

УДК 681.513.5

Е. М. Потапенко, д-р техн. наук,
А. А. Шийка

МЕТОДЫ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Аннотация. Синтезированы методы энергооптимального управления асинхронным электроприводом (АЭП) по различным энергетическим показателям. Приведены результаты моделирования работы АЭП с управлением по предлагаемым способам, дано их сравнение. Полученные результаты позволяют найти компромисс между различными энергетическими показателями работы АЭП.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, энергосбережение, энергооптимальность, активная мощность, реактивная мощность, коэффициент мощности

Е. М. Potapenko, ScD.,
А. А. Shiyka

ENERGY OPTIMAL CONTROL METHODS OF INDUCTION DRIVE

Abstract. This paper presents a synthesized on different energy parameters methods of energy optimal control of induction drive. The simulation results of induction drive working on proposed methods are showed. The comparison between energy efficiency of proposed methods is presented. The obtained results allow to find a compromise between the increasing of different energy parameters of induction drive.

Keywords: induction motor drive, energy saving, energy optimal, active power, reactive power, power factor

Е. М. Потапенко, д-р техн. наук,
А. А. Шийка

МЕТОДИ ЕНЕРГООПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Анотація. Синтезовано методи енергооптимального керування асинхронним електроприводом (АЕП) за різними енергетичними показниками. Наведено результати моделювання роботи АЕП з керуванням за запропонованими способами, надано їх порівняння. Отримані результати дозволяють знайти компроміс між різними енергетичними показниками роботи АЕП.

Ключові слова: асинхронний електропривод, енергозбереження, енергооптимальність, активна потужність, реактивна потужність, коефіцієнт потужності

Введение. В настоящее время вопросы экономии электроэнергии являются приоритетными во всем мире и, в частности, в Украине, так как структура ее экономики характеризуется, с одной стороны, энергозависимостью, а с другой, высокой долей энергоемких производств. Наибольшим потребителем электроэнергии, как в промышленности и в быту, благодаря своей простоте и надежности, является АЭП, на долю которого приходится более 70 % общего потребления. Вследствие этого, АЭП является основным источником потерь при преобразовании электрической энергии в механическую. Уменьшению этих потерь и повышению энергоэкономности (ЭЭ) АЭП посвящено большое количество работ [1 – 5].

Об ЭЭ методов управления АЭП можно судить по соотношению технико-экономических показателей, характеризующих его работу. К ним относятся потребляемая активная (P), реактивная (Q) и полная мощность (S), мощность потерь (ΔP) и коэффициент мощности ($\cos\varphi$). Большинство существующих ЭЭ методов управления АЭП минимизируют потери только активной мощности в АЭП [4 – 6], либо решают задачу оптимизации, используя косвенные критерии оптимальности (минимум тока статора [2, 3], максимум отношения «момент/ток» [7]).

При этом остальные показатели ЭЭ, в частности, потребляемая АЭП реактивная мощность и коэффициент мощности не рассматривается и не оптимизируются, что не решает задачу энергооптимального управления. В работе [8] описаны традиционные методы уменьшения реактивной мощности с использованием конденсаторных установок и синхронных компенсаторов. Применение указанных устройств связано с дополнительными финансовыми затратами. В то же время, в работе [1] показана возможность минимизации реактивной мощности с помощью синтеза оптимальных программных токов АЭП.

Целью статьи является синтез методов управления АЭП, обеспечивающих минимум энергопотребления.

