

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788

## OPTIMAL CONTROL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR ACCORDING TO THE CRITERION OF ENERGY LOSSES

**V. F. Samosejko<sup>1</sup>, V. O. Guskov<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — Electrosila Plant — branch of PJSC “Power machines”,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The control algorithm allowing to control an electric drive with an asynchronous motor optimally according to the criterion of minimum energy losses is represented in this study. The “electromagnetic torque/energy loss” ratio is used as an indicator of energy efficiency control. The synthesis of the control system is carried out by means of the voltage equations of the asynchronous motor. In this study the equations of error currents of vector control are used that allows to come from differential equations of the 4<sup>th</sup> order describing the dynamic of electromagnetic processes of asynchronous motor to the equations of the 2<sup>nd</sup> order. Electromagnetic processes are controlled by creating two control loops for magnetizing and load currents. It is described how to adjust the modular optimum of the circuits of the magnetizing current and the load current. As a result of synthesis of electromagnetic processes, electromagnetic torque of the asynchronous motor is formed. High operation speed and robustness for the control system is provided by the use of virtual dissipation loops. Simulation and comparison of the proposed optimal control system by the criterion of energy loss with a control system at the direct magnetizing current are performed. The dependences of the energy efficiency indicator from the moment of resistance on the asynchronous motor shaft and the rotor speed of the asynchronous motor for compared control systems are identified. The comparison by the indicator of energy efficiency and the quality of dynamic process highlights the advantages of the suggested control system. Optimal control according to the criterion of energy losses allows you to control the asynchronous motor with a higher value of energy efficiency indicator, in contrast to a control system where a constant magnetizing current is maintained. The quality of the dynamic processes of the optimal control system according to the criterion of energy losses is not much inferior to the quality of the dynamic processes of the control system with direct magnetizing current.*

*Keywords: asynchronous motor, vector control, optimal control, indicator of energy efficiency, magnetizing current, load current, energy losses.*

### For citation:

Samosejko, Veniamin F., and Vladimir O. Guskov. “Optimal control of an asynchronous motor according to the criterion of energy losses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 775–788. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

**УДК 621.3.072.6**

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПО КРИТЕРИЮ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

**В. Ф. Самосейко<sup>1</sup>, В. О. Гуськов<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> — Завод «Электросила» — филиал ПАО «Силовые машины»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье предложен алгоритм управления, позволяющий осуществлять управление асинхронным двигателем оптимально по критерию минимума потерь энергии. В качестве показателя энергоэффективности*

управления используется отношение электромагнитный момент / потери мощности. Синтез системы управления осуществляется при помощи уравнений напряжения асинхронного двигателя. Применяются уравнения токов ошибок векторного управления, позволяющие перейти от дифференциальных уравнений 4-го порядка, описывающих динамику электромагнитных процессов асинхронного двигателя, к уравнениям 2-го порядка. Управление электромагнитными процессами ведется путем создания двух контуров управления токами намагничивания и нагрузки. Описана операция настройки контуров тока намагничивания и тока нагрузки на «модульный оптимум». В результате синтеза электромагнитных процессов формируется электромагнитный момент асинхронного электродвигателя. Высокое быстродействие и свойство робастности для системы управления обеспечиваются применением контуров виртуальной диссипации. Выполнено моделирование и сравнение предложенной оптимальной системы управления по критерию потерь энергии с системой управления при постоянном токе намагничивания. Выявлены зависимости показателя энергоэффективности от момента сопротивления на валу асинхронного двигателя и скорости вращения ротора асинхронного двигателя для сопоставляемых систем управления. Сравнение по показателю энергоэффективности и качеству динамических процессов выделяет преимущества предложенной системы управления над системой управления при постоянном токе намагничивания. Оптимальное управление по критерию потерь энергии позволяет управлять асинхронным двигателем с более высоким значением показателя энергоэффективности в отличие от системы управления, в которой поддерживается постоянство тока намагничивания. Качество динамических переходных процессов оптимальной системы управления по критерию потерь энергии ненамного уступает качеству динамических процессов системы управления с постоянным током намагничивания.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное управление, оптимальное управление, показатель энергоэффективности, ток намагничивания, ток нагрузки, потери энергии.

**Для цитирования:**

Самосейко В. Ф. Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 775–788. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-775-788.

## Введение (Introduction)

Асинхронный двигатель является одной из наиболее распространенных электрических машин в мире, занимая лидирующее место по установленной мощности, намного опережая остальные типы электродвигателей. Широкое распространение он получил благодаря простоте конструкции и изготовления, высокой надежности эксплуатации, сравнительно низкой себестоимости и широкому спектру применения.

Асинхронный электропривод успешно эксплуатируется на объектах водного транспорта в системах движения различных судов и т. д. К электроприводам, эксплуатируемым на таких объектах, предъявляются строгие требования, среди которых важное место занимают *экономичность* и *энергоэффективность*. В электроприводе потери существуют в преобразователях электрической и механической энергии, а также в электромеханических преобразователях. В электрических преобразователях в основном имеются электрические потери, потери на гистерезис, потери в полупроводниковых приборах и т. д. В механических преобразователях потери возникают при преодолении сил сопротивления движению. В электромеханических преобразователях имеют место потери, присущие и электрическим, и механическим преобразователям. Повышения энергоэффективности добиваются с помощью использования современных материалов и технологий.

Данная работа посвящена повышению энергоэффективности при управлении асинхронным двигателем. Наиболее энергоэффективным и оптимальным способом управления [1] асинхронным электродвигателем является *частотное регулирование*, ставшее возможным благодаря созданию инверторов и преобразователей частоты на базе IGBT. Частотное регулирование, в свою очередь, делится на *скалярное* [2] и *векторное управление* [3].

Существует ряд отечественных работ, посвященных энергоэффективному управлению асинхронным электродвигателем, в которых рассмотрены алгоритмы управления, позволяющие минимизировать электрические и магнитные потери. Критериями энергоэффективности могут служить отношения: «ток статора / электромагнитный момент» [4]–[6], «электромагнитный мо-

мент / электрические потери» [1] или, к примеру, КПД [7], [8]. В работах [9]–[11] исследованы вопросы скалярного управления. Так, в работе [11] энергоэффективность оценивается с помощью специального коэффициента, выведенного из схемы замещения [12], который помимо активных потерь учитывает потребление реактивной мощности, в работах [13], [14] рассмотрено энергоэффективное управление в системе прямого управления моментом. Помимо работ отечественных ученых, существует большое количество зарубежных исследований, посвященных вопросам энергоэффективного управления [15]–[17].

