

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429

ALGORITHM FOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE VECTOR CONTROL WITH ROTOR RESISTANCE ESTIMATION

V. F. Samosejko¹, V. O. Guskov²

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

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

To implement the vector control by the asynchronous motor, it is necessary to have information about the resistance of the rotor winding, which can be significantly changed during the operation of the engine. The main reason for changing the resistance of the electrical machine windings is their heating. In addition, a priori information about the resistance of the rotor is unreliable. An error in estimating the impedance of the rotor winding leads to a decrease in the quality of control. Reducing the quality of the control consists in changing the value of the electromagnetic moment and reducing the speed control range. To solve this problem, an algorithm for identifying the impedance of rotary winding of the asynchronous motor, which allows to assess it, without resorting to complex algorithms and calculations. The basis for the implementation of the proposed algorithm is a modified vector control that uses special differential equations of the vector control. The presence of discrepancy in stationary vector control equations indicates errors in a priori resistance assessment. The special differential equations of stress residuals, which allow dynamically adjusting a priori information about the rotor resistance, as well as taking into account its temperature fluctuations during operation, are proposed in the paper. To implement this algorithm, it is necessary to obtain information about the currents occurring in the phase windings of the stator and the speed of rotation of the asynchronous motor rotor. A computer modeling, confirming the performance of the algorithm presented is completed in the paper. The rendered algorithm for estimating the rotor resistance is fairly simple in implementation and does not require large computational costs, which highlights it among other well-known algorithms. This algorithm is recommended for use in vector systems of asynchronous engines management, including powerful propulsion motors on the water transport facilities.

Keywords: asynchronous motor, vector control, evaluation of rotor winding resistance.

For citation:

Samosejko, Veniamin F., and Vladimir O. Guskov. “Algorithm for asynchronous electric drive vector control with rotor resistance estimation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 419–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429.

УДК 621.3.072.6

АЛГОРИТМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ОЦЕНКОЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА

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 представленной работе отмечается необходимость наличия для реализации векторного управления асинхронным двигателем информации о сопротивлении роторной обмотки, которая может существенно изменяться в процессе его эксплуатации. Подчеркивается, что основной причиной изменения сопротивлений обмоток электрической машины является их нагрев. Обращается внимание на то, что априорная

информация о сопротивлениях ротора, как правило, недостоверна, а также, что ошибка в оценке значения сопротивления роторной обмотки ведет к снижению качества управления, состоящего в изменении значения электромагнитного момента и снижении диапазона регулирования скорости. Для решения данной проблемы в работе рассмотрен алгоритм идентификации сопротивления роторной обмотки асинхронного двигателя, позволяющий выполнять его оценку, не прибегая к сложным алгоритмам и вычислениям. Основой для реализации предлагаемого алгоритма служит модифицированное векторное управление, использующее специальные дифференциальные уравнения векторного управления. Отмечается, что наличие невязок в стационарных уравнениях напряжений векторного управления свидетельствует об ошибках в априорной оценке сопротивления. В работе предложены специальные дифференциальные уравнения невязок напряжений, позволяющие динамически корректировать априорную информацию о сопротивлении ротора, а также учитывать его температурные колебания в процессе эксплуатации. Для реализации данного алгоритма необходимо получать информацию о токах, протекающих в фазных обмотках статора и скорости вращения ротора асинхронного двигателя. В работе выполнено компьютерное моделирование, подтверждающее работоспособность представленного алгоритма. Данный алгоритм оценки сопротивления ротора достаточно прост в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов, что выделяет его среди других. Предложенный алгоритм рекомендуется для применения в векторных системах управления асинхронными двигателями, в том числе мощными гребными двигателями на объектах водного транспорта.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, оценка сопротивления обмотки ротора.

Для цитирования:

Самосейко В. Ф. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 419–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429.

