

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕРЕГУЛЬОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Показана необхідність оптимізації коефіцієнта потужності нерегульованих по швидкості асинхронних електроприводів з переміжним режимом роботи. Доведено, що енергетичний показник $\cos\varphi_{\Sigma}$ адекватний коефіцієнту потужності і при оптимізації еквівалентного фазового кута навантаження в якості регульованої координати забезпечується практично постійний і не залежить від навантаження коефіцієнт потужності асинхронного двигуна.

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

Показана необходимость оптимизации коэффициента мощности нерегулируемых по скорости асинхронных электроприводов с перемежающимся режимом работы. Доказано, что энергетический показатель $\cos\varphi_{\Sigma}$ адекватен коэффициенту мощности и при оптимизации эквивалентного фазового угла нагрузки в качестве регулируемой координаты обеспечивается практически постоянный и не зависящий от нагрузки коэффициент мощности асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, тиристорный преобразователь напряжения, энергетическая эффективность, критерии оптимизации, коэффициент мощности.

The need to optimize the power factor of speed-unregulated asynchronous electric drives with intermittent operation is shown. It is proved that the energy index $\cos\varphi_{\Sigma}$ is adequate to the power factor and when the equivalent phase load angle is optimized, a practically constant and load-independent power factor of the asynchronous motor is provided as a regulated coordinate.

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

Вступ. У ряді галузей промисловості специфіка технологічних процесів обумовлює тривалу роботу нерегульованих асинхронних електроприводів виробничих механізмів з навантаженнями, значно меншими за номінальну. Наприклад, на підприємствах гірничодобувної промисловості середнє завантаження асинхронних двигунів (АД) коливається в межах 0,4 - 0,6 номінальної, а в машинобудівній та металообробній промисловості – 0,14 - 0,4 номінальної.

Такі режими роботи призводять до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) і коефіцієнта потужності АД в порівнянні зі значеннями, відповідними номінальному навантаженню і, отже, до зниження енергетичної ефективності електропривода. Тому вирішення питань оптимізації енергетичних характеристик АД, що працюють в зазначених режимах, являє собою актуальну задачу і має велике економічне значення.

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, зумовлених струмом намагнічування, від моменту навантаження має екстремальний характер, для кожного значення моменту навантаження втрати в двигуні можна зводити до мінімуму шляхом зміни струму намагнічування, наприклад, за допомогою тиристорних перетворювачів змінної напруги (ТПН), що включаються в статорних ланцюг АД.

Слід враховувати, що зайвий струм намагнічування викликає зростання втрат не тільки в самому двигуні, але і в системі електропостачання промислового підприємства, в яку він включений. Техніко-економічні розрахунки показали, що частка втрат в системі електропостачання, що виникають при роботі таких електроприводів, від загальних втрат електроенергії на підприємстві є досить значною. Критерій оптимального управління асинхронного двигуна слід визначати з умови досягнення мінімальних втрат електроенергії у всій системі електропостачання.

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

Матеріали досліджень. Аналіз варіантів оптимального за різними критеріями управління АТ, як елемента системи електропостачання, показав, що основним критерієм має бути або мінімум повного струму статора, або максимум коефіцієнта потужності АД, оскільки саме ці величини визначають мінімальні втрати активної потужності в системі електропостачання і близькі до мінімальних втрат в двигуні. Отже, система управління АТ повинна змінювати напругу на виході ТПН так, щоб при кожному значенні моменту навантаження забезпечити або мінімальний струм статора, або максимальний коефіцієнт потужності АТ. Однак при використанні останнього критерію, при якому підтримується максимальний коефіцієнт потужності АТ, ККД двигуна значно нижче, ніж при інших умовах оптимізації [1]. Це зумовлює зменшення моменту на валу АД, і в кінцевому підсумку – зниження його продуктивності, тому такий спосіб, звичайно, не можна визнати доцільним.

Тому, вирішуючи поставлену задачу оптимізації як багатокритеріальну, слід орієнтуватися на алгоритми управління, що забезпечують значення коефіцієнта потужності АД, близьке до номінального, або мінімальний струм статора. В цьому випадку і ККД двигуна також приймає значення, близькі до номінального.

Мінімізувати струм статора можна, наприклад, за допомогою пристрою, що забезпечує необхідну залежність між напругою і струмом статора. Однак такі пристрої не інваріантні до зміни параметрів АД. Від цього недоліку вільні системи управління, в яких регульованою координатою є коефіцієнт потужності АТ, так як зміна параметрів машини відбивається безпосередньо на контрольованому параметрі і, отже, компенсується регулятором. Слід зазначити, що коефіцієнт потужності цих пристроїв

визначається шляхом вимірювання кута закривання тиристорів β , залежного від кута відкривання тиристорів α , і співвідношення активних і реактивних параметрів навантаження ТПН, яке характеризується еквівалентним фазовим кутом φ_3 .

