

## РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

И. В. Халамиренко

*Одесский национальный политехнический университет*

**Аннотация.** Рассмотрены способы повышения экономичности асинхронных электроприводов путем изменения напряжения на статоре асинхронного двигателя. В качестве основного принят алгоритм стабилизации эквивалентного фазового угла нагрузки на уровне, равном номинальному значению для данного двигателя и характеризующего соотношение активных и индуктивных параметров его схемы замещения. Представлен алгоритм вычисления этого угла по значению угла запаздывания тока и угла управления тиристорами. Рассмотрена микропроцессорная система управления, которая осуществляет расчет и стабилизацию на заданном уровне эквивалентного фазового угла нагрузки. Приведены результаты экспериментальных исследований.

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

### Введение

В ряде отраслей промышленности специфика технологических процессов обуславливает продолжительную работу механизмов с асинхронными двигателями (АД) с нагрузкой, значительно меньшей номинальной. Например, в горнодобывающей и топливной промышленности средняя нагрузка АД колеблется в пределах 0,4–0,6 номинальной, а в машиностроительной и металлообрабатывающей 0,14–0,4 номинальной. Такое использование АД определяет значительно более низкие по сравнению с номинальными значения КПД и коэффициента мощности и, следовательно, к существенным потерям электроэнергии. Потому решение вопросов оптимизации энергетических характеристик АД, работающих в указанных режимах, представляет собой актуальную задачу.

Известно, что в установившемся режиме потери в АД при определенном моменте нагрузки на его валу полностью определяются магнитным потоком машины. Используя тиристорные преобразователи напряжения (ТПН), включенные в статорную цепь АД, можно регулировать приложенное к двигателю напряжение и, следовательно, его поток. Таким образом, можно достичь минимума потерь в АД для каждого значения нагрузки.

Известно, что при работе АД с постоянной частотой питающего напряжения потери в двигателе в установившемся режиме являются функцией момента нагрузки и тока намагничивания. Поскольку зависимость потерь от тока намагни-

чивания при постоянных значениях момента нагрузки имеет экстремальный характер, то для каждого значения момента нагрузки потери в двигателе можно сводить к минимуму путем регулирования тока намагничивания.

Следует учитывать, что излишний ток намагничивания обуславливает значительные потери не только в самом двигателе, но и в системе электроснабжения промышленного предприятия, в которую он включен. Технично-экономические расчеты показали, что доля потерь в системе электроснабжения, возникающих при работе таких электроприводов, от общих потерь электроэнергии на предприятии является весьма значительной, а иногда даже преобладающей. критерий оптимального управления АД следует определять из условия достижения минимальных потерь электроэнергии по всей системе электроснабжения.

**Цель работы** – разработка системы оптимизации коэффициента мощности асинхронного двигателя, реализованной на базе тиристорного преобразователя напряжения.

### Материалы исследований

Анализ вариантов оптимального по различным критериям управления АД показал, что основным критерием оптимизации энергетических характеристик должен быть минимум полного тока статора или постоянный коэффициент мощности, равный номинальному. Системы управления АД с коэффициентом мощности в качестве регулируемого параметра получили распространение под названием регуляторов коэффициента мощности. Информация о коэффициенте мощности в этих устройствах определяется углом  $\delta$

запаздывания тока через тиристоры. Предполагается, что угол  $\delta$  и коэффициент мощности, равный отношению активной мощности  $P$  к полной  $S$ , в равной мере характеризуют энергетические параметры АД. Однако, такое допущение приемлемо только для АД малой мощности. Параметром, адекватным коэффициенту мощности любого АД, является эквивалентный фазовый угол нагрузки  $\varphi_3 = \arctg \omega_0 L_3 / R_3$ , где  $\omega_0$  – угловая частота питающей сети;  $L_3$  и  $R_3$  – эквивалентные индуктивность и активное сопротивление АД, приведенные ко входу.