Наибольшим потенциалом для создания энергоэффективного управления обладает векторное управление и его разновидности. В данной статье предложен алгоритм управления, позволяющий реализовать оптимальное векторное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии. Исходя из того, что электродвигатель служит для создания вращающего момента, в работе за показатель энергоэффективности принято отношение «электромагнитный момент / потери мощности». Знаменатель выбранного отношения состоит из электрических и магнитных потерь мощности.

### Методы и материалы (Methods Materials)

Модель оптимального по критерию потерь энергии алгоритма управления асинхронным двигателем построена на основе модифицированного векторного управления, описанного в статье [18].

*Уравнения напряжений асинхронного электродвигателя.* На обмотки статора подается напряжение  $U_s$ , при этом по статору начинают протекать токи  $I_s$  и  $I_r$ . Векторы  $U_s$ ,  $I_s$  и  $I_r$  являются периодическими функциями времени. Угловая частота токов статора  $\omega_1$  и токов ротора  $\omega_2$  имеет связь в виде разности:  $\omega_1 - \omega_2 = \omega$ , где  $\omega$  — угловая электрическая скорость вращения ротора. На основании законов Кирхгофа, уравнения напряжений в матричной форме принимают вид [1]:

$$\begin{aligned} U_s &= R_s \cdot I_s + L_s \cdot pI_s + L_{ss} \cdot pI_s + L_{sr} \cdot pI_r; \\ 0 &= R_r \cdot I_r + L_r \cdot pI_r + pL_{rr} \cdot pI_r + L_{rs} \cdot pI_s, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I_s$ ,  $I_r$  — соответственно вектора токов статора и ротора;  $R_s$ ,  $R_r$  — активные сопротивления обмоток статора и ротора;  $L_{ss}$ ,  $L_{rr}$  — матрицы индуктивностей обмоток статора и ротора;  $L_{sr}$  и  $L_{rs}^T$  — соответственно матрицы взаимной индуктивности обмоток статора и ротора;  $p$  — оператор дифференцирования по времени.

Осуществление синтеза системы управления невозможно в случаях, когда дифференциальные уравнения имеют периодические коэффициенты. Для получения возможности осуществления синтеза используется преобразование Горева – Парка, трансформирующее периодические коэффициенты в постоянные. Результатом замены переменных в уравнениях (1) является в данном случае переход к уравнениям с постоянными коэффициентами во вращающейся системе координат  $d-q$ . Угловая скорость вращения новой системы координат равна  $\omega_1$ :

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot I_1 + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot E \cdot I_1 + L_{01} \cdot pI_1 + \omega_1 \cdot L_0 \cdot E \cdot I_2 + L_0 \cdot pI_2; \\ 0 &= R_2 \cdot I_2 + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot E \cdot I_2 + L_{02} \cdot pI_2 + \omega_2 \cdot L_0 \cdot E \cdot I_1 + L_0 \cdot pI_1. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_{01} = L_0 + L_1$  и  $L_{02} = L_0 + L_2$  — полные индуктивности обмоток статора и ротора;  $R_1 = R_s$ ;  $R_2 = R_r$ ;  $L_0$  — основная индуктивность;  $L_1 = L_s$ ;  $L_2 = L_r$ ;  $E$  — матрица поворота на угол  $\pi/2$ .

В данной системе координат напряжения и токи оказываются непериодическими функциями, а в установившихся режимах работы — константами.

Динамику электромагнитных процессов в осях  $d-q$ , представленную уравнениями (2), в развернутом виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} u_d &= R_1 \cdot i_d - L_{01} \cdot (\omega_1 \cdot i_q - p i_d) - L_0 \cdot (\omega_1 \cdot j_q - p j_d); \\ u_q &= R_1 \cdot i_q + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_d + L_{02} \cdot p i_q + L_0 \cdot (\omega_1 \cdot j_d + p j_q); \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - L_{02} \cdot (\omega_2 \cdot j_q - p j_d) - L_0 \cdot (\omega_2 \cdot i_q - p i_d);$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q + L_{02} \cdot p j_d - L_0 \cdot (\omega_2 \cdot i_q - p i_d), \quad (4)$$

где  $i_d$  и  $i_q$  — элементы вектора  $\mathbf{I}_1$  токов статора;  $j_d$  и  $j_q$  — элементы вектора  $\mathbf{I}_2$  токов ротора.

Параметры асинхронного электродвигателя целесообразно записывать в относительных единицах, помечая их символом\*.

*Электромагнитный момент асинхронной машины.* В обмотках статора и ротора запасена электромагнитная энергия, которая определяется по формуле

$$W(\gamma) = 0,5 \cdot \mathbf{I}_S^T \cdot \mathbf{L}_{SS} \cdot \mathbf{I}_S + \mathbf{I}_S^T \cdot \mathbf{L}_{SR}(\gamma) \cdot \mathbf{I}_R + 0,5 \cdot \mathbf{I}_R^T \cdot \mathbf{L}_{RR} \cdot \mathbf{I}_R. \quad (5)$$

Электромагнитный момент асинхронной машины в естественной системе координат [1] представим в виде:

$$M = p_n \cdot \frac{\partial W(\gamma)}{\partial \gamma} = p_n \cdot \mathbf{I}_S^T \cdot \frac{\partial \mathbf{L}_{SR}(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot \mathbf{I}_R = p_n \cdot \mathbf{I}_R^T \cdot \frac{\partial \mathbf{L}_{RS}(\gamma)}{\partial \gamma} \cdot \mathbf{I}_S. \quad (6)$$

Электромагнитный момент можно выразить посредством векторов токов статора и ротора, определенных в системе координат  $d$ - $q$ :

$$M = 0,5 \cdot p_n \cdot m \cdot \mathbf{I}_1^T \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_2. \quad (7)$$

В развернутом виде можно представить электромагнитный момент используя элементы векторов токов статора и ротора:

$$M^* = L_0^* \cdot i_d^* \cdot j_q^* - L_0^* \cdot i_q^* \cdot j_d^*. \quad (8)$$

*Уравнение движения ротора.* Механические процессы в асинхронной машине описываются с помощью уравнения движения ротора асинхронного двигателя. Данное уравнение записано в относительных единицах и представлено в виде следующей формулы:

$$T_m \cdot p \omega^* = M^* - M_c^*, \quad (9)$$

где  $T_m$  — механическая постоянная времени;  $\omega^* = \Omega / \Omega_0$  — относительная угловая скорость вращения ротора;  $M^*$  — относительный электромагнитный момент;  $M_c^*$  — относительный момент сопротивления движению.