Розглянемо яким чином можна реалізувати аналогічне управління в асинхронному електроприводі з трифазним АД. Якщо в якості ТПН застосувати перетворювач, що містить в кожній фазі зустрічно-паралельно включені тиристори, то для нього в сталому режимі справедливо наступне співвідношення, що зв'язує величини кутів α , β і φ_3 [2]:

$$\sin(\beta - \alpha) + \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_3) \cdot \cos(\beta - \alpha) = \operatorname{tg}(\alpha - \varphi_3) - \exp\left(\frac{\alpha - \beta}{\operatorname{tg}\varphi_3}\right) \frac{2 + \exp\left(\frac{\pi/3}{\operatorname{tg}\varphi_3}\right) - \exp\left(\frac{2\pi/3}{\operatorname{tg}\varphi_3}\right)}{2 + \exp\left(-\frac{\pi/3}{\operatorname{tg}\varphi_3}\right) - \exp\left(-\frac{2\pi/3}{\operatorname{tg}\varphi_3}\right)} \quad (1)$$

Графічна інтерпретація цих залежностей для кута φ_3 , що змінюється в межах від 25° до 50° відповідних номінальних значень коефіцієнта потужності АД основного виконання, наведена на рис 1. Оскільки для збільшення моменту АД необхідно зменшити кут α ТПН, то, як видно з графіків, з ростом навантаження контрольований параметр β при постійному еквівалентним фазовим куті φ_3 дещо знижується. Тому для підтримки практично постійним значення кута φ_3 при навантаженні АД, що змінюється, досить застосувати в ТПН звичайний негативний зворотний зв'язок по параметру β . Слід зазначити, що такий алгоритм оптимізації базується на твердженні, що коефіцієнт потужності K_M , який визначається відношенням споживаних з мережі активної P і повної S потужностей, виміряних на вході АД, і еквівалентний фазовий кут φ_3 в рівній мірі характеризують комплексний характер вхідного опору АД як об'єкта оптимізації і, отже, в рівній мірі можуть бути регульованою координатою.

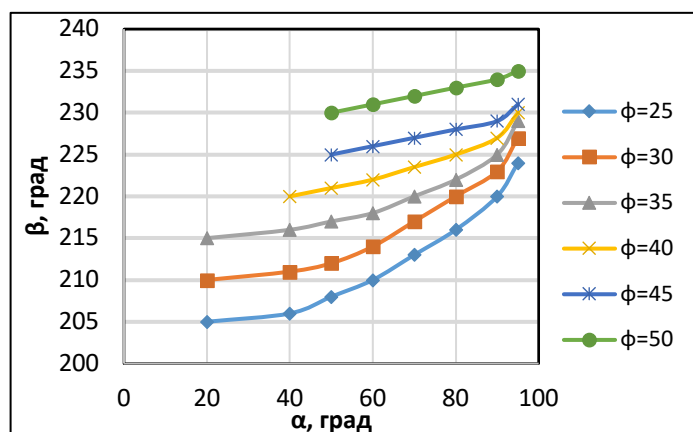


Рис. 1. Графічна інтерпретація залежності (1) при номінальному значенні коефіцієнта потужності АД

З метою підтвердження даного припущення виконані експериментальні дослідження режимів АД, керованого ТПН зі зворотним зв'язком по параметру β . Отримані для двигуна потужністю 0,75 кВт 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.2. 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 $\cos \varphi_{\Delta}$ в експериментальних дослідженнях вимірювалися двома способами для кожного значення моменту навантаження. При першому способі проводили вимірювання кута α відкривання тиристорів і параметра β , потім по (1) розраховувалися значення φ_{Δ} і $\cos \varphi_{\Delta}$. Результати вимірювань і розрахунків відображені графіком K_M і $\cos \varphi_{\Delta}$ на рис.2. 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.3 графіками $\cos \varphi_{\Delta}$, K_{MU} і K_{MS} [3]. При вимірі напруги U_s на вході АД враховано, що на обмотці двигуна, керованого ТПН, протягом напівперіоду присутні як фактична напруга, що надходить до нього від мережі через ТПН, так і електрорушійна сила (ЕРС) обертання, що наводиться в обмотках статора. В експериментах застосовувався пристрій, що виділяє фактичну напругу на вході АД, і тому при вимірах фіксувалися два значення напруги: фактичне U_s і з урахуванням ЕРС. При використанні в розрахунках K_M фактичної напруги U_s отримана залежність, практично не відрізняється від залежності $\cos \varphi_{\Delta}$. Якщо ж в розрахунках коефіцієнта потужності орієнтуватися на напругу з урахуванням ЕРС (графік K_{MS}), то виникають суттєві помилки, що досягають 50%.