Если в качестве ТПН применить преобразователь, содержащий в каждой фазе встречно-параллельно включенные тиристоры, то углы  $\delta$  и  $\varphi_3$  будут связаны с углом открывания тиристоров  $\alpha$  следующим соотношением [1]:

$$\frac{\sin(\delta - \varphi_3)}{\sin(\alpha - \varphi_3)} = e^{\frac{\alpha - \delta}{\text{tg}\varphi_3}} \cdot \frac{e^{\frac{\pi}{3\text{tg}\varphi_3}} - e^{\frac{2\pi}{3\text{tg}\varphi_3}} - 2e^{\frac{\pi}{\text{tg}\varphi_3}}}{e^{\frac{\pi}{3\text{tg}\varphi_3}} - e^{\frac{2\pi}{3\text{tg}\varphi_3}} + 2}, \quad (1)$$

графическая интерпретация которого приведена на рис 1. Видно, что в общем случае  $\varphi_3 \neq \delta$ . Таким образом, управление двигателем в функции угла  $\delta$  не обеспечит точного поддержания угла  $\varphi_3$ , а, следовательно, и коэффициента мощности АД.

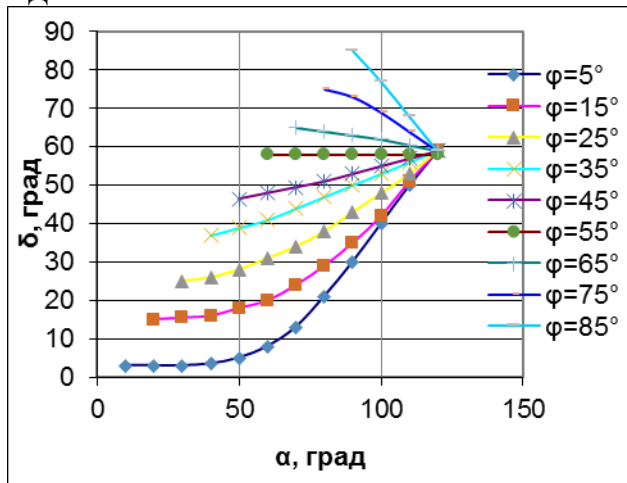


Рис. 1. Графическая интерпретация уравнения (1)

Отметим, что переменная  $\varphi_3$  состояния АД недоступна для непосредственного измерения. Для решения задачи управления в этом случае целесообразно использовать идентификатор состояния (наблюдатель), который может на основании уравнения (1) восстанавливать переменную  $\varphi_3$  по результатам измерений  $\delta$  и  $\alpha$ . Од-

нако в реальном масштабе времени определить в процессе управления угол  $\varphi_3$  по (1) не представляется возможным из-за большого времени вычисления.

Для сокращения времени расчета угла  $\varphi_3$  упростим исходное выражение (1). Перестроим графики рис.1 в виде функции  $\varphi_3 = f(\delta)$  при  $\alpha = const$  (рис. 2).

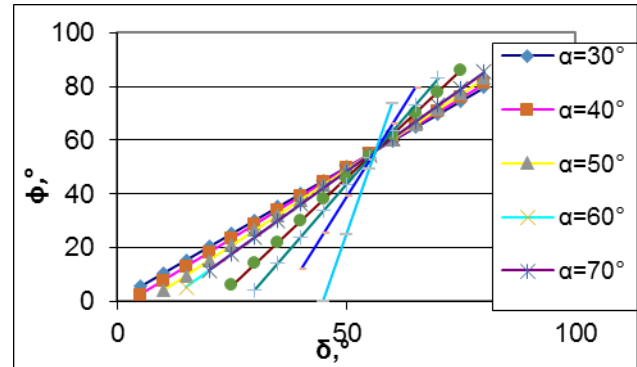


Рис. 2. Зависимость  $\varphi_3 = f(\delta)$  при  $\alpha = const$

Видно, что в диапазоне  $\varphi_3 = 20^0 - 50^0$  данную зависимость аппроксимировать прямыми, имеющими разный наклон для разных значений  $\alpha$ . Этот диапазон изменения  $\varphi_3$  перекрывает номинальные значения  $\varphi$  для всех двигателей основного исполнения.