Для решения поставленной задачи используем следующие уравнения работы АЭП [5]

$$u_d = R_s i_d - \omega_0 \sigma L_s i_q + \frac{\omega_0^2 L_m^2}{R_m} i_d, \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + \omega_0 L_s i_d + \frac{\omega_0^2 L_m^2 L_r}{R_m I_r^2} i_q, \quad (2)$$

$$m = n L_m^2 L_r^{-1} i_d i_q, \quad (3)$$

где i , u – векторы тока и напряжения статора, заданные проекциями в синхронном базисе (d , q); m – электромагнитный момент; n – количество пар

полюсов; R_s, R_r – активные сопротивления фаз статора и ротора; L_s, L_r, L_m – индуктивности фаз статора, ротора и взаимная индуктивность; $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ – коэффициент рассеяния; ω_0 – угловая скорость вектора потокоцепления ротора (синхронная скорость); L_{lr} – индуктивность рассеяния ротора, R_m – сопротивление цепи намагничивания АД.

Потребляемую АЭП активную, реактивную и полную мощности, а также коэффициент мощности можно записать в виде [2]

$$P = i_d u_d + i_q u_q, \quad Q = i_d u_q - i_q u_d \quad (4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(u_d^2 + u_q^2)(i_d^2 + i_q^2)}, \quad (5)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{i_d u_d + i_q u_q}{\sqrt{(u_d^2 + u_q^2)(i_d^2 + i_q^2)}} \quad (6)$$

Математически каждое из выражений (4) – (6) представляет собой функцию, имеющую экстремум (максимум либо минимум) при изменении варьируемых переменных – электромагнитного момента, скорости ротора и синхронной скорости, а также тока и напряжения статора. По степени близости к экстремумам указанных показателей в каждый момент времени можно судить об ЭЭ методов управления в целом. Как видно из выражений (4) – (6), каждый из показателей ЭЭ зависит от нескольких переменных, что затрудняет задачу оптимизации и нахождение экстремума функции путем непосредственного дифференцирования. Для упрощения задач синтеза воспользуемся следующей заменой переменных [6]

$$i_{dp} = k \sqrt{\frac{|m_p|}{n L_m^2 L_r^{-1}}}, \quad i_{qp} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{|m_p|}{n L_m^2 L_r^{-1}}} \text{sign}(m_p), \quad (7)$$

где k – искомый оптимизирующий коэффициент связи программных токов статора, с помощью которого можно задать любое соотношение между токами i_{dp}, i_{qp} . Такая замена при заданном электромагнитном моменте позволяет решать задачу оптимизации, варьируя не двумя переменными i_{dp}, i_{qp} , а одной переменной k . Тогда выражения (4) с учетом вышесказанной замены и уравнений (1) – (3) можно представить в виде функций, зависящих от двух переменных

$$P = f_1(\omega_0, k), \quad Q = f_2(\omega_0, k), \quad (8)$$

Аналогично могут быть определены полная мощность и коэффициент мощности. Анализ полученных выражений показывает, что решение задачи оптимизации сводится к следующему: для каждого значения синхронной скорости найти такое значение k , при котором вышеуказанные функции достигают соответствующего экстремума. Расчет коэффициента связи токов статора k проведем численным методом. Таким образом, получим четыре различных алгоритма оптимального управления АЭП – по минимуму потребляемой активной (синтезирован в работе [6]), реактивной и полной мощности, а также с максимизацией коэффициента мощности. Результаты сравнения работы АЭП по вышеперечисленным алгоритмам оптимального управления приведены на рисунке. Расчет

проводился для АЭП с двигателем 4А100L2У3, с параметрами, приведенными в таблице.