Введение (Introduction)

В настоящее время электродвижение широко применяется на всех видах транспорта, включая водный. Отличительными особенностями применения электродвижения на водном транспорте являются низкая скорость вращения и большая мощность, достигающая десятков мегаватт. Наиболее широкое распространение на судах получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (далее АД). Так, мощность гребного АД на ледоколе «Арктика» составляет 20 МВт. Мощность гребного электродвигателя на проектируемых судах достигает 30 МВт и более. Управление такими двигателями осуществляется посредством электрических преобразователей энергии [1] на базе силовой электроники. Данные преобразователи позволяют управлять подводимой к электродвигателю энергией по заданному закону, реализуя различные способы управления. Очевидно, что к управлению мощными АД предъявляются повышенные требования. Частотное регулирование является наиболее совершенным способом управления АД, которое можно подразделить на следующие виды: скалярное, прямое управление моментом и векторное. Ранее указанные способы управления хорошо освещены в отечественной и зарубежной литературе.

Скалярное управление АД [2] достаточно просто реализуется и не требует использования информации о параметрах электродвигателя. Однако такой метод управления не позволяет реализовать качественное управление динамикой электромагнитных процессов. Поэтому он неприемлем для управления АД большой мощности, которые испытывают на себе большие возмущающие воздействия со стороны момента сопротивления гребного винта, работающего в сложных ледовых условиях. Прямое управление моментом [3] встроено в алгоритм векторной ШИМ инвертора преобразователя частоты и основано на выборе одного из базовых векторов управления инвертором. Достоинством этого метода является простота реализации алгоритма управления, недостатком — пульсации электромагнитного момента АД, которые приводят к увеличению энергопотребления и акустического шума. Указанные недостатки препятствуют его применению в процессе управления мощными гребными АД.

Векторное управление [4] существенно повышает качество динамических процессов, позволяя синтезировать статические характеристики АД, которые являются аналогичными для машин

постоянного тока. Поэтому применение векторного управления в мощных гребных асинхронных электроприводах судов представляется наиболее перспективным. Однако для реализации этого метода необходима информация о сопротивлении обмотки ротора и основной индуктивности, которые могут меняться в процессе эксплуатации в широких пределах, что оказывает негативное влияние на качество управления, выражающееся в изменении электромагнитного момента. Для устранения этого недостатка векторного управления АД используются различные методы идентификации параметров ротора.

Данные методы достаточно хорошо освещены в отечественной и зарубежной литературе. Для идентификации сопротивления обмотки ротора применяются адаптивные регуляторы [5], [6], алгоритмы, основанные на введении возмущающих сигналов по току [7], [8], наблюдатели Люенбергера [9] и другие всевозможные наблюдатели состояний [5], [10], а также алгоритмы, в основе которых заложен метод наименьших квадратов [11]. Последние исследования, заслуживающие особого внимания, приведены в источниках [12], [13], более широкий обзор методов идентификации параметров АД дан в работе [14]. Однако все представленные ранее методы требуют больших вычислительных ресурсов и являются сложными в реализации, что отрицательно сказывается на их широком практическом применении. В данной работе предлагается метод идентификации параметров асинхронного электродвигателя, не требующий сложных вычислительных алгоритмов, который основан на информации о токах, протекающих по статорным обмоткам, и скорости вращения ротора, он позволяет эффективно оценивать сопротивление ротора и основную статическую индуктивность асинхронного электродвигателя. Предлагаемый алгоритм идентификации сопротивления ротора встраивается в алгоритм модифицированного векторного управления, изложенный в работах [6] и [15].

Методы и материалы (Methods and materials)

Уравнения напряжений на обмотках асинхронного двигателя. Динамика электромагнитных динамических процессов в АД описывается уравнениями напряжений на обмотках АД, которые могут иметь различные формы записи [16]. В данной работе используются уравнения напряжений на обмотках статора и ротора машины, записанные в осях координат $d-q$, вращающихся со скоростью магнитного поля [15]:

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_q + L_{01} \cdot p i_d - \omega_1 \cdot L_0 \cdot j_q + L_0 \cdot p j_d ; \quad (1)$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_d + L_{02} \cdot p i_q + \omega_1 \cdot L_0 \cdot j_d + L_0 \cdot p j_q ;$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q + L_{02} \cdot p j_d - \omega_2 \cdot L_0 \cdot i_q + L_0 \cdot p i_d ; \quad (2)$$

$$0 = R_2 \cdot j_q + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_d + L_{02} \cdot p j_q + \omega_2 \cdot L_0 \cdot i_d + L_0 \cdot p i_q ,$$

где u_d, u_q — элементы вектора напряжения на обмотке статора; i_d, i_q и j_d, j_q — элементы векторов токов статора и ротора; R_1 и R_2 — электрические сопротивления обмоток статора и ротора; L_{01} и L_{02} — полные (синхронные) индуктивности обмоток статора и ротора; L_0 — основная индуктивность; ω_1 и ω_2 — частота токов статора и ротора.

