1 \left( \frac{2\pi}{3} - x \right) + \ln \left( 1 + \left( 1 - e^{\rho_1 \left( x - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + y \right)} \right)}{\rho_1 \left( 1 - e^{\rho_1 \left( x - \frac{2\pi}{3} \right)} \right) \cdot \left( 1 + e^{-\rho_0 \left( \frac{\pi}{3} + y \right)} \right)}.$$

З цього виразу видно, що функція мети системи керування статичним тиристорним компенсатором реактивної потужності з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю неявно залежить від кутів керування комутуючих тиристорів. Покладемо  $z(x, y) = 0$  та знайдемо границю її переходу через нуль (рис. 2). Наблизимо цю границю поліномом четвертого порядку:

$$y = 0,501 + 1,17x + 1,68x^2 - 1,97x^3 + 1,08x^4.$$



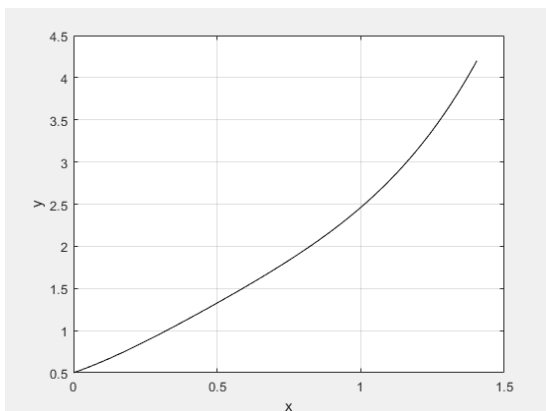


Рис. 2. Границя переходу функції мети системи керування через нуль

Підставляючи в цей вираз  $y = \alpha_1 + \alpha_3$  та  $x = \alpha_1 + \alpha_2$  одержимо рівняння граничної поверхні керування СТК:

$$\alpha_3 = -\alpha_1 + 0,501 + 1,17(\alpha_1 + \alpha_2) + 1,68(\alpha_1 + \alpha_2)^2 - 1,97(\alpha_1 + \alpha_2)^3 + 1,08(\alpha_1 + \alpha_2)^4.$$

Гранична поверхня керування СТК з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю наведена на рис. 3.

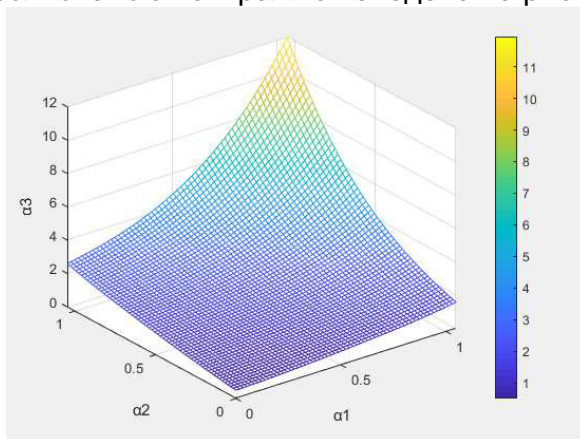


Рис. 3. Гранична поверхня керування СТК з примусовою комутацією

Гранична поверхня керування розділяє тривимірний простір кутів керування  $\alpha_3 = f(\alpha_1, \alpha_2)$  комутуючих тиристорів на дві області. У разі, коли кут керування  $\alpha_3$  розташований в області, яка знаходиться вище граничної поверхні керування, то реалізувати ефективні режими роботи СТК не є можливим. У випадку, коли кут  $\alpha_3$  розта-

шований в області, яка знаходиться нижче граничної поверхні керування, то ефективність СТК буде визначатись відстанню між граничною поверхнею керування та точкою у тривимірному просторі, яка характеризує значення кута керування  $\alpha_3$ .

Під час багатокоординатного керування СТК з примусовою комутацією необхідно забезпечити синхронізацію всіх процесів з напругою живлення та виконання певного алгоритму незалежного перемикання комутуючих елементів, а також мікропроцесорний контроль за питомими втратами активної потужності під час регулювання реактивної потужності. Ці вимоги забезпечує система керування статичним компенсатором для мереж з ізольованою нейтраллю [9]. Схема керування статичним компенсатором містить мікропроцесорну систему, алгоритм роботи якої наведено на рис. 4.

З терміналу в мікропроцесорну систему вводять параметри конфігурації СТК, тобто значення опорів фазного реактора й вторинної обмотки трансформатора  $r_p, x_p, r_2, x_2$ ; значення кутів керування комутуючими тиристорами  $\alpha_1, \alpha_2$  та дискретну сукупність кутів керування  $\alpha_{3i}$ , яка під час збільшення індексу  $i$  від 1 до  $n$  зменшується від  $\pi$  до 0. Мікропроцесорна система обчислює питомі опори  $\rho_0, \rho_1$ , граничну поверхню керування  $\alpha_{3zp} = f(\alpha_{1zp}, \alpha_{2zp})$  та різницю  $\alpha = \alpha_{3zp} - \alpha_{3i}$ . Якщо умова  $\alpha > 0$  не виконується, то індекс  $i$  збільшується на одиницю та знову визначається  $\alpha = \alpha_{3zp} - \alpha_{3i}$ . Цей процес триває до тих пір, поки не буде виконана умова  $\alpha > 0$ . Тоді мікропроцесорна система схеми керування СТК подає сигнал на відкриття першого комутуючого тиристора під час дії негативної півхвилі напруги живлення. Цей алгоритм дозволяє знизити втрати активної потужності нижче рівня базового варіанту.