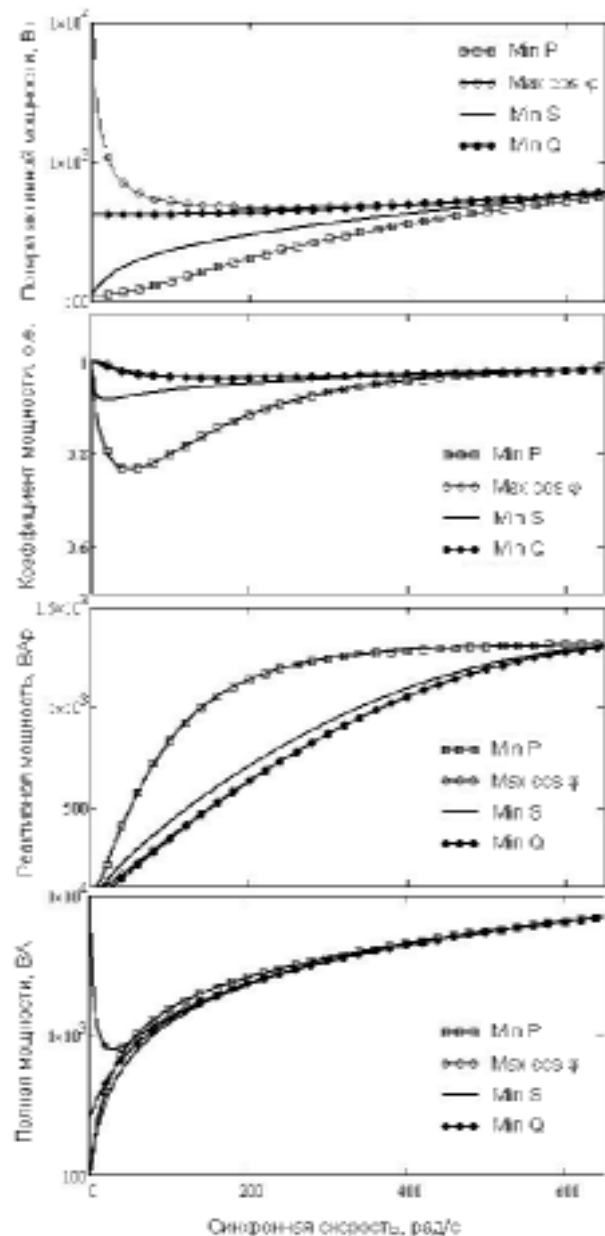


Рис.1. Экстремальные характеристики АЭП

Анализ рисунка показывает, что при достижении экстремума одним из показателей (4) – (6) возможно ухудшение других. Так, максимизация коэффициента мощности при низких скоростях сильно увеличивает потребляемую активную мощность АЭП. Из рис. 1 можно сделать вывод, что наиболее компромиссным является управление АЭП по минимуму полной потребляемой мощности.

1. Основные параметры двигателя 4А100L2У3

| | | |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| $P_n = 5,5 \text{ кВт}$ | $R_s = 1,05 \text{ Ом}$ | $L_m = 0,25 \text{ Гн}$ |
| $n_n = 3000 \text{ об/мин}$ | $R_r = 0,77 \text{ Ом}$ | $L_s = 0,254 \text{ Гн}$ |
| $n = 1$ | $R_m = 1000 \text{ Ом}$ | $L_r = 0,254 \text{ Гн}$ |

Выводы. В работе синтезированы методы энергооптимального управления АЭП по критериям минимума потребляемой активной, реактивной и полной мощности, а также максимума коэффициента мощности, проведено их сравнение путем математического моделирования работы АЭП. Результаты исследования показали, что наиболее универсальным из них является критерий минимизации полной потребляемой мощности, позволяющий найти компромисс между потребляемыми активной и реактивной мощностями и увеличить коэффициент мощности. Выбор того или иного метода должен производиться с учетом конкретных задач и условий эксплуатации.