В стационарном режиме работы токи обмотки ротора с использованием уравнений (2) могут быть представлены как функции от токов обмотки статора:

$$j_d = \frac{\omega_2 \cdot L_{02} \cdot (R_2 \cdot i_q - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot i_d)}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_{02}^2} ; j_q = - \frac{\omega_2 \cdot L_{02} \cdot (R_2 \cdot i_d + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q)}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_{02}^2} . \quad (3)$$

Для упрощения изложения, облегчения восприятия и придания универсальности результатам используются относительные единицы. Уравнения напряжений в относительных единицах идентичны уравнениям (1) и (2), но в них все переменные отмечены верхним индексом*. Переход к относительным величинам осуществляется через базовые величины и описан в работе [6].

Уравнения напряжений векторного управления. Синтез динамики электромагнитных процессов при векторном управлении выполняется так, что обеспечивается равенство нулю продольного тока обмотки статора j_d при условии, что продольный ток обмотки статора i_d меняется так медленно, что $pi_d \approx 0$. Выполнение равенств $j_d = pi_d = 0$ является условием векторного управления, при выполнении которого уравнения напряжений статора (1) в относительных единицах преобразуются к виду [6]:

$$\begin{aligned} u_d^* &= R_1^* \cdot i_d^* - \omega_1 \cdot L_q^* \cdot i_q^* + L_q^* \cdot pi_d^*; \\ u_q^* &= R_1^* \cdot i_q^* + \omega_1 \cdot \psi_d^* + L_q^* \cdot pi_q^*, \end{aligned} \quad (4)$$

где $L_q^* = L_{01}^* - L_0^{*2}/L_{02}^*$ — относительная продольная индуктивность АД; $\psi_d^* = L_{01}^* \cdot i_d^*$ — относительное продольное потокосцепление; $L_{01}^* \approx L_{02}^* = L_d^*$ — относительная продольная индуктивность.

Относительное продольное потокосцепление ψ_d^* является характеристикой намагниченности магнитопровода АД. Зависимость $\psi_d^*(i_d^*)$ нелинейна и является характеристикой холостого хода АД, представленной в относительных единицах. Продольный ток i_d статора при векторном управлении определяет намагниченность магнитопровода АД, а поперечный — нагрузку. Для реализации векторного управления необходимо поддерживать продольный ток статора постоянным или изменять его так медленно, чтобы постоянная времени контура управления продольным током была больше или равна значению L_{01}/R_1 .

Из уравнений токов ротора (2) следует, что при $j_d = pi_d = 0$ должны выполняться соотношения:

$$j_q^* = \frac{L_0^*}{L_{02}^*} \cdot i_q^* \quad \text{и} \quad \omega_2^* = \frac{R_2^* \cdot i_q^*}{L_{02}^* \cdot i_d^*}. \quad (5)$$

Второе равенство выражения (5) определяет относительную частоту токов в обмотке ротора. Для его выполнения необходимо знать параметры ротора R_2^* и L_{02}^* , которые достоверно неизвестны. При нагреве ротора от температуры 20 °С на 100 °С электрическое сопротивление ротора изменяется в $k_R \approx 1,5$ раза. Будем полагать, что фактическое сопротивление ротора определяется выражением $R_2^* = k_R \cdot R_2^*(0)$, где $R_2^*(0)$ — априорно принятая величина электрического сопротивления ротора до начала процесса адаптивного управления; $k_R \approx 0,5 \dots 3$ — температурный коэффициент ротора. При этом относительная частота токов в обмотке ротора с учетом магнитного насыщения и нагрева ротора определяется выражением

$$\omega_2^* = \frac{k_R \cdot R_2^*(0) \cdot i_q^*}{\psi_d^*}. \quad (6)$$

где $R_2^*(0)$ — априорно принятая величина электрического сопротивления ротора до начала процесса управления; $\psi_d^*(i_d^*) \approx L_{02}^* \cdot i_d^*$ — относительное продольное потокосцепление.

