

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1078-1086

ELECTROMAGNETIC TORQUE CONTROL OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH THE MAXIMUM POWER FACTOR

V. F. Samoseiko¹, V. O. Guskov²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Electrosila Plant — branch of JSC “Power machines”,
St. Petersburg, Russian Federation

An algorithm that allows you to control the electromagnetic torque of an induction motor with a maximum power factor is described in the paper. The problem of maximizing the power factor at a given value of the electromagnetic torque is solved using the method of indefinite Lagrange multipliers. The basis for the construction of the control algorithm is a modified vector control, which has a direct-axis current control loop and a quadrature-axis current control loop. An algorithm for the setting actions formation for the control loops of direct-axis and quadrature-axis currents, taking into account the saturation of the magnetic circuit of the induction motor, as well as the limitation on the relative value of the stator current modulus, is determined. The dependences of the setting actions for the control loops of direct-axis and quadrature-axis the currents, as well as the power factor on the electromagnetic torque are found. Computer simulation of the proposed control algorithm has been carried out, as a result of which graphs of transient processes and the dependences of the power factor on the electromagnetic torque, which verify the theoretical calculations, are obtained. Maximizing the power factor improves the energy efficiency of controlling the induction motor and electric drive in general. The presented control algorithm contributes to reduce losses not only in the asynchronous motor, but also in the power electrical part, including the electronic key converter. The proposed control algorithm can be applied to the control systems that contain control loops for direct-axis and quadrature-axis currents. The operation of the asynchronous motor with the maximum power factor contributes to following the global trends in reducing resource consumption and energy efficiency. The energy-efficient drive meets the requirements that apply to drives of the various ships and objects of the sea and river transport.

Keywords: asynchronous motor, power factor, vector control, direct-axis current, quadrature-axis current, Lagrange multipliers.

For citation:

Samoseiko, Veniamin F., and Vladimir O. Guskov. “Electromagnetic torque control of the asynchronous motor with the maximum power factor.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1078–1086. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1078-1086.

УДК 621.3.072.6

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАКСИМАЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ МОЩНОСТИ

В. Ф. Самосейко¹, В. О. Гуськов²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Завод «Электросила» — филиал АО «Силовые машины»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе изложен алгоритм, позволяющий осуществлять управление электромагнитным моментом асинхронного двигателя с максимальным коэффициентом мощности. Задача максимизации коэффициен-

та мощности при заданном значении электромагнитного момента решена при помощи метода неопределенных множителей Лагранжа. В основе построения алгоритма управления заложено модифицированное векторное управление, в котором имеется контур управления током намагничивания и контур управления током нагрузки. Определен алгоритм формирования задающих воздействий для контуров управления токами намагничивания и нагрузки, учитывающий насыщение магнитопровода асинхронного двигателя, а также ограничение на относительное значение модуля тока статора. Найдены зависимости задающих воздействий для контуров управления токами намагничивания и нагрузки, а также коэффициента мощности от электромагнитного момента. Выполнено компьютерное моделирование предложенного алгоритма управления, в результате чего получены графики переходных процессов и зависимости коэффициента мощности от электромагнитного момента, верифицирующие теоретические выкладки. Максимизация коэффициента мощности позволяет повысить энергоэффективность управления асинхронным двигателем и электроприводом в целом. Представленный алгоритм управления способствует снижению потерь не только асинхронного двигателя, но и силовой электрической части, включая электронно-ключевой преобразователь. Предложенный алгоритм управления может быть применен к системам управления, которые содержат контуры управления токами намагничивания и нагрузки. Работа асинхронного двигателя с максимальным коэффициентом мощности соответствует мировым тенденциям, направленным на снижение потребления ресурсов и энергоэффективности. Предложенный энергоэффективный алгоритм векторного управления электромагнитным моментом может быть применен в системах движения различных судов и на объектах водного транспорта.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, коэффициент мощности, векторное управление, ток намагничивания, ток нагрузки, множители Лагранжа.

Для цитирования:

Самосейко В. Ф. Управление электромагнитным моментом асинхронного двигателя с максимальным коэффициентом мощности / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1078–1086. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1078-1086.

