УДК 62-83:621.313.333

ХАЛАМІРЕНКО І. В., канд. техн. наук, доцент
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

ОПТИМИЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЭФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Анотація. *Розглянуто способи підвищення економічності асинхронних електроприводів шляхом зміни напруги на статорі асинхронного двигуна. В якості основного прийнятий алгоритм стабілізації еквівалентного фазового кута навантаження на рівні, рівному номінальному значенню для даного двигуна і характеризує співвідношення активних і індуктивних параметрів його схеми заміщення. Представлений алгоритм обчислення цього кута за значенням кута запізнювання струму і кута управління тиристорами. Розглянуто мікропроцесорна система управління, яка здійснює розрахунок і стабілізацію на заданому рівні еквівалентного фазового кута навантаження. Наведено результати експериментальних досліджень.*

Ключові слова: *асинхронний електропривод, тиристорний перетворювач напруги, енергетична ефективність, критерії оптимізації, коефіцієнт потужності.*

Abstract. *The ways of increasing the efficiency of asynchronous electric drives by changing the voltage on the stator of an asynchronous motor are considered. As the main accepted algorithm for stabilizing the equivalent phase load angle at the level equal to the nominal value for this engine and characterizes the ratio of active and inductive parameters of its replacement scheme. The algorithm for calculating this angle is represented by the value of the angle of the current lag and the angle of control of the thyristors. The microprocessor control system, which performs the calculation and stabilization at a given level of equivalent phase load angle, is considered. The results of experimental research are presented.*

Keywords: *asynchronous electric drive, thyristor voltage converter, energy efficiency, optimization criteria, power factor.*

У низці галузей промисловості специфіка технологічних процесів зумовлює тривалу роботу механізмів з асинхронними двигунами (АД) з навантаженням, значно меншою за номінальну. Таке

використання АД визначає значно нижчі в порівнянні з номінальними значення ККД і коефіцієнта потужності і, отже, до істотних втрат електроенергії. Тому вирішення питань оптимізації енергетичних характеристик АД, що працюють в зазначених режимах, являє собою актуальну задачу.

Відомо, що при роботі АД з постійною частотою живлячої напруги втрати в двигуні в сталому режимі є функцією моменту навантаження і струму намагнічування. Оскільки залежність втрат від струму намагнічування при постійних значеннях моменту навантаження має екстремальний характер, то для кожного значення моменту навантаження втрати в двигуні можна зводити до мінімуму шляхом регулювання струму намагнічування.

Мета роботи — розробка системи оптимізації коефіцієнта потужності асинхронного двигуна, реалізованої на базі тиристорного перетворювача напруги.

Аналіз варіантів оптимального за різними критеріями управління АД показав, що основним критерієм оптимізації енергетичних характеристик повинен бутті мінімум повного струму статора або постійний коефіцієнт потужності, рівний номінальному. Системи управління АД з коефіцієнтом потужності в якості регульованого параметра набули поширення під назвою регуляторів коефіцієнта потужності. Інформація про коефіцієнт потужності в цих пристроях визначається кутом δ запізнювання струму через тиристори. Передбачається, що кут і коефіцієнт потужності, що дорівнює відношенню активної потужності P до повної S, в рівній мірі характеризують енергетичні параметри АД. Однак таке припущення прийнятно тільки для АД малої потужності. Параметром, адекватним коефіцієнту потужності будь-якого АТ, є еквівалентний фазовий кут навантаження $\varphi_э = atctg\omega_0 L_э / R_э$, де ω_0 — кутова частота мережі живлення; $L_э$ і $R_э$ — еквівалентні індуктивність і активний опір АД, наведені до входу.

Якщо в якості ТПН застосувати перетворювач, що містить в кожній фазі зустрічно-паралельно включені тиристори, то кути δ і $\varphi_э$ будуть пов'язані з кутом відкривання тиристорів співвідношенням [1]:

$$\frac{\sin(\delta-\varphi_э)}{\sin(\alpha-\varphi_э)} = e^{\frac{\alpha-\delta}{tg\varphi_э}} \cdot \frac{e^{\frac{\pi}{3tg\varphi_э}} - e^{\frac{2\pi}{3tg\varphi_э}} - 2e^{\frac{\pi}{tg\varphi_э}}}{e^{\frac{\pi}{3tg\varphi_э}} - e^{\frac{2\pi}{3tg\varphi_э}} + 2}, \qquad (1)$$

графічна інтерпретація якого наведена на рис 1.