Относительный электромагнитный момент АД в общем случае определяется выражением

$$M^* = L_0^* \cdot (i_d^* \cdot j_q^* - i_q^* \cdot j_d^*). \quad (7)$$

Если в это выражение подставить токи ротора (3), то электромагнитный момент с учетом соотношения (6) можно представить в виде функции температурного коэффициента ротора:

$$M^*(k_R) = \frac{L_0^{*2} \cdot i_d^{*2}}{L_{02}^* \cdot t_\theta} \cdot \frac{(1 - k_R)^2 + t_\theta^2 \cdot k_R^2}{k_R^3}, \quad (8)$$

где $t_\theta = i_q/i_d$ — тангенс угла токовой нагрузки.

Если сопротивление ротора достоверно известно, то можно принять, что температурный коэффициент ротора $k_R = 1$. Отношение $M^*(k_R)/M^*(1)$ будет определять погрешность векторного управления при достоверно неизвестном сопротивлении ротора. Графики отношения $M^*(k_R)/M^*(1)$

приведены на рис. 1, откуда следует, что для реализации векторного управления необходима достоверная информация о параметрах ротора, причем его температурный коэффициент k_R должен меняться при нагреве.

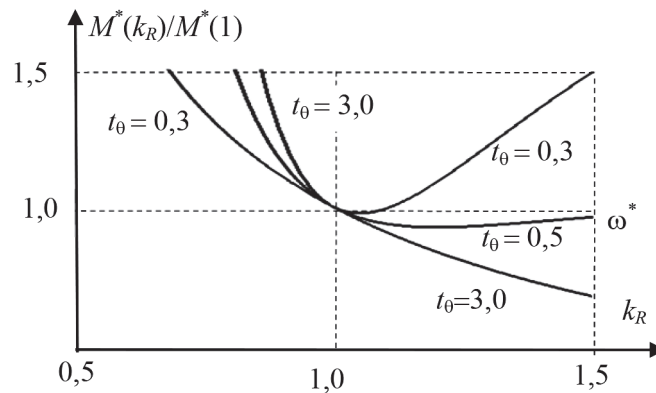


Рис. 1. Графики, характеризующие погрешность векторного управления электромагнитным моментом при недостоверной информации об электрическом сопротивлении ротора

Идентификация параметров ротора. Ошибка в оценке сопротивления ротора приводит к невязкам в стационарных уравнениях напряжений (4):

$$\Delta u_d^* = u_d^* - R_1^* \cdot i_d^* + \omega_1^* \cdot L_q^* \cdot i_q^*; \quad (9)$$

$$\Delta u_q^* = u_q^* - R_1^* \cdot i_q^* - \Psi_d^*.$$

Используя стационарные исходные уравнения напряжений (1) и (2), невязки напряжений (9) можно записать в следующем виде:

$$\Delta u_d^* = -\frac{\omega_1^* \cdot L_0^{*2} \cdot i_d^{*2} \cdot i_q^* \cdot (k_R - 1)}{L_{02}^* \cdot (i_d^{*2} + k_R \cdot i_q^{*2})}; \quad \Delta u_q^* = \frac{\omega_1^* \cdot L_0^{*2} \cdot i_d \cdot i_q^{*2} \cdot k_R \cdot (k_R - 1)}{L_{02}^* \cdot (i_d^{*2} + k_R \cdot i_q^{*2})}. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что невязки (9) являются функциями температурного коэффициента сопротивления ротора k_R , который можно определить по формуле

$$k_R = \frac{\Delta u_q^* \cdot i_d^*}{\Delta u_d^* \cdot i_q^*}. \quad (11)$$

Для вычисления температурного коэффициента сопротивления ротора по формуле (11) в формуле невязок (9) быть известны элементы — переменные $u_d, u_q, i_d, i_q, \omega_1$, а также параметры R_1, L_d и L_q . Будем полагать, что достоверная информация об относительных токах i_d^*, i_q^* поступает с датчиков тока, а также, что информация об элементах вектора напряжения на обмотке статора u_d, u_q , а также о частоте токов статора ω_1 достоверно известна, так как эти величины являются результатом вычислений по алгоритму векторного управления АД. Однако достоверная информация о параметрах машины R_1, L_d и L_q отсутствует. Погрешность в априорной оценке параметров R_1, L_d и L_q будет приводить к погрешности вычисления температурного коэффициента сопротивления ротора k_R . Кроме того, знаменатель формулы (11) в процессе функционирования привода с АД может принимать малые значения. В этом случае погрешность оценки коэффициента сопротивления ротора k_R по формуле (11) будет недопустимо большой, поэтому ее применение нежелательно.