Введение (Introduction)

Создание векторного управления является важнейшим событием в области управления асинхронным электродвигателем [1]. Преимуществами конструкции асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [2] являются дешевизна производства, высокая надежность, отсутствие скользящих контактов, легкость в обслуживании, прямой пуск и т. д. При этом конструкция ротора не позволяет проводить наблюдение за токами, протекающими в его обмотке, что затрудняет его качественное управление. Регулировочные характеристики асинхронного двигателя уступают характеристикам двигателя постоянного тока. Векторное управление позволило решить эту проблему для асинхронных двигателей при помощи высокой точности регулирования выходных координат. С такими регулировочными характеристиками асинхронный электропривод получил использование в ответственных узлах всевозможных машин и устройств на различных производствах и объектах.

Широкое распространение асинхронный привод имеет на объектах речного и морского транспорта. Тенденция развития и совершенствования судовых энергетических систем способствует внедрению асинхронного привода не только в узлы вспомогательных систем судов, но и позволяет его использовать в системах движения судов в качестве гребных установок. При проектировании и построении таких установок особое внимание уделяется вопросу *экономию ресурсов и энергоэффективности* [2]. Основные потери мощности возникают в силовой части электропривода, в состав которой входит асинхронный двигатель.

Существует множество алгоритмов управления асинхронным двигателем, способствующих его энергоэффективной работе. Построению таких алгоритмов посвящено большое количество отечественных [3]–[5] и зарубежных работ [6]–[8]. Задачу повышения энергоэффективности можно рассматривать и решать с помощью различных методов и вариантов в зависимости от критериев и параметров измерения энергоэффективности.

Данная работа посвящена повышению энергоэффективности асинхронного двигателя путем максимизации коэффициента мощности. Организация работы асинхронного двигателя с максимально высоким коэффициентом мощности является важной задачей [9]. Асинхронный двигатель,

работающий от сети переменного тока, потребляет электроэнергию, имеющую две составляющие: активную и реактивную. Выполнение полезной работы осуществляется благодаря активной составляющей электроэнергии. Реактивная [10] составляющая расходуется на создание магнитного потока, не выполняя никакой полезной работы, а вызывая лишь дополнительные потери и нагрев как непосредственно в самом двигателе, так и в энергосистеме. Реализация управления с единичным коэффициентом мощности позволяет минимизировать потери энергии в преобразователе электрической энергии, питающим его статорные обмотки.

Методы и материалы (Methods and materials)

Качественное управление асинхронным двигателем предполагает наличие его математической модели. Математическая модель асинхронного двигателя строится на основе известных законов (Киргкофа, Ньютона и т. д.). Изложенный в статье алгоритм энергоэффективного управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя построен на базе модифицированного векторного управления, описанного в работе [11], в которой выполнено математическое описание асинхронного двигателя, приведены уравнения, по которым производится синтез контуров управления токами намагничивания i_d и нагрузки i_q :

$$\begin{aligned} u_d^* &= R_1^* \cdot i_d^* - \omega_1^* \cdot L_q^* \cdot i_q^* + L_q^* \cdot p i_d^* ; \\ u_q^* &= R_1^* \cdot i_q^* + \omega_1^* \cdot L_d^* \cdot i_d^* + L_q^* \cdot p i_q^* , \end{aligned} \quad (1)$$

В данной статье предложен алгоритм определения задающих воздействий для контуров токов намагничивания i_d и нагрузки i_q , обеспечивающий работу асинхронного двигателя с максимальным коэффициентом мощности. Для удобства выполнения расчетов и анализа результатов в статье используются относительные единицы, помеченные верхним символом *.

Метод управления электромагнитным моментом АД с максимальным коэффициентом мощности. Современная силовая электроника позволяет синтезировать необходимые параметры напряжения для управления электрическими машинами. Частота модуляции существенно превышает постоянные времени электрических машин, поэтому синтезированные преобразователем напряжения могут рассматриваться как идеальные. В этом случае основное внимание сосредоточено на решении проблемы управления электрической машиной путем воздействия на идеализированные управляемые напряжения, подводимые к ее обмоткам. Следовательно, при создании систем управления электрическими машинами, логично полагать, что к ним прикладывается система симметричных синусоидальных m -фазных напряжений с регулируемыми параметрами.

Основным назначением электрического двигателя является формирование заданного значения электромагнитного момента, связывающего электромагнитные и механические процессы. Данные процессы определяют преобразование электрической энергии в механическую и обратно. Электромагнитный момент является функцией токов намагничивания и нагрузки. Таким образом, управление токами намагничивания и нагрузки необходимо выстраивать так, чтобы обеспечить заданное значение электромагнитного момента, имея при этом максимум коэффициента мощности.