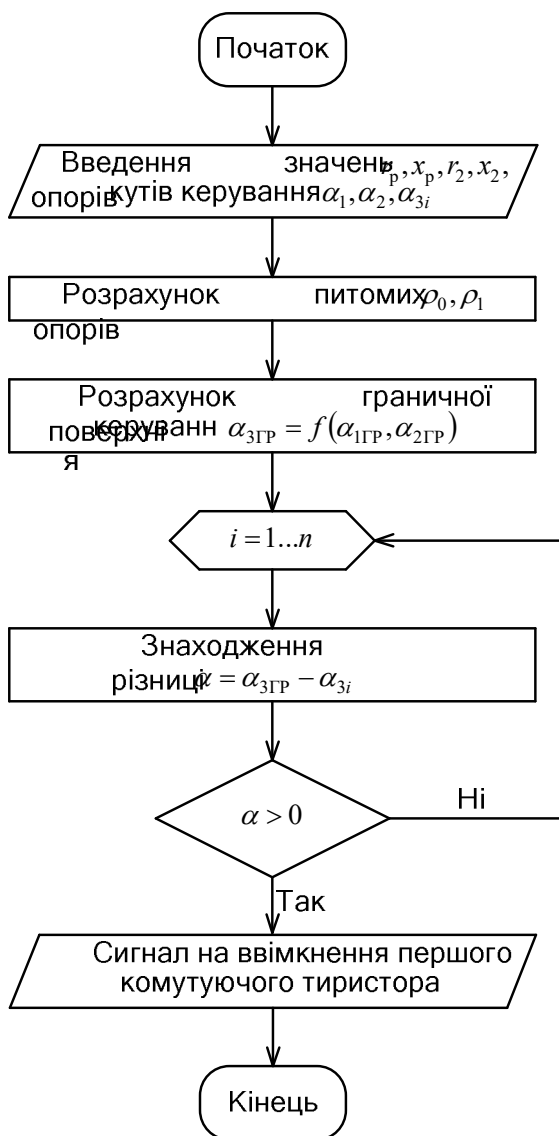


Рис. 4. Алгоритм роботи мікропроцесорної системи схеми керування СТК з примусовою комутацією під час регулювання реактивної потужності

**ВИСНОВКИ.** Проведено аналіз енергетичних процесів в СТК з примусовою комутацією для мереж з ізольованою нейтраллю у разі незалежного керування комутуючими тиристорами. Визначено реактивну, втрати активної потужностей і знайдено шляхи зменшення питомих втрат активної потужності змінюючи кути керування комутуючими тиристорами. Вдосконалено спосіб багатокординатного керування СТК з примусовою комутацією, суть якого полягає у неза-

390

лежному керуванні всіма комутуючими тиристорами відповідно до критерію ефективності першого роду, який є ступенем досягнення системою мети управління в заданій області скалярної множини кутів керування. При цьому функція мети управління визначається за умови, що питомі втрати активної потужності не перевищують їх економічно обґрунтованого рівня. Розроблено алгоритм роботи мікропроцесорної системи, яка входить у склад схеми керування СТК, що дозволяє зменшити питомі втрати активної потужності в електричній мережі і компенсаторі та реалізувати ефективні технології керування реактивною потужністю.

1. Tokiwa A., Yamada H., Tanaka T., Watanabe M., Shirai M., Teranishi Y. New Hybrid Static VAR Compensator with Series Active Filter. *Energies*. 2017. 10 (10), 1617. 2. Розанов Ю. К. Основы силовой преобразовательной техники. М. : Энергия, 1979. 392 с. 3. Rezaie H., Kazemi-Rahbar M. H. Enhancing voltage stability and LVRT capability of a wind-integrated power system using a fuzzy-based SVC. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2019. 22. 827–839. 4. Junior H. G., Liberado E. V., Pomilio J. A., Marafao F. P. General-compensation-purpose Static var Compensator Prototype. *HardwareX*. 2018. 5. 49–65. 5. Sanjeeva Rao V., Sanker Ram B. V. Coordinated control of PSS with FACTS controllers for dynamic performance enrichment. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*. 2016. 5(10), 74–83. 6. Liu W., Zheng T., Liu Z., Fan Z., Kang Y., Wang D., Zhang M., Miao S. Active and Reactive Power Compensation Control Strategy for VSC-HVDC Systems under Unbalanced Grid Conditions. *Energies*. 2018. 11, 3140. 7. Bilgin H. F., Ermis M., Kose N. K., Cetin A., Cadirci I., Acik A., Demirci T., Terciyarli A., Kocak C., Yorukoglu M. Reactive-Power Compensation of Coal Mining Excavators by Using a New-Generation STATCOM. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2007. Vol. 43, No. 1. 97–110. 8. Шидловский А. К., Федий В. С. Частотно-регулируемые источники реактивной мощности. К. : Наукова думка. 1980. 304 с. 9. Петухов, М. В., Літковець, С. П. Статичний тиристорний компенсатор з примусовою комутацією та ізольованою нейтраллю й схема керування ним. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. № 2/8(68). С. 28–35.