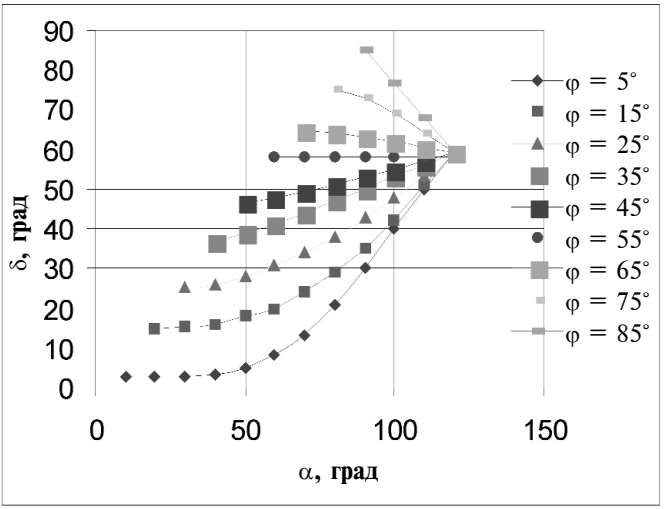

Рис. 1. **Графічна інтерпретація рівняння (1)**

Як випливає з рис. 1, управління двигуном в функції кута не забезпечить точної підтримки кута, а, отже, і коефіцієнта потужності АД. Відзначимо, що змінна стану АТ недоступна для безпосереднього вимірювання. Для вирішення завдання управління в цьому випадку доцільно використовувати ідентифікатор стану (спостерігач), який може на підставі рівняння (1) відновлювати змінну за результатами вимірювань і. Однак в реальному масштабі часу визначити в процесі управління кут по (1) не представляється можливим через велику часу обчислення.

Для скорочення часу розрахунку кута спростимо формулу (1) і відповідно перебудуємо графік залежності $\varphi_э = f(\delta)$ за умови $\alpha = const$ (рис. 2).

Видно, що в діапазоні $\varphi_э = 20° — 50°$ цю залежність можна апроксимувати прямими, що мають різний нахил для різних значень α. Цей діапазон зміни $\varphi_э$ перекриває номінальні значення φ для всіх двигунів основного виконання.

Функція $\varphi_э = f(\delta, \alpha)$ має особливу точку з координатами (δ_0, φ_0), тому рівняння прямих можна записати у вигляді:

$$\varphi_э = a_\alpha(\delta - \delta_0) + \varphi_0, \qquad (2)$$

де $\varphi_0 = \delta_0 = 56{,}5°$, a_α — коефіцієнт нахилу прямих, що залежить від кута α. Застосувавши математичні методи ідентифікації, знайдемо залежність, що зв'язує a_α і α:

$$a_\alpha = \frac{b}{\alpha_0 - \alpha} + \alpha_0, \qquad (3)$$

де $\alpha = 120^\circ$ — граничний кут; $b = 44^\circ$ — коефіцієнт.

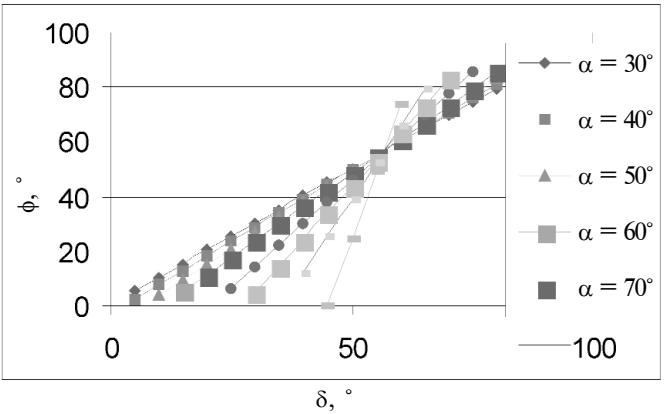

Рис. 2. **Залежність за $\varphi_э = f(\delta)$ за α = *const***

Отримане рівняння є для вирішення на мікроконтролері в реальному масштабі часу і дозволяє в зазначеному діапазоні значень замінити рівняння (1) з похибкою не більше ніж 1 %.

Функціональна схема електроприводу з оптимізацією коефіцієнта потужності АД на основі спостерігача приведена на рис. 3.