Функция  $\varphi_3 = f(\delta, \alpha)$  имеет особую точку с координатами  $(\delta_0, \varphi_0)$ , поэтому уравнения прямых можно записать в следующем виде:

$$\varphi_3 = a_\alpha (\delta - \delta_0) + \varphi_0, \quad (2)$$

где  $\varphi_0 = \delta_0 = 56,5^0$ ,  $a_\alpha$  – коэффициент наклона прямых, зависящий от угла  $\alpha$ . Применив математические методы идентификации, найдем зависимость, связывающую  $a_\alpha$  и  $\alpha$ :

$$a_\alpha = \frac{b}{\alpha_0 - \alpha} + a_0, \quad (3)$$

где  $\alpha_0 = 120^0$  – граничный угол;  $b = 44^0$  – коэффициент.

$$\varphi_3 = \frac{b(\delta - \delta_0)}{\alpha_0 - \alpha} + a_0(\delta - \delta_0) + \varphi_0 \quad (4)$$

Полученное уравнение доступно для решения на микроконтроллере в реальном масштабе времени и позволяет в указанном диапазоне значений  $\varphi_3$  заменить уравнение (1) с погрешностью не более 1%.

Функциональная схема электропривода с оптимизацией коэффициента мощности АД на основе наблюдателя приведена на рис. 3.

Функции системы импульсно-фазового управления (СИФУ), наблюдателя и регулятора  $\varphi_3$  выполняет микроконтроллер. Датчик угла  $\delta$  реализован на программируемом таймере, осуществляющем отсчет тактовых импульсов в интервале между переходом напряжения сети через нуль и окончанием тока в этой фазе. В результате в таймере формируется код, пропорциональный углу запаздывания тока. По этому коду микроконтроллер определяет текущее значение угла  $\delta$ . Затем на основе информации об углах  $\alpha$  и  $\delta$

по формуле (4) с использованием табличных методов вычисляется текущее значение эквивалентного фазового угла нагрузки  $\varphi_3$ .

Управление тиристорами осуществляется многоканальной синхронной СИФУ. Алгоритм работы СИФУ предусматривает синхронизацию с сетью (рис. 4), формирование опорных сигналов на счетчиках таймера, сравнение этих сигналов с  $\alpha_{зад}$ , и выдачу команды на включение тиристоров в момент совпадения опорного сигнала с  $\varphi_3$ .