## REFERENCES:

1. Tokiwa A., Yamada H., Tanaka T., Watanabe M., Shirai M., Teranishi Y. New Hybrid Static VAR Compensator with Series Active Filter. *Energies*. 2017. 10 (10), 1617. 2. Rozanov YU. K. Osnovyi silovoy preobrazovatelnoy tehniky. М. : Energiya, 1979. 392 s. 3. Rezaie H., Kazemi-Rahbar M. H. Enhancing voltage stability and LVRT capability of a wind-integrated power system using a fuzzy-based SVC. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2019.

22. 827–839. **4.** Junior H. G., Liberado E. V., Pomilio J. A., Marafao F. P. General-compensation-purpose Static var Compensator Prototype. *HardwareX*. 2018. 5. 49–65. **5.** Sanjeeva Rao V., Sanker Ram B. V. Coordinated control of PSS with FACTS controllers for dynamic performance enrichment. *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*. 2016. 5(10), 74–83. **6.** Liu W., Zheng T., Liu Z., Fan Z., Kang Y., Wang D., Zhang M., Miao S. Active and Reactive Power Compensation Control Strategy for VSC-HVDC Systems under Unbalanced Grid Conditions. *Energies*. 2018. 11, 3140. **7.** Bilgin H. F., Ermis M., Kose N. K., Cetin A., Cadirci I., Acik A., Demirci T., Terciyanli A., Kocak C., Yorukoglu M. Reactive-Power Compensation of Coal Mining Excavators by Using a New-Generation STATCOM. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2007. Vol. 43, No. 1. 97–110. **8.** Shidlovskiy A. K., Fediy V. S. Chastotno-reguliruemye istochniki reaktivnoy moschnosti. K. : Naukova dumka. 1980. 304 s. **9.** Pietukhov, M. V., Litkovets, S. P. Statychnyi tyrystornyi kompensator z pryusovoioi komutatsiieiu ta izolovanoiu neutralliu y skhema keruvannia nym. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. 2014. № 2/8(68). S. 28–35.

---

**Litkovets S. P., Candidate of Engineering (Ph.D.)** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

### **IMPROVEMENT OF THE METHOD OF MULTICOORDINATED CONTROL OVER THE STATIC THYRISTOR COMPENSATOR WITH FORCED COMMUTATION**

**The static reactive power compensators of different types and their features were analyzed. The integrated indices of energy process in the static thyristor compensator have been defined. The case of rectangular-shaped voltage supplying was analyzed, when the thyristors were switched independently. Under fixed values of thyristor firing angles, the specific losses of active power under such conditions are less than if compensator is powered by a sinusoid voltage. This ensures its competitiveness relative to other static compensators. The criterion of efficiency of the first kind is chosen for the control system. The criterion estimates the level of system approaching to the control goal in particular area of the scalar set of control angles. A method of multicandidate control for static thyristor compensators with forced commutation has been improved. It implies independent control for each thyristor according to the control goal. Meanwhile specific losses of active power do not exceed their economically justified level. Real-time microprocessor control over all elements of the**

system makes it possible to enable the required algorithm for switching commutation thyristors and to implement multicandidate control over the compensator energy processes. An algorithm for operating the microprocessor system for the static compensator in the case of controlling the reactive power has been constructed.

**Keywords:** static thyristor compensator; forced commutation; efficiency criterion; control goal; multicandidate control.

---

Литковец С. П., к.т.н., (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА МНОГОКООРДИНАТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

В работе проанализированы типы существующих статических компенсаторов реактивной мощности и их особенности. Определены интегральные показатели энергетического процесса статического тиристорного компенсатора (СТК) с принудительной коммутацией для сетей с изолированной нейтралью в случае его питания напряжением прямоугольной формы при независимом управлении коммутирующими тиристорами. Выбран критерий эффективности первого рода для системы управления СТК, что является степенью достижения системой цели управления в заданной области скалярного множества углов управления. Предложено усовершенствованный способ многокоординатного управления СТК с принудительной коммутацией, суть которого заключается в независимом управлении всеми коммутирующими тиристорами в соответствии с целями управления, который определяется из условия, что удельные потери активной мощности при регулировании реактивной мощности не превышают их экономически обоснованного уровня, позволяющего реализовать эффективные технологии управления реактивной мощностью.

**Ключевые слова:** статические тиристорные компенсаторы; принудительная коммутация; критерий эффективности; цель управления; многокоординатное управление.

---