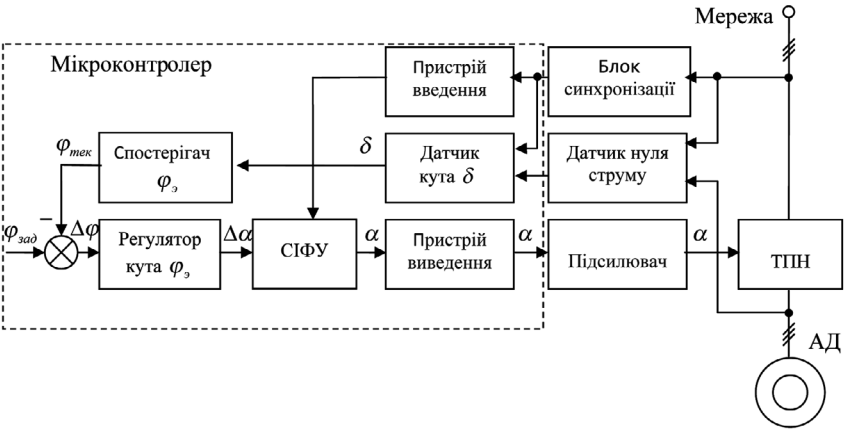

Рис. 3. **Функціональна схема електроприводу з оптимізацією коефіцієнта потужності АД на основі спостерігача**

Функції системи імпульсно-фазового управління (СІФУ), спостерігача і регулятора виконує мікроконтролер. Датчик кута δ реалізований на програмованому таймері, який здійснює відлік тактових імпульсів в інтервалі між переходом напруги мережі через нуль і закінченням струму в цій фазі. В результаті в таймері формується код, пропорційний куту запізнювання струму. За цим кодом мікроконтролер визначає поточне значення кута δ. Потім на основі інформації про кути α і δ по формулі (4) з використанням табличних методів обчислюється поточне значення еквівалентного фазового кута навантаження $\varphi_э$.

Управління тиристорами здійснюється багатоканальною синхронною СІФУ. Алгоритм роботи СІФУ передбачає синхронізацію з мережею (рис. 4), формування опорних сигналів на лічильниках таймера, порівняння цих сигналів з $\alpha_{зад}$, і видачу команди на включення тиристорів в момент збігу опорного сигналу з $\varphi_э$.

Після видачі команди на включення тиристорів мікроконтролер по коду, записаного в лічильниках датчика кута δ, визначає поточне значення кута запізнювання струму, обчислює по (4) поточне значення кута $\varphi_э$, порівнює його із заданим і змінює $\alpha_{зад}$ так, щоб компенсувати неузгодженість між поточним і заданим значеннями кута $\varphi_э$. Цей цикл мікроконтролер повторює шість разів за період, при розрахунку кутів включення кожного тиристора.

З метою підтвердження припущення твердження, що в асинхронному електроприводі еквівалентний фазовий кут навантаження адекватний показником. виконані експериментальні дослідження режимів АД, керованого ТПН зі зворотним зв'язком по еквівалентному фазового кута навантаження. Отримані для двигуна 4АХ80А6 експериментальні залежності коефіцієнта потужності $K_M = f(M)$, $\cos\varphi_e = f(M)$, струму статора $I_{se} = f(M)$, активної потужності $P_e = f(M)$, де M — момент двигуна при номінальній напрузі живлення, наведені на рис. 5 [2, 3]. Всі величини представлені у відносних одиницях. Базовими є номінальні значення споживаної активної потужності $P_{ном}$, повного струму статора $I_{s\ ном}$ і моменту навантаження $M_{ном}$.

Коефіцієнт потужності K_M і $\cos\varphi_э$ в експериментальних дослідженнях вимірювалися двома способами для кожного значення моменту навантаження. При першому способі проводили вимірювання кута α і параметра β, потім по (1) розраховувалися значення $\varphi_э$ і $\cos\varphi_э$. Результати вимірювань і розрахунків відображені графіком K_M і $\varphi_э$ на рис. 5.