Датчики тока позволяют системе управления получать информацию о токах, протекающих в статоре. Замкнутая обмотка ротора не позволяет получить информацию о протекающих в нем токах. Поскольку данное обстоятельство затрудняет синтез системы управления, в данном случае необходима замена переменных для токов ротора:

$$j_d^* = -\frac{L_0^* \cdot (i_d^* - a_d - x_d^*)}{L_{02}^*}; \quad j_q^* = -\frac{L_0^* \cdot (i_q^* - a_q - x_q^*)}{L_{02}^*}, \quad (10)$$

где  $a_d$  и  $a_q$  — константы, характеризующие намагничивание статора;  $x_d$  и  $x_q$  — достаточно малые токи, так называемые *токи ошибок векторного управления*.

Ортогональная система координат  $d$ - $q$  может быть произвольно привязана к плоскости поперечного сечения асинхронной машины, так как магнитная система асинхронной машины имеет симметрию. В данном случае ось, являющаяся продольной магнитному полю, обозначается символом  $d$ , а ось, являющаяся поперечной магнитному полю — символом  $q$ . Токи  $i_d$  и  $i_q$  представляют собой проекции тока статора на оси системы координат  $d$ - $q$ . Ток  $i_d$  называется *током намагничивания*, ток  $i_q$  — *током нагрузки*. Константа  $a_q$ , характеризующая ток намагничивания по оси  $q$ , равна нулю. Следовательно, принимается  $a_d = i_d^*$ . В результате при замене переменных (10) в уравнениях (3) и (4) получается новая система  $A$  дифференциальных уравнений, в которой переменными состояниями являются токи намагничивания и нагрузки, а также токи ошибок векторного управления:  $x_d$  и  $x_q$ .

*Уравнения ошибок векторного управления.* Уравнения напряжений системы дифференциальных уравнений  $A$  для относительных токов ошибок векторного управления имеют следующий вид:

$$T_{02}^* \cdot p x_d^* = i_d^* - a_d - x_d^* + \omega_2^* \cdot T_{02}^* \cdot x_q^*;$$

$$T_{02}^* \cdot p x_q^* = i_q^* - x_q^* - \omega_2^* \cdot T_{02}^* \cdot (a_d - x_d^*), \quad (11)$$

где  $T_{02}^* = L_{02}^* / R_2^*$  — относительная постоянная времени затухания токов ошибок;  $R_2^*$  — относительное сопротивление ротора;  $\omega_2^*$  — относительная частота токов ротора.

Приняв в уравнениях (11)  $x_d^* = x_q^* = 0$ , получим два алгебраических уравнения:

$$i_d^* = a_d; \quad \omega_2^* = \frac{1}{L_{02}^* / R_2^*} \cdot \frac{i_q^*}{i_d^*} = \frac{1}{T_{02}^*} \cdot \tan(\theta_l), \quad (12)$$

где  $\tan(\theta_l) = i_q^* / i_d^*$  — тангенс угла токовой нагрузки.

При условии выполнения равенств (12) и условий  $a_q = 0$  и  $a_d = i_d^*$  в статическом режиме обеспечивается выполнение равенств  $x_d^* = x_q^* = 0$ . Из соотношений (10) можно сделать вывод, что токи ротора асинхронной машины при  $x_d^* = x_q^* = 0$  принимают следующие значения:

$$j_d^* = 0; \quad j_q^* = -\frac{L_0^*}{L_{02}^*} \cdot i_q^*. \quad (13)$$

При использовании в расчете равенств (12) уравнения ошибок векторного управления записываются в следующем виде:

$$T_{02}^* \cdot p x_d^* + x_d^* - x_q^* \cdot \tan(\theta_l) = 0;$$

$$T_{02}^* \cdot p x_q^* + x_q^* + x_d^* \cdot \tan(\theta_l) = 0. \quad (14)$$

Корни характеристического уравнения для системы дифференциальных уравнений (14) определяются при помощи выражения:

$$p_{1,2} = \frac{-1 \pm j \cdot \tan(\theta_l)}{T_{02}^*}, \quad (15)$$

где  $j$  — мнимая единица.

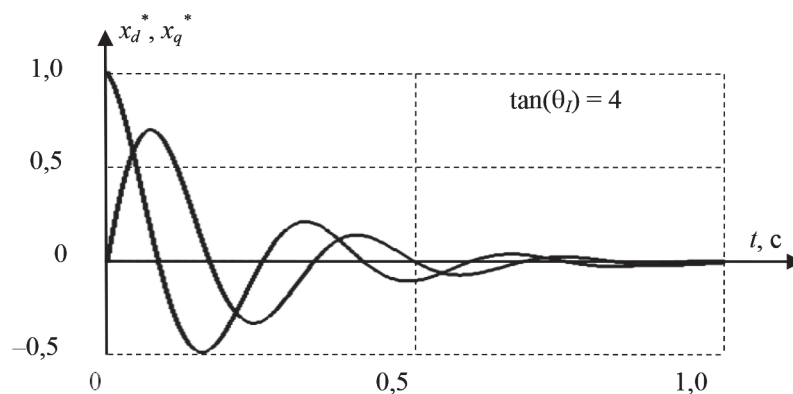


Рис. 1. Графики токов ошибок векторного управления  $x_d^*$ ,  $x_q^*$  при возмущениях

Тангенс угла токовой нагрузки  $\theta_l$  является показателем колебательности динамических процессов. Постоянная времени затухания токов ошибок управления  $T_{02}$  сопоставима с механической постоянной времени. Исходя из этого токи ошибок векторного управления представляют собой медленно изменяющиеся переменные. При выполнении условия (12) эти переменные динамически стремятся к нулю, как показано на рис. 1.

*Уравнения векторного управления.* Уравнения напряжений системы дифференциальных уравнений А для токов статора при  $x_d^* = x_q^* = 0$  примут следующий вид:

$$u_d^* = R_1^* \cdot i_d^* - \omega_1^* \cdot L_q^* \cdot i_q^* + L_q^* \cdot p i_d^*;$$



$$u_q^* = R_1^* \cdot i_q^* + \omega_1^* \cdot L_d^* \cdot i_d^* + L_q^* \cdot p i_q^*, \quad (16)$$

Устойчивость для данной системы дифференциальных уравнений достигается путем выполнения условий (12).

Угловая частота напряжения статора может быть получена через относительную частоту вращения ротора  $\omega^*$ :

$$\omega_1^* = \omega^* + \omega_2^*, \quad (17)$$

где  $\omega_2^*$  — относительная угловая частота токов ротора, определяемая из выражения (12).