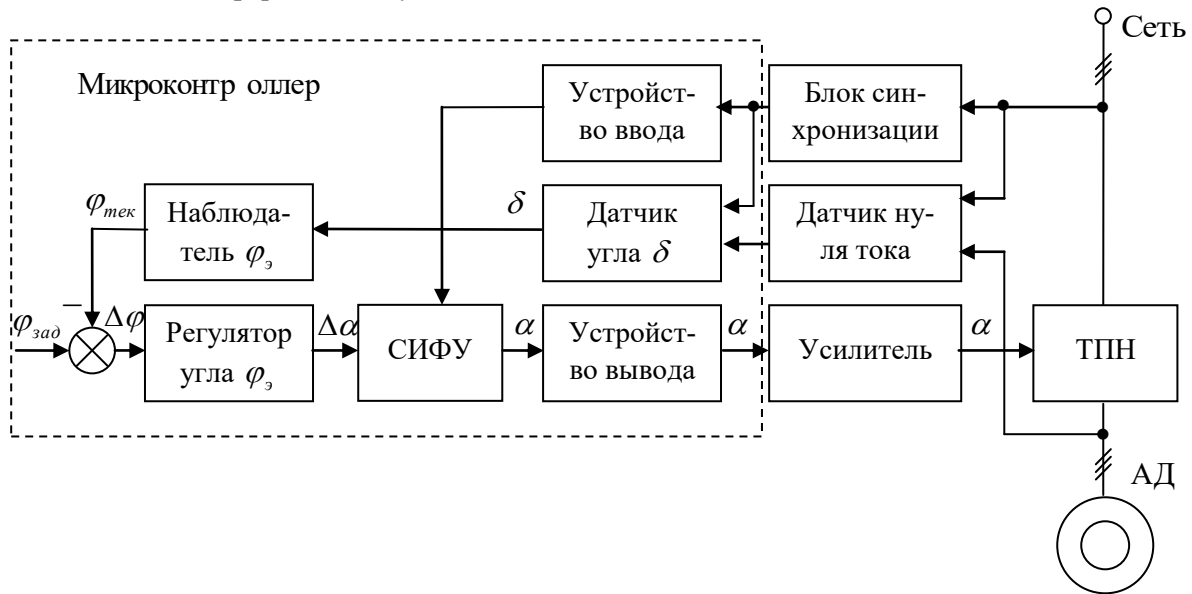


Рис. 3. Функциональная схема электропривода с оптимизацией коэффициента мощности АД на основе наблюдателя

После выдачи команды на включение тиристоров микроконтроллер по коду, записанному в счетчиках датчика угла  $\delta$ , определяет текущее значение угла запаздывания тока, вычисляет по (4) текущее значение угла  $\varphi_3$ , сравнивает его с заданным и изменяет  $\alpha_{зад}$  так, чтобы скомпенсировать рассогласование между текущим и заданным значениями угла  $\varphi_3$ . Этот цикл микроконтроллер повторяет шесть раз за период, при расчете углов включения каждого тиристора.

С целью подтверждения предположения утверждение, что в асинхронном электроприводе эквивалентный фазовый угол нагрузки адекватен показателю  $K_M$ . выполнены экспериментальные исследования режимов АД, управляемого ТПН с обратной связью по эквивалентному фазовому углу нагрузки  $\varphi_3$ . Полученные для двигателя

4AX80A6 экспериментальные зависимости коэффициента мощности  $K_M = f(M)$ ,  $\cos \varphi_e = f(M)$ , тока статора  $I_{se} = f(M)$ , активной мощности  $P_e = f(M)$ , где  $M$  – момент двигателя при номинальном напряжении питания, приведены на рис.5 [2]. Все величины представлены в относительных единицах. Базовыми являются номинальные значения потребляемой активной мощности  $P_{ном}$ , полного тока статора  $I_{s ном}$  и момента нагрузки  $M_{ном}$ .

Коэффициент мощности  $K_M$  и  $\cos \varphi_3$  в экспериментальных исследованиях измерялись двумя способами для каждого значения момента нагрузки. При первом способе производили измерения угла  $\alpha$  и параметра  $\beta$ , затем по (1) рассчитывались значения  $\varphi_3$  и  $\cos \varphi_3$ . Резуль-

таты измерений и расчетов отражены графиком  $K_M$  и  $\cos \varphi_{\Sigma}$  на рис. 5.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации коэффициента мощности АД

Второй способ использует измерения мощности  $P$ , тока  $I_s$  и напряжения  $U_s$ , и вычисление значения  $K_M$ . Результаты измерений и расчетов отражены на рис. 5 графиками  $\cos \varphi_{\Sigma}$ ,  $K_{MU}$  и  $K_{MS}$ . При измерении напряжения  $U_s$  на входе АД учтено, что на обмотке двигателя, управляемого ТПН, в течение полупериода присутствует как фактическое напряжение, посту-

пающее к нему от сети через ТПН, так и ЭДС вращения, наводимая в обмотках статора.

В экспериментах применялось устройство, выделяющее фактическое напряжение на входе АД, и поэтому при измерениях фиксировались два значения напряжения: фактическое  $U_s$  и с учетом ЭДС. При использовании в расчетах  $K_M$  фактического напряжения  $U_s$  получена зависимость  $K_{MU}$ , практически не отличающая от зависимости  $\cos \varphi_{\Sigma}$ . Если же в расчетах  $K_M$  ориентироваться на напряжение с учетом ЭДС (график  $K_{MS}$ ), то возникают существенные ошибки, достигающие 50%.