Альтернативный подход к оценке температурного коэффициента сопротивления ротора k_R , предложенный в работе [6], состоит в решении любого из дифференциальных уравнений:

$$\text{sign}(\omega_1^* \cdot i_q^*) \cdot \Delta u_d = -T_R \cdot p k_R; \text{sign}(\omega_1^*) \cdot \Delta u_q = T_R \cdot p k_R, \quad (12)$$

где T_R — постоянная времени, которая должна удовлетворять неравенству $T_R > L_d/R_1$.

Однако погрешность полученных решений также будет зависеть от достоверности информации о параметрах двигателя R_1^* , L_d^* и L_q^* , используемых при вычислении невязок по формуле (9).

Для повышения точности оценки температурного коэффициента сопротивления ротора k_R следует видоизменить второе уравнение в формулах (12) с учетом алгоритма векторного управления, изложенного в работе [15]. Для формирования динамики электромагнитных процессов в данной работе используется контур виртуальной диссипации (рис. 2), позволяющий существенно уменьшить влияние сопротивления ротора на погрешность расчета невязки, выполняемого по формуле

$$\Delta u_d = y_q - (R_x^* + k_R \cdot R_1^*) \cdot i_q^* - \omega_1^* \cdot \Psi_d^*(i_d^*), \quad (13)$$

где $\Psi_d^*(i_d^*)$ — относительное продольное потокоцепление, которое является априорно известной функцией продольного тока i_d^* (характеристикой холостого хода АД).

Сопротивление короткозамкнутого ротора оценивается по формуле

$$R_2 = k_R \cdot R_2(0),$$

где $R_2(0)$ — априорная оценка сопротивления ротора; k_R — переменная, которая находится путем решения второго дифференциального уравнения формул (12).

В формуле (13) температурные колебания электрического сопротивления статора учитываются тем же коэффициентом k_R , что и электрического сопротивления ротора. Это справедливо, если температура статора и ротора приблизительно одинакова, а также одинаковы температурные коэффициенты сопротивлений статора и ротора. Следует отметить, что в формуле (13) параметр виртуальной диссипации R_x много больше относительной величины сопротивления обмотки статора $k_R \cdot R_1^*$ и его значение оказывает незначительное влияние на погрешность вычисления невязки (13).

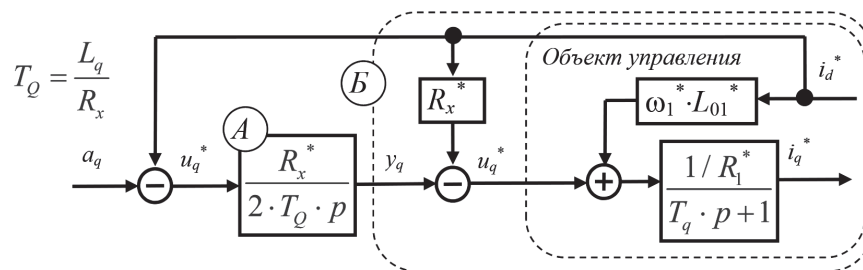


Рис. 2. Структурная схема контура управления поперечным током:

A — интегральный регулятор поперечного тока;

B — контур виртуальной диссипации; a_q — сигнал задания поперечного тока

При векторном управлении с постоянным намагничиванием величина продольного тока выбирается следующим образом:

$$\Psi_d^* = L_d^* \cdot i_q^* = 1. \quad (14)$$

Если при настройке системы управления соотношение (14) выполнено, то формула для вычисления невязки (13) примет следующий вид:

$$\Delta u_q = y_q - (R_x^* + k_R \cdot R_1^*) \cdot i_q^* - \omega_1^*. \quad (15)$$

Так как $R_x^* \gg R_1^*$, а y_1^* , i_q^* и ω_1^* известные величины, погрешность вычисления невязки по формуле (15) будет мала.