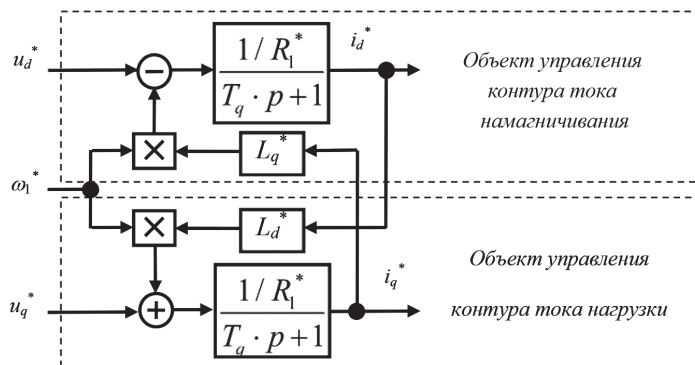


Рис. 2. Структурная схема электрической части асинхронного электродвигателя

На рис. 2 приведена структурная схема асинхронного двигателя, составленная в соответствии с уравнениями (16). Данная схема является основой для синтеза контуров управления токами намагничивания  $i_d$  и нагрузки  $i_q$ .

### Результаты (Results)

**Синтез контуров управления токами намагничивания и нагрузки.** Известно, что в асинхронном двигателе протекают динамические процессы, имеющие колебательный характер. Для улучшения качества динамических процессов асинхронного двигателя целесообразно выполнить демпфирование токов намагничивания и нагрузки. В данной работе демпфирование обеспечивается путем ввода в систему управления специальных контуров, которые выполняют виртуальную диссипацию. Применение контуров виртуальной диссипации позволяет увеличить быстродействие системы управления, при этом придавая ей свойство робастности. При выполнении синтеза регуляторов контуров управления токами намагничивания  $i_d$  и нагрузки  $i_q$  за основу были взяты уравнения (16). Синтез системы осуществляется согласно схеме, приведенной на рис. 2.

**Регуляторы тока намагничивания.** Управление током намагничивания осуществляется посредством специального контура виртуальной диссипации [18], в состав которого входит пропорциональный параллельный регулятор. Термин «параметр виртуальной диссипации», обозначаемый как  $R_x^*$ , является коэффициентом передачи пропорционального параллельного регулятора.

Выполнение условия  $R_x^* > 2 \cdot L_q^* \cdot |\omega_1^*|$  способствует изменению характера динамических процессов, которые из колебательных превращаются в апериодические. Относительное сопротивление обмоток статора намного меньше значения параметра  $R_x^*$ . Это обстоятельство заставляет объект управления трансформироваться из колебательного звена в апериодическое. Передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W = \frac{1/R_x^*}{T_q \cdot p + 1}, \quad (18)$$

где  $T_q$  — постоянная времени контура намагничивания с виртуальной диссипацией, определяемая по формуле

$$T_q = L_q^* / (\omega_1 \cdot R_x^*). \quad (19)$$

Ток нагрузки  $i_q$  будет оказывать возмущающее воздействие, что, в свою очередь, приведет к ошибкам в управлении. Астатизм управления током намагничивания достигается путем введения второго контура управления, в котором используется интегральный регулятор, имеющий следующую передаточную функцию:

$$W = \frac{R_x^*}{2 \cdot T_q \cdot p}. \quad (20)$$

Структурная схема контура управления током намагничивания приведена на рис. 3.

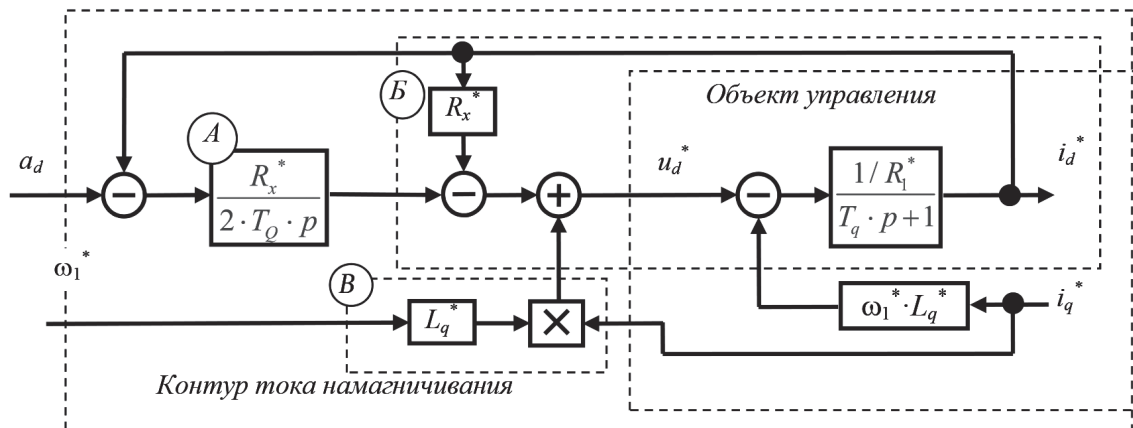


Рис. 3. Структурная схема контура управления током намагничивания асинхронного электродвигателя:

$A$  — регулятор тока намагничивания;  $B$  — контур виртуальной диссипации;

$B$  — узел компенсации влияния тока нагрузки;  $i_d^*$  — задание тока намагничивания

*Регуляторы тока нагрузки.* Схема управления током нагрузки построена на основе модели управления током намагничивания и имеет в своем составе аналогичные регуляторы и контура. Постоянная времени у интегрального регулятора тока нагрузки такая же, как у интегрального регулятора контура тока намагничивания:

$$T_q = L_q^* / (\omega_6 \cdot R_x^*). \quad (21)$$

Аналогичным также является значение параметра  $R_x^*$ . Структурная схема контура управления током нагрузки приведена на рис. 4. Контур токов намагничивания и нагрузки настроены на «модульный оптимум».