Реализация энергоэффективного управления. Коэффициент мощности в относительных единицах записывается в следующем виде:

$$\cos(\varphi) \approx \frac{\omega^* \cdot M^*}{u_a^* \cdot i_a^*} \approx \frac{(L_d^* - L_q^*) \cdot i_d^* \cdot i_q^*}{\sqrt{L_d^{*2} \cdot i_d^{*2} + L_q^{*2} \cdot i_q^{*2}} \cdot \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}}} , \quad (2)$$

где $u_a^* = \sqrt{u_d^{*2} + u_q^{*2}}$ — относительное значение модуля вектора напряжения; $i_a^* = \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}}$ — относительное значение модуля вектора тока; L_d^* — полная индуктивность; L_q^* — индуктивность короткого замыкания.

Знак приближения в выражении (1) обусловлен тем, что не учитываются сопротивления R_d^* и R_q^* , так как их величины незначительны.

Далее находится зависимость токов намагничивания и нагрузки, при которой достигается максимум коэффициента мощности (2) при заданном электромагнитном моменте M_3 . Электромагнитный момент зависит от токов намагничивания и нагрузки:

$$M^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot i_d^* \cdot i_q^* \quad (3)$$

Предполагается, что на электромагнитный момент наложено следующее ограничение:

$$M^* - M_3^* = 0 \quad (4)$$

Решение задачи оптимального управления с максимальным коэффициентом мощности. Решение данной задачи (1) при ограничении (3) находится методом неопределенных множителей Лагранжа [12]. Функция Лагранжа записывается следующим образом:

$$LG(i_d^*, i_q^*, \lambda) = \cos(\varphi) + \lambda \cdot (M^* - M_3^*), \quad (5)$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа.

Уравнения Лагранжа в процессе поиска максимального коэффициента мощности запишутся в следующем виде:

$$\frac{\partial LG(i_d^*, i_q^*, \lambda)}{\partial i_d^*} = 0; \quad \frac{\partial LG(i_d^*, i_q^*, \lambda)}{\partial i_q^*} = 0; \quad \frac{\partial LG(i_d^*, i_q^*, \lambda)}{\partial \lambda} = 0. \quad (6)$$

Решение системы позволяет найти ток нагрузки и намагничивания, которые обеспечивают управление с максимальным коэффициентом мощности:

$$i_d^* = \sqrt{A \cdot \sqrt{\frac{L_q^*}{L_d^*}}}; \quad i_q^* = \sqrt{A \cdot \sqrt{\frac{L_d^*}{L_q^*}}}, \quad (7)$$

где $A = \frac{|M_3^*|}{L_d^* - L_q^*}$.

Максимальное значение коэффициента мощности определится выражением

$$\cos(\varphi) \approx \frac{1 - \xi}{1 + \xi} \quad (8)$$

Задающие воздействия на контуры управления током намагничивания a_{d1} и нагрузки a_{q1} , в соответствии в формулой (6), определяются выражением

$$a_{d1} = \sqrt{A \cdot \sqrt{\frac{L_q^*}{L_d^*}}}; \quad a_{q1} = \sqrt{A \cdot \sqrt{\frac{L_d^*}{L_q^*}}} \quad (9)$$

при задающем значении электромагнитного момента

$$M_{31}^* = \frac{\sqrt{L_d^* \cdot L_q^*} \cdot (L_d^* - L_q^*)}{L_d^* + L_q^*} \quad (10)$$

Модуль относительного тока i_a^* достигает значения «1». В данном случае для обеспечения длительного режима работы целесообразно увеличивать ток намагничивания и уменьшать ток нагрузки так, чтобы выполнялось равенство $i_a^* = 1$ и обеспечивалось равенство (4). В этом случае задающие воздействия на контуры управления токами намагничивания a_{d2} и нагрузки a_{q2} находятся из уравнений:

$$i_a^* = \sqrt{a_{d2}^{2*} + a_{q2}^{2*}} = 1;$$

$$M_3^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot a_{d2}^* \cdot a_{q2}^* \quad (11)$$