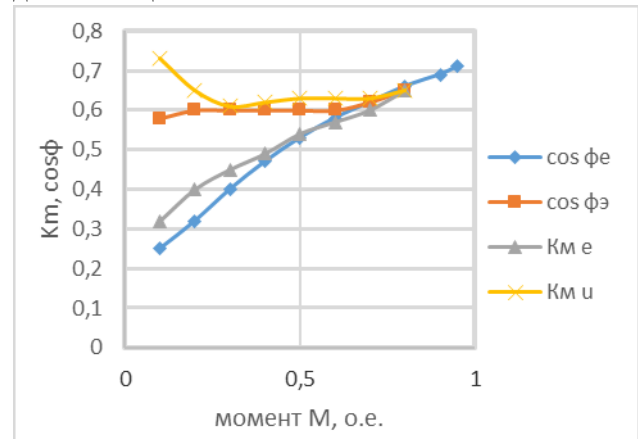


Рис. 5. Результаты измерений и расчетов  $\cos \varphi_{\Sigma}$ ,  $K_M$

На рис.6 показаны зависимости тока статора (график  $I_{s \Sigma}$ ) и потребляемой АД активной мощности (график  $P_{\Sigma}$ ) при оптимальном управлении с регулируемой координатой  $\varphi_{\Sigma}$  и зависимости тока статора  $I_{se}$  и мощности  $P_e$  для естественной характеристики двигателя [2].

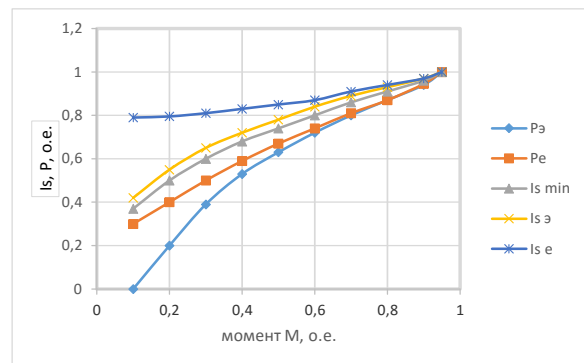


Рис.6. Зависимости тока статора (график  $I_{s \Sigma}$ ) и потребляемой АД активной мощности (график  $P_{\Sigma}$ ) при оптимальном управлении с регулируе-

мой координатой  $\varphi_{\Sigma}$  и зависимости тока статора  $I_{s_e}$  и мощности  $P_e$  для естественной характеристики двигателя

Оптимальное управление позволяет на АД данного типоразмера примерно на 30% снизить потребляемую активную мощность и вдвое уменьшить ток статора. Здесь же для сравнения приведена зависимость  $I_{s_{\min}} = f(M)$ , снятая экспериментально при управлении по минимуму полного тока статора. Различие в значениях токов  $I_{s_{\Sigma}}$  и  $I_{s_{\min}}$  для одного и того же момента нагрузки не превышает 7% во всем диапазоне изменения  $M$ . Значения  $K_M$  и  $P$  как при управлении по координате  $\varphi_{\Sigma}$ , так и при управлении по минимуму тока практически совпадают.

### Выводы

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, справедливо утверждение, что в асинхронном электроприводе энергетический показатель  $\cos \varphi_{\Sigma}$  адекватен показателю  $K_M$ . Во-вторых, при оптимизации коэффициента мощности АД с параметром  $\varphi_{\Sigma}$  в качестве регулируемой координаты обеспечивается практически постоянный и не зависящий от нагрузки коэффициент мощности при изменении  $M$  в диапазоне 0,1 – 0,8. Следует отметить, что несинусоидальность тока статора, возникающая при регулировании напряжения с помощью ТПН, приводит к дополнительным потерям в АД от высших гармоник. Это явление не позволяет при решении задачи оптимизации получить без снижения КПД коэффициент  $K_M$ , равный номинальному.

Результаты экспериментов и расчеты свидетельствуют о том, что зависимости, приведенные на рис. 5, 6, типичны для всех типоразмеров АД. Различие наблюдается лишь в степени улучшения энергетических показателей при оптимальном управлении. Анализ электроприводов конкретных механизмов показал, что для электроприводов с низким коэффициентом использования двигателя по мощности применяются короткозамкнутые АД основного исполнения мощностью от 0,75 до 200 кВт с числом полюсов  $p = 2-8$  и двигатели с повышенным скольжением мощностью от 5,6 до 60 кВт и  $p = 4-8$ . Расчет энергетических характеристик указанных АД позволил сравнить режимы номинального напряжения питания и оптимального управления

по таким технико-экономическим показателям, как коэффициент мощности, ток статора, потребляемая активная и реактивная мощность, а также оценить влияние на степень улучшения этих показателей при оптимальном управлении следующих параметров АД: номинальных мощности и скольжения и числа полюсов.