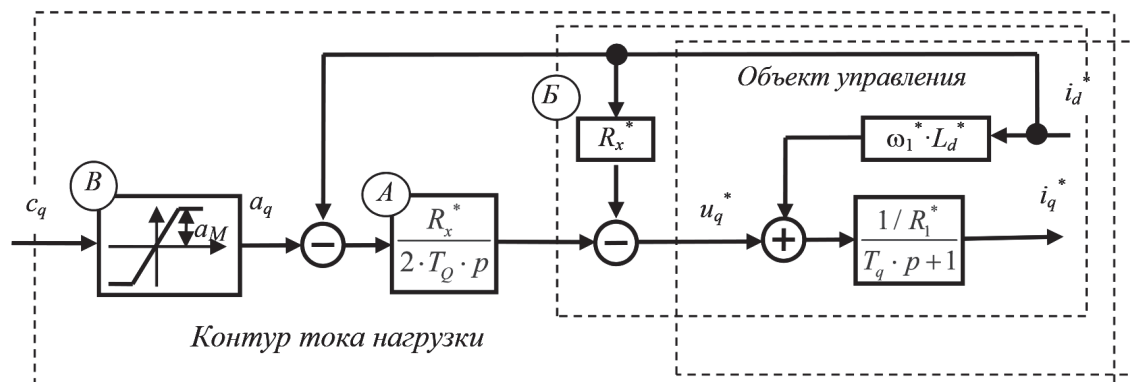


Рис. 4. Структурная схема контура управления током нагрузки

асинхронного электродвигателя:

$A$  — интегральный регулятор тока нагрузки;  $B$  — контур виртуальной диссипации;

$B$  — блок ограничения тока нагрузки;  $c_q$  — задание тока нагрузки  $i_q$

Ограничение тока нагрузки применяется в случаях, когда необходимо лимитировать электромагнитный момент или ток статора. Реализация ограничения тока нагрузки осуществляется с помощью звена «насыщение», которое представлено блоком 5 на рис. 6.

*Регуляторы скорости.* Создание контура скорости обусловлено необходимостью поддерживать скорость на уровне заданного значения. При настройке на «модульный оптимум» регулятор контура скорости будет представлять собой пропорциональное звено:

$$k_{pc} = \frac{L_{01}^* \cdot L_{02}^* \cdot T_{мех}}{L_0^{*2} \cdot 4 \cdot T_q} \approx \frac{T_{мех}}{4 \cdot T_q}. \quad (24)$$

Важным недостатком пропорционального звена является наличие статической ошибки, определяемой с помощью формулы

$$\Delta\omega^* = \frac{M_c^* \cdot 4 \cdot T_q}{T_{мех}}. \quad (25)$$

Электропривод ответственных узлов и механизмов не должен допускать возможность иметь статическую ошибку. Добиться астатизма можно путем введения интегрального регулятора. Реализовать интегральный регулятор можно во втором контуре скорости. При этом система управления будет иметь первый контур скорости, настроенный на «модульный оптимум» и являющийся объектом управления второго контура. Астатизм будет обеспечиваться благодаря интегральному регулятору второго контура скорости.

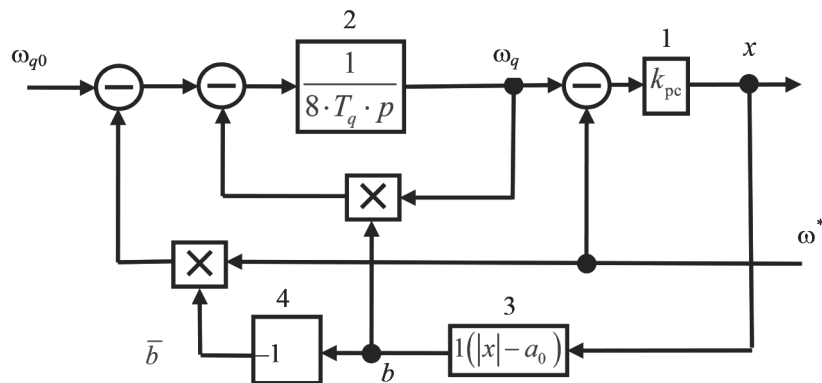


Рис. 5. Структурная схема адаптивного регулятора скорости:

- 1 — пропорциональный регулятор скорости; 2 — интегральный регулятор скорости;  
3 — звено, реализующее единичную функцию; 4 — звено, реализующее логическую инверсию

Представленная на рис. 5 схема реализации регулятора скорости обладает свойством адаптироваться [19] к режиму работы электропривода. В момент, когда система управления стабилизирует ток, регулятор скорости представляет собой пропорциональное звено 1. В момент, когда система управления стабилизирует скорость вращения ротора, схема формирует второй контур управления скоростью, который имеет в своем составе интегральный регулятор 2. Данная схема при двух разных режимах работы позволяет иметь разные регуляторы.

*Оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии.* Относительные электрические и магнитные потери мощности асинхронного электродвигателя можно представить в следующем виде:

$$\Delta P^* = R_d^* \cdot i_d^{*2} + R_q^* \cdot i_q^{*2}, \quad (26)$$

где  $R_d^* \approx R_1^* + R_0^* \cdot \omega_1^{*1.3}$  — продольное относительное сопротивление обмотки статора;

$R_0^* \approx L_d^{*2} \left( (1 - \eta_n) \cdot \left( 1 - \frac{0,03}{p_n^2} \right) - 2 \cdot R_1^* \right)$  — относительное сопротивление, характеризующее по-



тери в магнитопроводе;  $R_q^* \approx R_1^* + R_2^*$  — поперечное относительное сопротивление обмотки статора.

Относительный электромагнитный момент асинхронного двигателя напрямую связан с токами  $i_d$  и  $i_q$ :

$$M^* = L_d^* \cdot i_d^* \cdot i_q^*, \quad (27)$$

где  $L_d^* \approx L_{01}^* \approx L_{02}^*$  — относительная продольная индуктивность.

Согласно формулам (26) и (27), показатель энергетической эффективности (электромагнитный момент/ потери мощности) предстанет в следующем виде:

$$\Theta^* = \frac{M^*}{\Delta P^*} = \frac{L_d^* \cdot i_d^* \cdot i_q^*}{R_d^* \cdot i_d^{*2} + R_q^* \cdot i_q^{*2}}. \quad (28)$$

Из формулы (28) видно, что при уменьшении потерь при заданном значении электромагнитного момента увеличивается показатель энергетической эффективности. Электромагнитный момент и потери напрямую зависят от токов,  $i_d^*$  и  $i_q^*$ . Минимум выражения  $R_d^* \cdot i_d^{*2} + R_q^* \cdot i_q^{*2}$  достигается при условии

$$R_d^* \cdot i_d^{*2} = R_q^* \cdot i_q^{*2}. \quad (29)$$

Таким образом, задача управления оптимального по критерию потерь энергии сводится к определению токов намагничивания  $i_d^*$  и нагрузки  $i_q^*$  при заданном значении электромагнитного момента  $M^*$  с минимальными потерями мощности. Для достижения цели данной задачи необходимо воздействовать на ток намагничивания. Задание на ток намагничивания выражается из формулы (29) и выглядит следующим образом:

$$a_d = \sqrt{\frac{R_q^*}{R_d^*}} \cdot i_q^*. \quad (30)$$

При формировании системы управления также целесообразно ввести ограничение на ток намагничивания, — его текущее значение не должно превышать номинальное, так как это ведет к дополнительному нагреву и потерям энергии. Реализация ограничения тока намагничивания, так же, как и тока нагрузки, осуществляется с помощью звена «насыщения», представленного блоком б на рис. 6.