Решение этих уравнений относительно задающих воздействий на контуры управления токами намагничивания и нагрузки запишется в следующем виде:

$$a_{d2}^* = \frac{\sqrt{2} \cdot A}{\sqrt{1 + \sqrt{1 - 4 \cdot A^2}}}; \quad a_{q2}^* = \frac{\sqrt{1 + \sqrt{1 - A^2}}}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

при задающем значении электромагнитного момента

$$M_{32}^* = \frac{1 - L_q^{*2}}{L_d^* + L_q^*} \cdot \sqrt{L_d^*} \quad (13)$$

Ток намагничивания достигает номинального значения, превышение которого ведет к магнитному насыщению магнитопровода асинхронного двигателя [13]. Работа асинхронного двигателя в режиме насыщения не рациональна, так как в этом режиме появляются дополнительные потери и нагрев. При работе асинхронного двигателя ток намагничивания не должен превышать своего номинального значения. В данном случае задающие воздействия на контур управления током намагничивания описываются в виде

$$a_{d3}^* = \sqrt{\frac{1 - L_q^{*2}}{L_d^{*2} - L_q^{*2}}} \quad (14)$$

При этом задающие воздействия на контур управления током нагрузки a_{d3} находятся из уравнения:

$$M_3^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot a_{d3}^* \cdot a_{q3}^* \quad (15)$$

Из выражения (14) следует, что задающие воздействия на контур управления током нагрузки

$$a_{q3}^* = A \sqrt{\frac{L_d^{*2} - L_q^{*2}}{1 - L_q^{*2}}} \quad (16)$$

С использованием полученных выражений (9), (12), (14) и (16) общая формула для определения задающих воздействий на контуры управления токами намагничивания и нагрузки запишется в следующем виде:

$$a_{d3}^* = \min(\max(a_{d1}^*, a_{d2}^*), a_{d3}^*); \quad a_{q3}^* = \text{sign}(M_3^*) \cdot \max(\min(a_{q1}^*, a_{q2}^*), a_{q3}^*) \quad (17)$$

Структурная схема, соответствующая уравнениям (15), приведена на рис. 1.

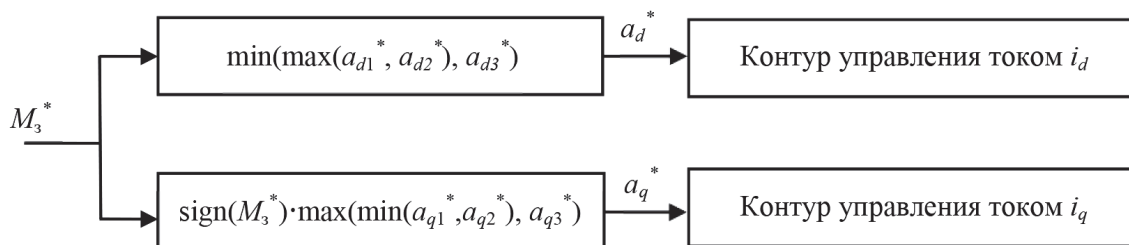


Рис. 1. Структурная схема вычисления сигналов задания для контуров тока намагничивания и нагрузки

Графики зависимости задающих воздействий на контуры управления токами намагничивания и нагрузки, а также коэффициента мощности от электромагнитного момента приведены на рис. 2. Графики построены для асинхронного двигателя, у которого относительная продольная индуктивность $L_d^* = 2,606$, а относительная индуктивность короткого замыкания $L_q^* = 0,132$.