Список использованной литературы

1. Потапенко Е. М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко. – Запорожье : ЗНТУ. – 2009. – 352 с.
2. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
3. Поляков В. Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / В. Н. Поляков, Р. Т. Шрейнер; под ред. Р.Т. Шрейнера // ФГАОУ ВПО Екатеринбург : «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2012. 222 с.
4. Овсянников Е. М. Управление тяговым асинхронным электроприводом гибридных автомобилей по минимуму потерь и максимуму перегрузочной способности / Е. М., Овсянников, Нгуен Куанг Тхиеу, Нгуен Хак Туан. // Сб. научн. тр. 65-ой межд.научн.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) – М. : МАМИ, 2009.
5. Lim S., and Nam K., (2004), Loss-Minimising Control Scheme for Induction Motors, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No.4, pp. 385 – 397.
6. Потапенко Е. М. Робастное управление асинхронных электроприводом с минимизацией потребляемой мощности / Е. М. Потапенко, А. А. Шийка // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук : – КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). – Частина 2. – С. 315 – 320.
7. Пересада С. М. Прямое векторное управление моментом асинхронных двигателей с максимизацией соотношения момент-ток / С. М. Пересада, С. С. Дымко // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К. : Техника. – 2011. – № 03(79). – С. 28 – 31.
8. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А. В. Кабышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.

References

1. Potapenko E.M., and Potapenko E.E. Robustnie algoritmi upravleniya asinhronnim privodom [Robust Algorithms of Vector Control of Induction Drive], (2009), ZNTU, Zaporizhzhya, Ukraine, 352 p (In Russian).
2. Braslavskiy I.Y., Z.S.Ishmatov, and V.N.Polyakov. Energozberigauzhiy asinchrinniy electroprivod [Energy-saving Induction Drive], (2004), Moscow, Russian Federation, *Akademiya Publ.*, 256 p. (In Russian).
3. Polyakov V.N., and Shreiner R.T. Energoeffektivniye regimi reguliruemich electroprivodov peremennogo toka [Energy Effective Modes of Regulated Induction Drive] (2012), *FGAOU BPO Russian State Professional-Pedagogical University*, 222 p. (In Russian).
4. Ovsyannikov E. M., Nguen K.T., and Nguen X. T. Upravlenie tyagovi'm asinhronnim electroprivodom gibridny'h avtomobiley po minimumu poter' i maksimumu peregrusochnoy sposobnosti. [Loss-Minimising and Maximum Torque Capability Control of Traction Induction Drive], (2009), *Materialu 65-y Mezhd. Nauchn.-Techn. Konf. Assotsiatsii Avtomobil'nich Inzhenerov (AAI)*, Moscow, Russian Federation, pp. 120 – 129 (In Russian).
5. Lim S., and Nam K., (2004), Loss-Minimising Control Scheme for Induction Motors, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No. 4, pp. 385 – 397.
6. Potapenko E.M., and Shiyka A.A. Robastnoe upravlenie asinhronnim electroprivodom s mimimumom potreblaemoy moshnosti [Robust Loss-Minimising Control of Induction Motor Drive], (2013), *Electromechanichni i Energozberigayuchi Sistemi*, Kremenchuk, KrNU, Ukraine, Vol. 2/2013 (19), pp. 315 – 320 (In Russian)
7. Peresada S., and Dymko S. Pryamoe vektornoe upravlenie momentom asinxronnih dvigateley s maksimizacziy sootnosheniya moment-tok [Direct Torque Vector Control of Induction Machine With Maximum Torque-Current Capability], (2011), *Electotexnicheskie and Komp'yuternye Sistemy*. Kiev, *Technika*, Ukraine, Vol No. 03(79), pp. 28 – 31 (In Russian).
8. Kabushev A.V. Kompensatsiya reaktivnoy moshnosti v electroustanovkah promushlennih predpriyatiy [Reactive Power Compensation in Electrical Industry], (2012), Tomsk, Russian Federation, Tomsk's Politechnical University, 234 p (In Russian).



Потапенко Евгений Михайлович,
д-р техн. наук, проф. каф. электропривода и автоматизации Запорожского нац. технического ун-та.
69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, д. 64. Тел. +38(097) 405 93 89.
E.mail: kofey@ukr.net.



Шийка Андрей
Андреевич,
аспирант каф. электропривода и ав-
томатизации Запорожского нац. тех-
нич. ун-та, 69063.
Тел.+38(066)90034 20.
E.mail: AndreyShiyka@gmail.com