*Управление асинхронным двигателем при постоянном токе намагничивания.* Данный тип управления электрическими машинами является одним из наиболее распространенных, поэтому он будет противопоставлен предложенному оптимальному управлению. Принцип действия всех электрических машин основан на взаимодействии двух магнитов. В случае с асинхронным двигателем одним магнитом является статор, другим — ротор. За намагниченность машины отвечает ток намагничивания  $i_d^*$ , который имеет существенное влияние на динамику машины. Номинальный относительный ток намагничивания, обеспечивающий номинальную намагниченность машины, определяется с помощью формулы

$$i_d^* = \frac{1}{L_d^*}. \quad (31)$$

Данное значение тока намагниченности находится на изгибе кривой намагничивания. Дальнейшее увеличение тока намагничивания, как отмечалось ранее, является нерациональным и ведет к нагреву и дополнительным потерям энергии, так как машина входит в режим насыщения.

Структурная схема для управления асинхронным двигателем с постоянным номинальным намагничиванием и энергетически оптимальным управлением приведена на рис. 6, откуда видно, что разница заключается лишь в задании тока намагничивания.

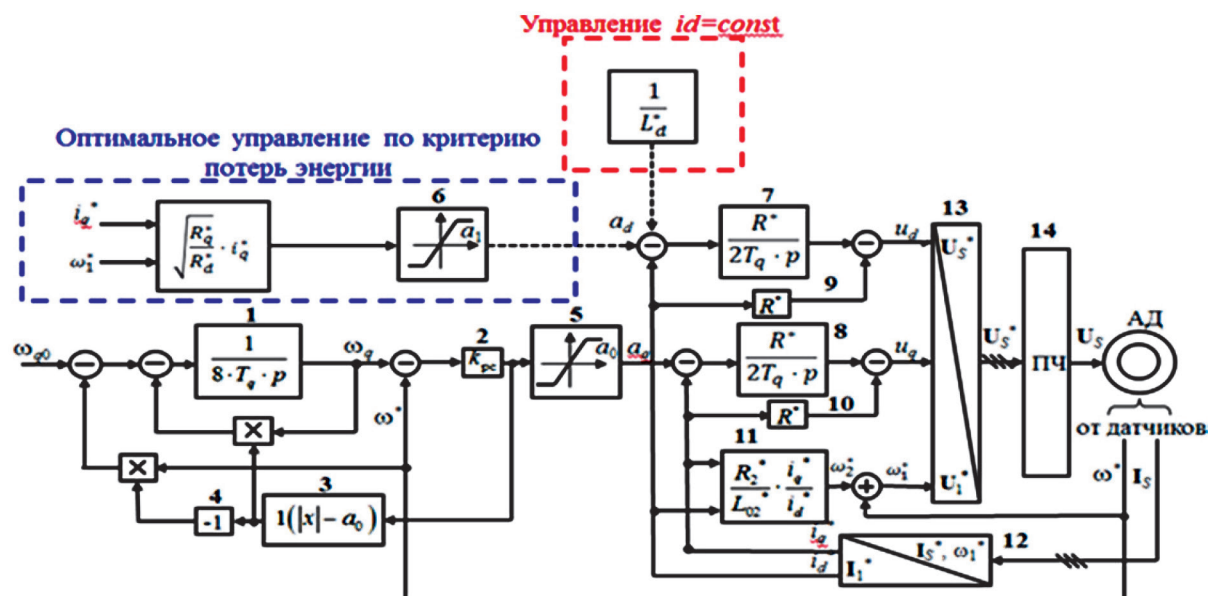


Рис. 6. Структурная схема систем управления асинхронным двигателем:  
1 — интегральный регулятор скорости; 2 — пропорциональный регулятор скорости;  
3 — звено, реализующее единичную функцию; 4 — звено, реализующее инверсию;  
5, 6 — звенья ограничения токов нагрузки и намагничивания соответственно;  
7, 8 — интегральные регуляторы контуров токов намагничивания и нагрузки соответственно;  
9, 10 — параметры виртуальной диссипации; 11 — звено определения частоты токов ротора;  
12, 13 — блоки преобразования координат токов и напряжения соответственно; 14 — преобразователь частоты

### Обсуждение (Discussion)

Результаты моделирования систем управления асинхронным двигателем представлены в виде графиков переходных процессов и приведены на рис. 7.

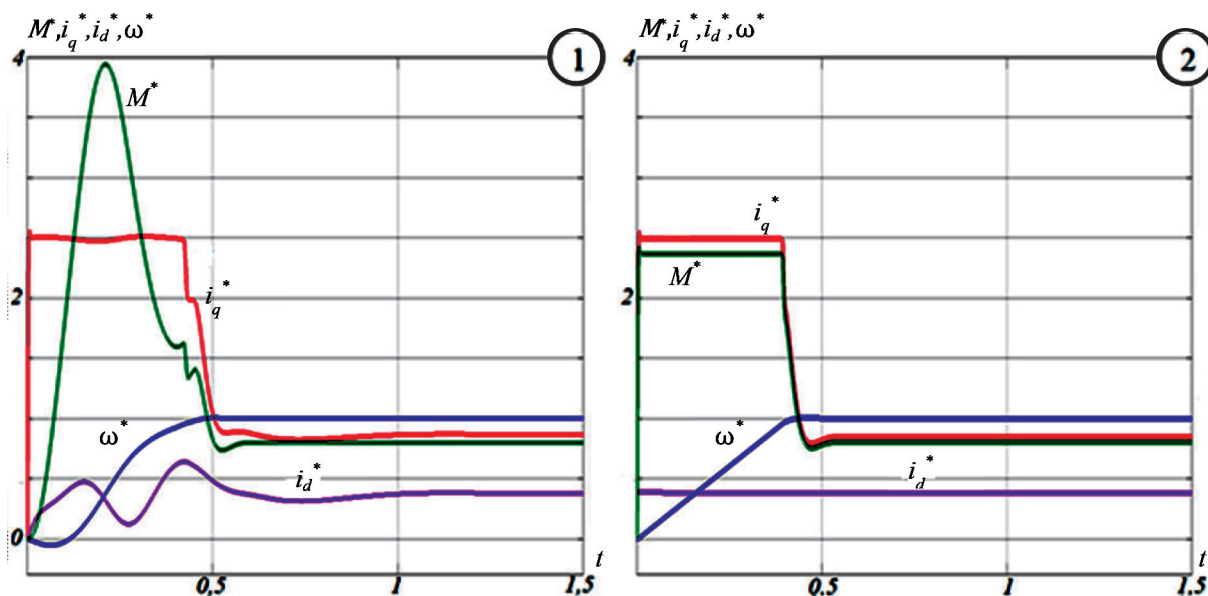


Рис. 7. Пуск асинхронного двигателя под нагрузкой  $M_c^* = 0,8 \cdot M_{ном}^*$ :