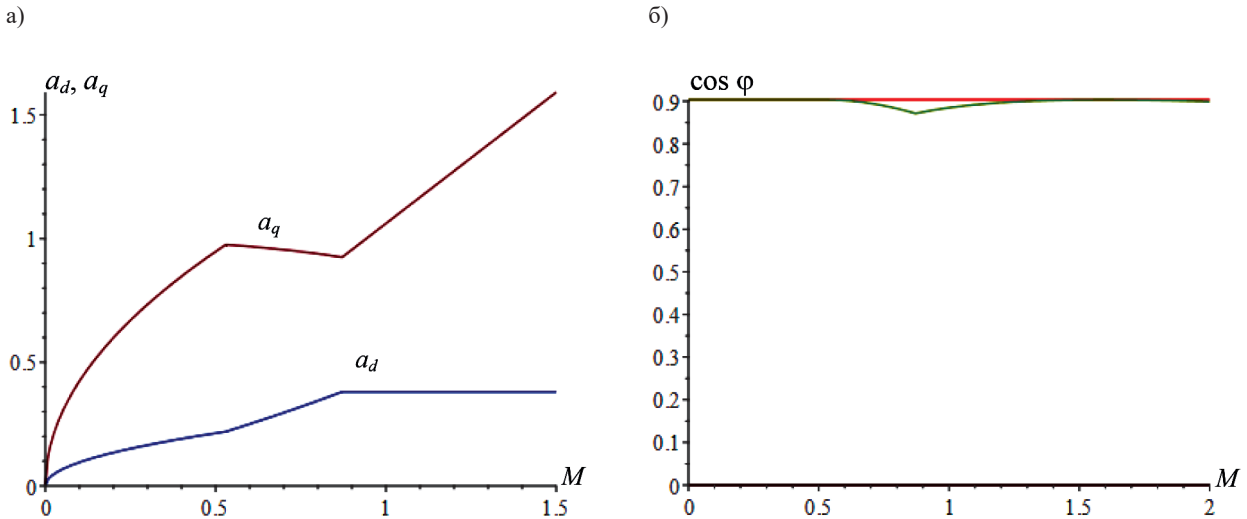


Рис. 2. Графики зависимости от электромагнитного момента:
 а — задающих воздействий на контуры управления токами намагничивания;
 б — коэффициента мощности

Коэффициент мощности при предложенном управлении рассчитывается по формуле (2), в которой относительные значения токов i_d^* и i_q^* следует поменять на задающие воздействия для контуров управления токами намагничивания и нагрузки, определенные выражениями (17). График зависимости коэффициента мощности от электромагнитного момента приведен на рис. 2, б, откуда следует, что коэффициент мощности в широком диапазоне изменения электромагнитного момента остается близким к максимальному значению (красная линия), определенному выражением (8).

Верификация теоретических выкладок произведена посредством моделирования системы управления. Результаты моделирования приведены на рис. 3 и 4.

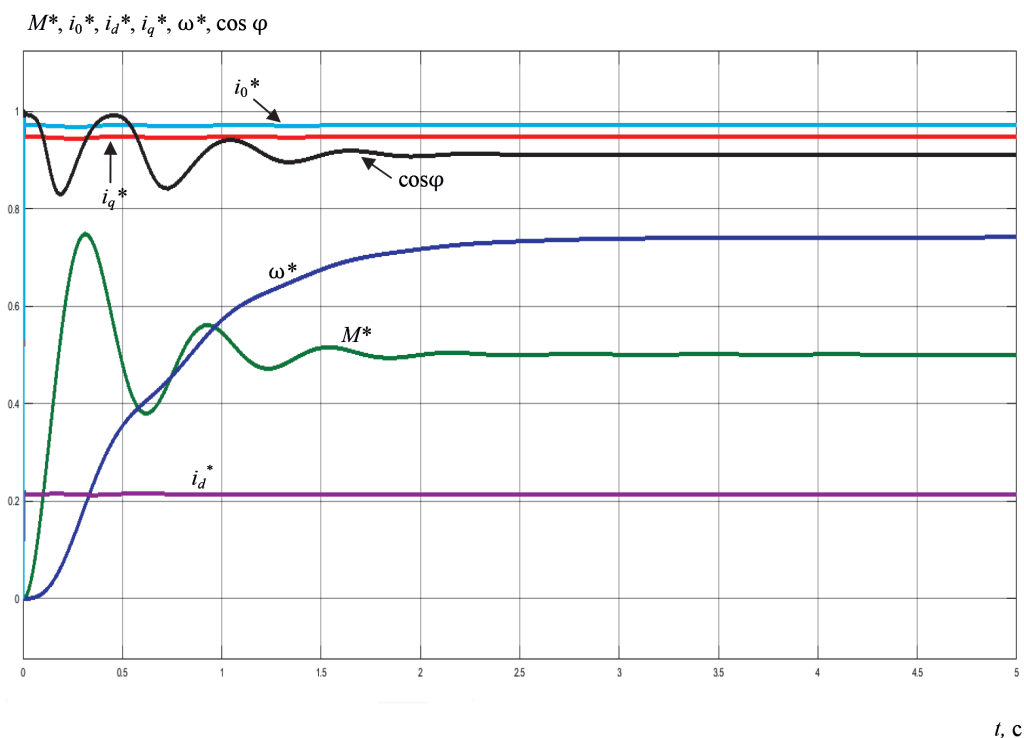


Рис. 3. Результаты моделирования переходных процессов при управлении с максимальным $\cos \varphi$ (двигательный режим)