С увеличением мощности АД относительное уменьшение тока, потребляемых активной и реактивной мощностей при оптимальном управлении проявляется меньше. Однако в абсолютных цифрах уменьшение тока и потребляемых активной и реактивной мощностей более существенно. Например, применение оптимального управления при моменте нагрузки  $0,1 M_n$  позволяет снизить потребляемую активную мощность у четырехполюсных АД мощностью 5,5 кВт на 0,28 кВт, у АД мощностью 30 кВт – на 0,51 кВт; у восьмиполюсных АД мощностью 18,5 кВт – на 0,94 кВт, а мощностью 110 кВт – на 2,84 кВт. Потребляемые токи при такой нагрузке в зависимости от мощности и исполнения АД уменьшаются в 1,5–2 раза, что приводит к существенному снижению потерь в системе электроснабжения. Кроме того, оптимизация коэффициента мощности указанных АД обуславливает в 5–10 раз меньшее потребление реактивной мощности и, как следствие, значительное уменьшение установленной мощности компенсирующих устройств.

Описанный способ управления обеспечивает оптимизацию коэффициента мощности АД при любых моментах нагрузки, а устройство управления на его основе не требует дополнительной настройки при вводе в эксплуатацию, так как для АД в качестве задания  $\varphi_{\Sigma}$  устанавливается номинальное значение угла  $\varphi$ . Например, для двигателя 4AX80A6 0,75 кВт в режиме, близком к холостому ходу, при стабилизации угла  $\varphi_{\Sigma}$ , происходит снижение потребляемого тока статора на 85% от величины тока при номинальном напряжении питания. Соответственно, активная мощность, потребляемая АД снижается на 75% относительно мощности, потребляемой двигателем при номинальном напряжении.

### Список использованной литературы

1. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами [Текст] / Петров, Л. П., Ладензон В. А., Обуховский, М. П., Подзолов, Р. Г. – М.: Энергия, 1970. – 128 с.
2. Халамиренко, И. В. Сравнение критериев оптимизации энергетической эффективности асинхронных электроприводов [Текст] / Энерге-

тичний 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.

### References

1. Petrov, L. P., Ladenzon, V. A., Obuhovskiy, M. P., Podzolov, R. G. (1970) Asynchronous drive with thyristor switchboards [Asinhronnyiy elektroprivod s tiristornymi kommutatorami] Energiya., M. 128 s.
2. Khamirenko, I. V. (2017) Comparison of the criteria for optimizing the energy efficiency of

asynchronous electric drives. Energy management: the state and prospects of development. Collection of Cramp's Works of the IV International Scientific-Technical and Educational-Methodical Conference in Kyiv, April 25-27 [Srvneniye kriteriyev optimizatsii energeticheskoy effektivnosti asinhronnykh elektroprivodov Enerhetichnyy menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku. Zbirnyk naukovich prats IV Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi ta navchalno-metodychnoyi konferentsiyi u misti Kyevi 25-27 kvitnya ] Kyiv, KPI im. Igorya Sikorskoho, S. 64–65.

## REGULATION OF THE POWER FACTOR FOR THE ASYNCHRONOUS THYRISTIVE ELECTRIC DRIVE

I. V. Khamirenko

*Odessa National Polytechnic University*

**Abstract.** *It is known that when an asynchronous motor operates with a constant frequency of the supply voltage, the losses in it in the steady state are a function of the moment of loading and the magnetizing current. Since the dependence of the losses due to the magnetizing current on the load torque is extreme, for each value of the load moment the engine losses can be minimized by changing the magnetizing current, for example, using thyristor voltage converters included in the stator circuit of the induction motor. Solving the task of optimization as multi-criteria, it is necessary to focus on control algorithms providing the value of the power factor of an induction motor close to the nominal one, or the minimum stator current. In this case, the efficiency of the engine also assumes values close to the nominal.*