1 — оптимальное управление по критерию потерь энергии;

2 — управление при постоянном токе намагничивания

Графики зависимости показателя энергоэффективности от момента сопротивления на валу двигателя и скорости вращения ротора приведены на рис. 8, откуда видно, что время

переходных процессов для двух противопоставляемых систем управления асинхронным двигателем сопоставимо, что в первую очередь достигается за счет введения контура виртуальной диссипации с энергетически оптимальным управлением только при нагрузке, близкой к номинальной.

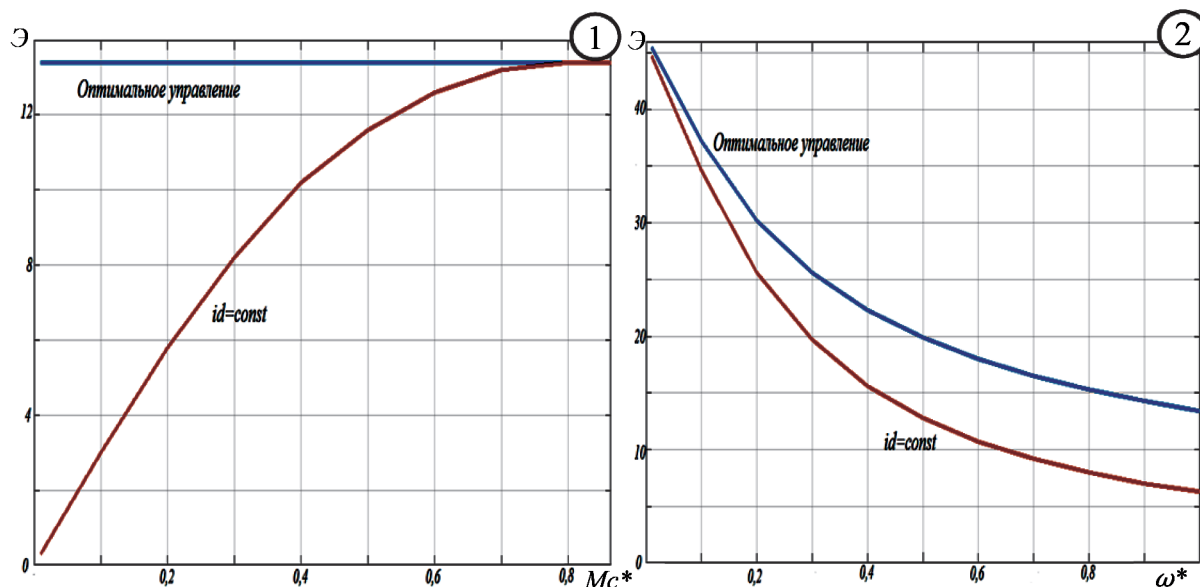


Рис. 8. Графики зависимостей показателя энергоэффективности:

1 — зависимость от нагрузки на валу при  $\omega^* = \omega_{\text{НОМ}}^*$ ;

2 — зависимость от скорости вращения при  $M_c^* = 0,25 \cdot M_{\text{НОМ}}^*$

Из графиков, приведенных на рис. 8, видно что оптимальное управление асинхронным двигателем по критерию потерь энергии имеет преимущество перед системой управления с постоянным током намагничивания. Показатель энергоэффективности оптимальной системы управления не зависит от момента сопротивления в отличие от системы управления с постоянным током намагничивания. Это достигается за счет распределения электрических и магнитных потерь. В системе управления с постоянным намагничиванием имеем большие магнитные потери при малых значениях момента сопротивления, так как ток намагничивания всегда имеет постоянное значение независимо от нагрузки. С увеличением скорости вращения ротора асинхронного двигателя показатель энергоэффективности снижается независимо от вида системы управления за счет увеличения магнитных потерь при увеличении частоты токов статора.

### Закключение (Conclusion)

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальное управление по критерию потерь энергии позволяет управлять асинхронным двигателем с более высоким значением показателя энергоэффективности в отличие от системы управления, при которой поддерживается постоянство тока намагничивания. Энергоэффективность систем управления с постоянным номинальным намагничиванием сопоставима с энергетически оптимальным управлением только при нагрузке, близкой к номинальной.
2. При значениях нагрузки, близких к номинальному значению и выше, оптимальная система управления трансформируется в систему управления при постоянном токе намагничивания, данная трансформация обеспечивается звеном ограничения тока намагничивания.
3. Качество динамических переходных процессов предложенной системы управления ненамного уступает качеству динамических процессов системы управления с постоянным током намагничивания. Улучшить качество динамических процессов можно с помощью увеличения параметра виртуальной диссипации.