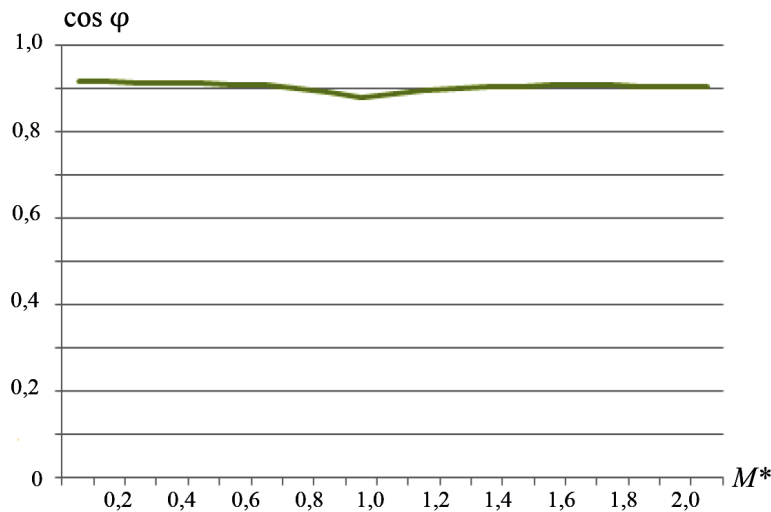


Рис. 4. График зависимости коэффициента мощности от электромагнитного момента, полученный в результате моделирования

Моделирование выполнялось в программе Simulink [14]. При моделировании значение заданного момента: $M_3^* = 0,5$ нагрузка соответствовала вентиляторной.

Заключение (Conclusion)

Представленный алгоритм управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя позволяет добиться работы асинхронного двигателя с высоким коэффициентом мощности в широком диапазоне изменения электромагнитного момента. Работа асинхронного двигателя с максимальным коэффициентом мощности повышает энергоэффективность асинхронного двигателя и всего электропривода в целом благодаря снижению потерь в силовой электрической части, включая электронно-ключевой преобразователь.

Задания для контуров токов намагничивания и нагрузки строятся, исходя из следующих ограничений:

- асинхронный двигатель не должен работать в режиме насыщения;
- значение модуля тока статора не должно превышать заданного ограничения.

При значениях электромагнитного момента, близких к номинальному и выше, алгоритм управления формирует задания для контуров токов намагничивания и нагрузки аналогично заданиям системы управления электромагнитным моментом асинхронного электродвигателя при постоянном намагничивании магнитопровода.

Верификация предложенного алгоритма управления, выполненная методом компьютерного моделирования, подтвердила его работоспособность и эффективность.

Представленный алгоритм управления применим к системам управления асинхронным двигателем, в которых созданы контуры управления токами намагничивания и нагрузки. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что данный тип управления может заменить управление с постоянным током намагничивания.

Предложенная система управления может быть использована в электроприводах различных технологических процессов (например, в гребных установках различных судов), а также на объектах морского и речного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. — Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2008. — 298 с.

2. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
3. Гарганеев А. Г. Энергосберегающая модификация векторного управления асинхронного двигателя / А. Г. Гарганеев [и др.]. // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 130–134.
4. Мещеряков В. Н. Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода с векторным управлением за счет регулирования продольной составляющей тока статора при неполной статической нагрузке / В. Н. Мещеряков, В. В. Данилов // Электротехнические системы и комплексы. — 2018. — № 3 (40). — С. 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11.
5. Васильев Д. А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д. А. Васильев [и др.] // Вестник НГИЭИ. — 2019. — № 4 (95). — С. 110–115.
6. Karlovsky P. Iron Loss Minimization Strategy for Predictive Torque Control of Induction Motor / P. Karlovsky, O. Lipcak, J. Bauer // Electronics. — 2020. — Vol. 9. — Is. 4. — Pp. 566. DOI: 10.3390/electronics9040566.
7. Abdelati R. Optimal control strategy of an induction motor for loss minimization using Pontryaguin principle / R. Abdelati, M. F. Mimouni // European Journal of Control. — 2019. — Vol. 49. — Pp. 94–106. DOI: 10.1016/j.ejcon.2019.02.004.
8. Karlovsky P. Loss Reduction in Induction Motor Drive Using Model Predictive Control / P. Karlovsky, J. Lettl // 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). — IEEE, 2018. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ECAI.2018.8679073.
9. Абдуллаев М. Повышение коэффициента мощности электроприводов переменного тока / М. Абдуллаев, У. А. Ахмадалиев // Universum: технические науки. — 2019. — № 11–3 (68). — С. 86–89.
10. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. — М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.
11. Самосейко В. Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.
12. Kalman D. Leveling with Lagrange: An alternate view of constrained optimization / D. Kalman // Mathematics Magazine. — 2009. — Vol. 82. — Is. 3. — Pp. 186–196. DOI: 10.1080/0025570X.2009.11953617.
13. Виноградов А. Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А. Б. Виноградов // Электротехника. — 2005. — № 5. — С. 57–61.
14. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.