*The purpose of the work is the development of a system for stabilizing the power factor of an induction motor, realized on the basis of a thyristor voltage converter.*

*The above results allow us to draw the following conclusions. It is true that in an asynchronous electric drive the equivalent phase angle of the load is adequate to the power factor. If the equivalent phase load angle is stabilized at a level equal to the nominal value, a practically constant and load-independent power factor is provided for the given motor with a change in the load moment in the range 0.1-0.8. It should be noted that the shape of the stator current, different from the sinusoidal, arising when voltage is regulated by a thyristor voltage converter, leads to additional losses in the asynchronous motor from the higher harmonics. This phenomenon does not allow to obtain a power factor equal to the nominal value without decreasing the efficiency in solving the optimization problem.*

*One of the ways to stabilize the power factor of an asynchronous electric motor working with a variable load is considered. The voltage at the motor terminals is regulated as an equivalent phase load angle characterizing the ratio of the active and inductive parameters of its replacement circuit. An algorithm for calculating this angle from the value of the current lag angle and the thyristor control angle is presented. The microprocessor control system of an asynchronous motor is considered, realizing the calculation and stabilization at a given level of the equivalent phase angle of the engine load when the load on its shaft changes. The results of experimental studies are presented.*

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

## РЕГУЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ АСИНХРОННОГО ТИРИСТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

I. В. Халаміренко

*Одеський національний політехнічний університет*

**Анотація.** Відомо, що при роботі асинхронного двигуна з постійною частотою живлячої напруги втрати в ньому в сталому режимі є функцією моменту навантаження і струму намагнічування. Оскільки залежність втрат, зумовлених струмом намагнічування, від моменту навантаження має екстремальний характер, то для кожного значення моменту навантаження втрати в двигуні можна звести до мінімуму шляхом зміни струму намагнічування, наприклад, за допомогою тиристорних перетворювачів напруги, що включаються в статорних ланцюг асинхронного двигуна. Вирішуючи поставлене завдання оптимізації як багатокритеріальну, слід орієнтуватися на алгоритми управління, що забезпечують значення коефіцієнта потужності асинхронного двигуна, близьке до номінального, або мінімальний струм статора. В цьому випадку і ККД двигуна також приймає значення, близькі до номінального.

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

Наведені результати дозволяють зробити наступні висновки. Справедливо твердження, що в асинхронному електроприводі еквівалентний фазовий кут навантаження адекватний показником коефіцієнта потужності. При стабілізації еквівалентного фазового кута навантаження на рівні, рівному номінальному значенню для даного двигуна забезпечується практично постійний і незалежний від навантаження коефіцієнт потужності при зміні моменту навантаження в діапазоні  $0,1 - 0,8$ . Слід зазначити, що форма струму статора, відмінна від синусоїдальної, що виникає при регулюванні напруги за допомогою тиристорного перетворювача напруги, призводить до додаткових втрат в асинхронному двигуні від вищих гармонік. Це явище не дозволяє при вирішенні задачі оптимізації отримати без зниження ККД коефіцієнт потужності, рівний номінальному.

Розглянуто один із способів стабілізації коефіцієнта потужності асинхронного електродвигуна, що працює зі змінною навантаженням. Напруга на затискачах двигуна регулюється в функції еквівалентного фазового кута навантаження, що 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 асинхронним двигуном, що реалізує обчислення і стабілізацію на заданому рівні еквівалентного фазового кута навантаження двигуна при зміні навантаження на його валу. Наведено результати експериментальних досліджень.

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

Получено 15.03.2018



**Халамиренко Игорь Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: [unifly@ukr.net](mailto:unifly@ukr.net), тел.+380-50-490-48-81

**Igor Khamirenko**, Ph. D, docent of the Department of Power Supply and Energy Management, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: [unifly@ukr.net](mailto:unifly@ukr.net), tel.+380-50-490-48-81

ORCID ID: 0000-0002-1252-0674