Введение контура виртуальной диссипации и введение новых переменных — токов ошибок векторного управления, существенно упрощают синтез динамики электромагнитных процессов в асинхронном электродвигателе, так как уравнения, описывающие динамику асинхронного двигателя, трансформируются в уравнения второго порядка, а не третьего, как в классическом векторном управлении. Введение контура виртуальной диссипации наделяет систему управления высоким быстродействием, а также придает ей свойство робастности [20]. Предложенная система управления может быть применима к электроприводам в различных технологических процессах, которые не требуют работы асинхронного двигателя на скорости выше номинальной. Согласно полученным результатам моделирования, данный тип управления может заменить управление с постоянным током намагничивания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
2. Емельянов А. П. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора / А. П. Емельянов, Б. А. Чуркин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2014. — Т. 14. — № 3. — С. 85–90.
3. Фираго Б. И. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2015. — № 5. — С. 5–16.
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. Мещеряков В. Н. Оптимизация взаимного положения векторов тока статора и магнитного потока асинхронного двигателя при векторном управлении / В. Н. Мещеряков, П. Н. Левин. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2006. — № 1. — С. 25–27.
6. Мещеряков В. Н. Асинхронный электропривод с поддержанием оптимального угла между моментобразующими векторами / В. Н. Мещеряков, П. Е. Цветков, О. В. Мещерякова // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2013. — № 1 (31). — С. 17–21.
7. Макаров В. Г. Оптимальное управление токами электрических машин / В. Г. Макаров, В. А. Матюшин // Вестник Казанского технологического университета. — 2010. — № 11. — С. 186–194.
8. 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.
9. Космодамианский А. С. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, А. А. Пугачев // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 44–50.
10. Пугачев А. А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного технического университета. — 2015. — № 3 (64). — С. 32–37.
11. Васильев Д. А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем / Д. А. Васильев [и др.] // Вестник НГИЭИ. — 2019. — № 4 (95). — С. 110–115.
12. Носков В. А. М-образная схема замещения асинхронной машины / В. А. Носков // Электричество. — 2012. — № 10. — С. 50–53.
13. Пат. 2587162 Российская Федерация, МПК H02P 27/06, H02P 23/00, H02P 25/02. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя в системе прямого управления моментом / Г. А. Федяева, А. Н. Тарасов, Т. В. Смородова, Д. В. Конохов; заяв. и патентообл. Брянский государственный технический университет. — № 2015104690/07; заявл. 11.02.2015; опубл. 20.06.2016, Бюл. № 17.
14. Пат. 159869 Российская Федерация, МПК H02P 21/12, H02P 25/02, H02P 27/08. Система энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя с прямым управлением моментом без датчика температуры обмоток / Г. А. Федяева, А. Н. Тарасов, Т. В. Смородова, Д. В. Конохов; заяв.

и патентообл. Брянский государственный технический университет. — № 2015109540/07; заявл. 19.05.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. Пат. 2622183 Российская Федерация, МПК G05B 11/36, H02P 29/00. Быстродействующий адаптивный регулятор частоты вращения электродвигателя / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, С. И. Шарашкин, И. В. Гагаринов; заяв. и патентообл. ФГУП «Крыловский государственный научный центр». — № 2015145548; заявл. 22.10.2015; опубл. 13.06.2017, Бюл. № 17.

20. Рустамов Г. А. Робастная система управления с повышенным потенциалом / Г. А. Рустамов // Известия Томского политехнического университета. — 2014. — Т. 324. — № 5. — С. 13–20.

## REFERENCES

1. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.
2. Emelianov, A. P., and B. A. Churkin. “Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current.” *Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”* 14.3 (2014): 85–90.
3. Firago, B. I., and D. S. Vasilyev. “On the issue of vector control of the asynchronous motors.” *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 5 (2015): 5–16.
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. Meshcheryakov, V. N., and P. N. Levin. “Optimizatsiya vzaimnogo polozheniya vektorov toka statora i magnitnogo potoka asinkhronnogo dvigatelya pri vektornom upravlenii.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 1 (2006): 25–27.
6. Meshcheryakov, V. N., P. E. Tsvetkov, and O. V. Meshcheryakova. “Asinkhronnyi elektroprivod s podderzhanie optimal’nogo ugla mezhdu momentobrazuyushchimi vektorami.” *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem’ya* 1(31) (2013): 17–21.
7. Makarov, V. G., and V. A. Matyushin. “Optimal’noe upravlenie tokami elektricheskikh mashin.” *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 11 (2010): 186–194.
8. Garganev, A. G., A. T. Yarovoi, L. Yu. Babushkina, A. S. Karakulov, S. V. Langraf, and A. A. Rasstrigin. “Energoberegayushchaya modifikatsiya vektornogo upravleniya asinkhronnogo dvigatelya.” *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* 308.7 (2005): 130–134.
9. Kosmodamianskii, A. S., V. I. Vorob’ev, and A. A. Pugachev. “Scalar control systems for a traction induction motor.” *Russian Electrical Engineering* 87.9 (2016): 518–524. DOI: 10.3103/S1068371216120105.
10. Pugachev, A. A. “Minimizatsiya moshchnosti poter’ v elektroprivode so skalyarnoi sistemoi upravleniya asinkhronnym dvigatelem.” *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3(64) (2015): 32–37.
11. Vasil’ev, D. A., L. A. Panteleeva, P. N. Pokoev, and V. A. Noskov. “Energy efficient asynchronous motor control.” *Bulletin NGIEI* 4(95) (2019): 110–115.
12. Noskov, V. A. “M-obraznaya skhema zameshcheniya asinkhronnoi mashiny.” *Elektrichestvo* 10 (2012): 50–53.
13. Fedyaeva, G. A., A. N. Tarasov, T. V. Smorudova, and D. V. Konokhov. RU 2 587 162 C1, IPC H02P 27/06, H02P 23/00, H02P 25/02. Sposob energoeffektivnogo dvukhzonnogo regulirovaniya skorosti asinkhronnogo dvigatelya v sisteme pryamogo upravleniya momentum. Russian Federation, assignee. Publ. 20 June 2016.



14. Fedyaeva, G. A., A. N. Tarasov, T. V. Smorudova, and D. V. Konokhov. RU 159 869 U1, IPC H02P 21/12, H02P 25/02, H02P 27/08. Sistema energoeffektivnogo dvukhzonnoy regulirovaniya skorosti asinkhronnogo dvigatelya s pryamym upravleniem momentom bez datchika temperatury obmotok. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2016.
15. 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.
16. 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
17. 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.
18. 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.
19. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, S. I. Sharashkin, and I.V. Gagarinov. RU 2 622 183 C2, IPC G05B 11/36, H02P 29/00. Bystrodeistvuyushchii adaptivnyi regulyator chastoty vrashcheniya elektrodvigatelya. Russian Federation, assignee. Publ. 13.06.2017.
20. Rustamov, Gazanfar A. "Robust control system with high potential." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 324.5 (2014): 13–20.

#### 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](mailto:samoseyko@mail.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)  
**Гуськов Владимир Олегович** — инженер  
Завод «Электросила» —  
филиал ПАО «Силовые машины»  
196105, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
Московский пр., 139  
e-mail: [vladimir\\_guskov@inbox.ru](mailto: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](mailto:samoseyko@mail.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)  
**Guskov, Vladimir O.** — Engineer  
Electrosila Plant —  
branch of PJSC "Power machines"  
139 Moskovskii Av., St. Petersburg, 196105,  
Russian Federation  
e-mail: [vladimir\\_guskov@inbox.ru](mailto:vladimir_guskov@inbox.ru)

Статья поступила в редакцию 19 июня 2020 г.  
Received: June 19, 2020.