REFERENCES

1. Vinogradov, A. B. *Elektricheskoye upravleniye elektropriwodami peremennogo toka*. Ivanovo: GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina», 2008.
2. Samoseyko, V. F. *Teoreticheskiye osnovy upravleniya elektropriwodom*. SPb.: Elmor, 2007.
3. Garganeev, A. G., A. T. Yarovoi, L. Yu. Babushkina, A. S. Karakulov, S. V. Langraf, and A. A. Rasstrigin. “Energoberegayushchaya modifikatsiya upravleniya asinkhronnogo dvigatelya.” *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 308.7 (2005): 130–134.
4. Meshcheryakov, Victor N., and Vladimir V. Danilov. “Increase of energy efficiency for induction motor with vector control by means of regulation of flux-generation component of stator current at half static load.” *Electrotechnical Systems and Complexes* 3(40) (2018): 4–11. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-4-11.
5. Vasilyev, Daniil Aleksandrovich, Larisa Anatolevna Panteleeva, Petr Nikolayevich Pokoyev, and Vitaliy Aleksandrovich Noskov. “Energy efficient asynchronous motor control.” *Bulletin NGIEI* 4(95) (2019): 110–115.
6. Karlovsky, Pavel, Ondrej Lipcak, and Jan Bauer. “Iron Loss Minimization Strategy for Predictive Torque Control of Induction Motor.” *Electronics* 9.4 (2020): 566. DOI: 10.3390/electronics9040566.
7. Abdelati, Riadh, and M. Faouzi Mimouni. “Optimal control strategy of an induction motor for loss minimization using Pontryaguin principle.” *European Journal of Control* 49 (2019): 94–106. DOI: 10.1016/j.ejcon.2019.02.004.

8. Karlovsky, Pavel, and Jiri Lettl. "Loss Reduction in Induction Motor Drive Using Model Predictive Control." *2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. IEEE, 2018. 1–4. DOI: 10.1109/ECAI.2018.8679073.

9. Abdullayev, Mukhammadsayfullo, and Utkirbek Akhmadaliyev. "Increasing power coefficient of ac electric drives." *Universum: tekhnicheskiye nauki* 11–3(68) (2019): 86–89.

10. Zhelezko, Yu. S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov*. M.: ENAS, 2009.

11. Samosejko, Veniamin F. "The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.

12. Kalman, Dan. "Leveling with Lagrange: An alternate view of constrained optimization." *Mathematics Magazine* 82.3 (2009): 186–196. DOI: 10.1080/0025570X.2009.11953617.

13. Vinogradov, A. B. "Dynamic processes simulation of frequency-controlled induction motor with regard of iron losses, saturation and skin effect." *Russian Electrical Engineering* 5 (2005): 57–61.

14. Chernykh, I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink*. M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самосейко Вениамин Францевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: samoseyko@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Гуськов Владимир Олегович —
ведущий инженер отдела проектирования
электропривода и комплектных устройств
Завод «Электросила» —
филиал АО «Силовые машины»
196105, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московский пр., 139
e-mail: vladimir_guskov@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Samoseiko, Veniamin F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: samoseyko@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Guskov, Vladimir O. —
Leading Engineer of the Design Department
of Electric Drive and Complete Devices
Electrosila Plant —
branch of JSC "Power machines"
139 Moskovskii Av., St. Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: vladimir_guskov@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2020 г.

Received: December 7, 2020.