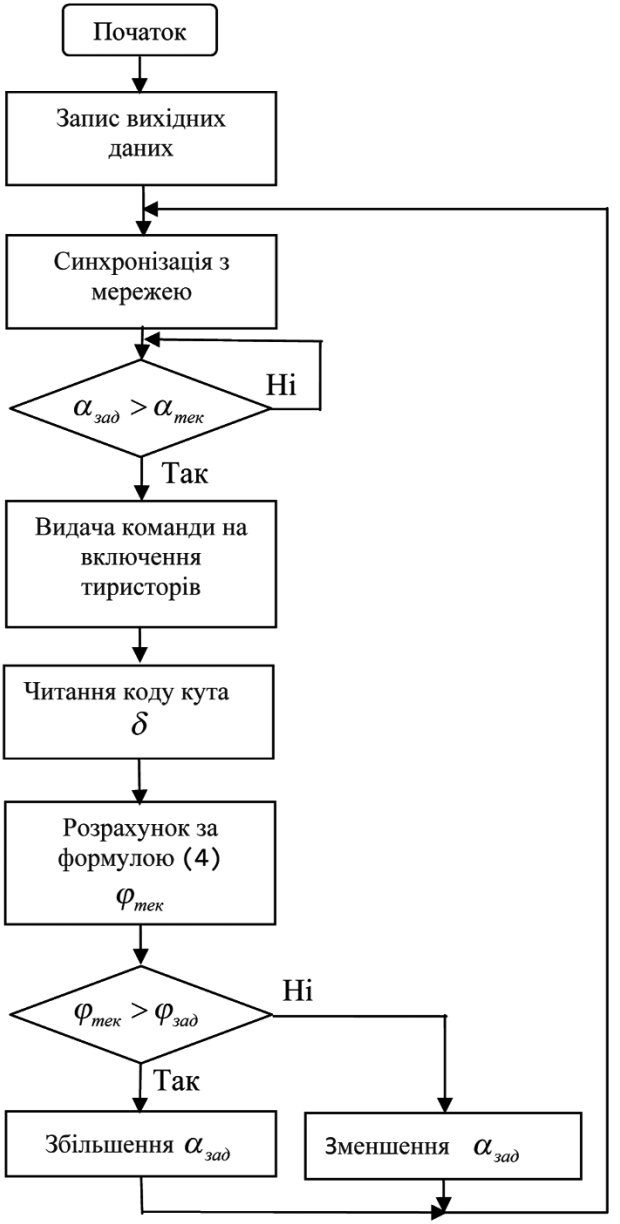

Рис. 4. **Блок-схема алгоритму оптимізації коефіцієнта потужності АД**

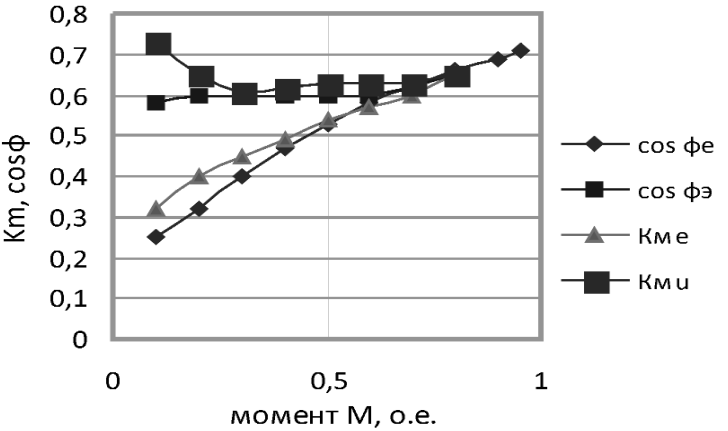

Рис. 5. **Результати вимірювань і розрахунків cos$\varphi_э$, K_M**

Другий спосіб використовує вимірювання потужності P, струму I_s і напруги U_s, і обчислення значення K_M. Результати вимірювань і розрахунків відображені на рис. 5 графіками cos$\varphi_э$, K_{MU} і K_{MS}. При вимірі напруги U_s на вході АД враховано, що на обмотці двигуна, керованого ТПН, протягом напівперіоду присутній як фактичне напруга, що надходить до нього від мережі через ТПН, так і ЕРС обертання, що наводиться в обмотках статора.

Оптимальне керування дозволяє на АТ даного типорозміру приблизно на 30 % знизити споживану активну потужність і вдвічі зменшити струм статора. Тут же для порівняння приведена залежність, знята експериментально при управлінні по мінімуму повного струму статора. Різниця в значеннях струмів і для одного і того ж моменту навантаження не перевищує 7 % у всьому діапазоні зміни. Значення і як при управлінні з координування, так і при управлінні по мінімуму струму практично збігаються [2].

Висновки. Справедливим є твердження, що в асинхронному електроприводі енергетичні показники визначає коефіцієнт потужності. Запропоновано метод оптимізації, який забезпечує практично постійний і незалежний від навантаження коефіцієнт потужності АД. Слід зазначити, що несинусоідальність струму статора, яка виникає у регулюванні напруги за допомогою ТПН, призводить до додаткових втрат у АД від вищих гармонік. Це явище не дає можливості при вирішенні задачі оптимізації отримати без зниження ККД коефіцієнт, який дорівнює номінальному.

Література

1. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / Л. П. Петров, В. А. Ладензон, М. П. Обуховский, Р. Г. Подзолов. Москва: Энергия, 1970. — 128 с.

2. Халаміренко І. В. Дослідження енергетичної ефективності нерегульованих асинхронних електроприводів // Актуальні питання енергозбереження як вимога безпеки життедіяльности // Науково-техничний збирник. Материали Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 7—8 червня 2018 р. — С. 101—107.

3. Халамиренко И. В. Регулирование коэффициента мощности асинхронного тиристорного электропривода // Електротехнічні та комп'ютерні системи, 2018. № 27 (103). — С. 144—150.

Інформація про автора: Халаміренко І. В. канд. тех. наук: unifly@ukr.net, тел.+380504904888