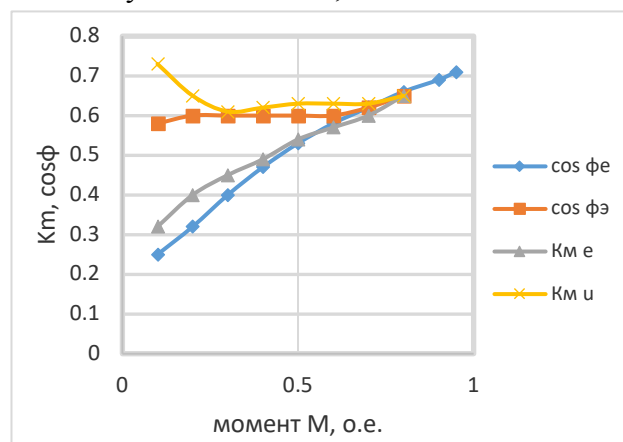


Рис. 2. Результати вимірювань і розрахунків $\cos \varphi_{\Delta}$, K_M

На рис. 3 показані залежності струму статора (графік $I_{s\varphi}$) і споживаної АД активної потужності (графік P_φ) при оптимальному управлінні з регульованою координатою φ_φ і залежності струму статора I_{se} і потужності P_e для природної характеристики двигуна [3]. Оптимальне керування дозволяє для АД даного типорозміру приблизно на 30% знизити споживану активну потужність і вдвічі зменшити струм статора. Тут же для порівняння приведена залежність $I_{s\min} = f(M)$, знята експериментально при управлінні по мінімуму повного струму статора. Різниця в значеннях струмів $I_{s\varphi}$ і $I_{s\min}$ для одного і того ж моменту навантаження не перевищує 7% у всьому діапазоні зміни M . Значення коефіцієнта потужності K_M і P як при управлінні по координаті φ_φ , так і при управлінні по мінімуму струму практично збігаються.

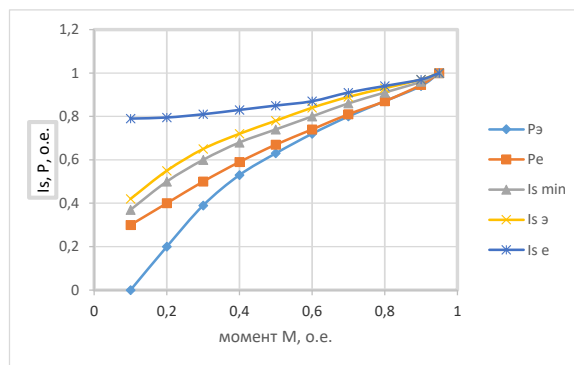


Рис. 3. Залежності струму статора $I_{s\varphi}$, активної потужності P_φ від моменту навантаження M при оптимальному управлінні з регульованою координатою φ_φ і залежності I_{se} і P_e при живленні двигуна від мережі

Висновки. Наведені результати дозволяють зробити наступні висновки. По-перше, справедливим є твердження, що в асинхронному електроприводі енергетичний показник $\cos\varphi_\varphi$ адекватний показнику коефіцієнта потужності K_M . По-друге, при оптимізації K_M АД з параметром φ_φ в якості регульованої координати забезпечується практично постійний і незалежний від навантаження коефіцієнт потужності при зміні моменту навантаження M в діапазоні 0,1 – 0,8. Слід зазначити, що несинусоїдальність струму статора, що виникає при регулюванні напруги за допомогою ТПН, призводить до додаткових втрат в АД від вищих гармонік. Це явище не дозволяє при вирішенні задачі оптимізації отримати без зниження ККД коефіцієнт потужності K_M , рівний номінальному.

Результати експериментів і розрахунки свідчать про те, що залежності, наведені на рис.2, типові для всіх типорозмірів АД. Різниця спостерігається лише в ступені поліпшення енергетичних показників при оптимальному управлінні.

Зі збільшенням потужності АД відносно зменшення струму, споживаної активної і реактивної потужностей при оптимальному управлінні проявляється менше. Однак в абсолютних цифрах зменшення струму, споживаної активної і реактивної потужностей більш істотно. Наприклад, застосування оптимального управління при моменті навантаження дозволяє знизити споживану активну потужність у чотирьохполюсних АД потужністю 5,5 кВт на 0,28 кВт, у АД потужністю 30 кВт на 0,51 кВт, у восьмиполюсних АД потужністю 18,5 кВт на 0,94 кВт, а потужністю 110 кВт на 2,84 кВт. Споживані струми при такому навантаженні в залежності від потужності і виконання АД зменшуються в 1,5 - 2,5 рази, що призводить до істотного зниження втрат в системі електропостачання. Крім того, оптимізація коефіцієнта потужності зазначених АД обумовлює менше споживання реактивної потужності і, як наслідок, значне зменшення встановленої потужності компенсуючих пристроїв [4].

ЛІТЕРАТУРА

1. Радина Е.В. Алгоритм регулирования напряжения асинхронных двигателей. – Электротехника, 1983, №5, С.32-34.
2. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / Петров Л.П., Ладензон В.А., Обуховский М.П., Подзолов Р.Г. – М.: Энергия, 1970. – 128 с.
3. Халамиренко И.В. Сравнение критериев оптимизации энергетической эффективности асинхронных электроприводов / Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції у місті Києві 25-27 квітня 2017 р. – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 64-65.
4. Рогальський Б.С., Нанака О.М., Праховник А.В. и др. Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній // Промелектро – 2006. – №3. – С. 4-5.