Моделирование динамики электромагнитных процессов. Структурная схема адаптивного управления скоростью вращения ротора с температурной компенсацией электрического сопротивле-

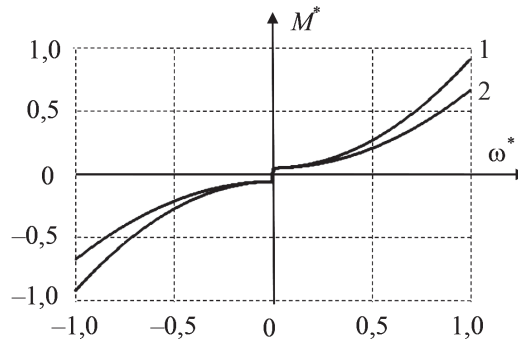


Рис. 4. Механические характеристики гребного винта:
1 — швартовная; 2 — свободная вода

Первый режим — априорная оценка сопротивления ротора занижена в 1,5 раза. Этот режим соответствует пуску нагретого АД при априорной оценке сопротивления ротора как у холодного двигателя. Результаты моделирования представлены на рис. 5, а, откуда видно, что температурный коэффициент сопротивления ротора k_R от единичного значения стремится к значению 1,5.

Второй режим — априорная оценка сопротивления ротора завышена в 1,5 раза. Этот режим соответствует пуску холодного АД при априорной оценке сопротивления ротора как у горячего двигателя. Результаты моделирования представлены на рис. 5, б. Из графиков видно, что значение температурного коэффициента сопротивления ротора k_R от единичного значения стремится к значению 0,66.

Третий режим — априорная оценка сопротивления ротора совпадает с истинным сопротивлением ротора. Этот режим соответствует пуску нагретого АД. Результаты моделирования представлены на рис. 5, в. Из графиков видно, что значения температурного коэффициента сопротивления ротора k_R остаются равными единице.

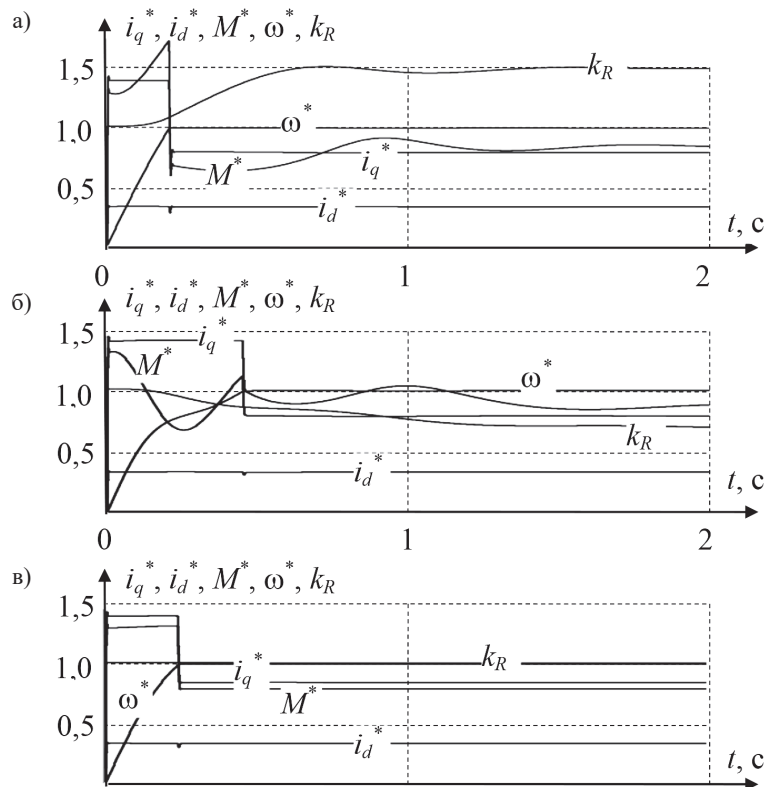


Рис. 5. Динамика при пуске АД в относительных единицах токов статора i_q^* , i_d^* , электромагнитного момента M^* , скорости вращения ротора ω^* и температурного коэффициента сопротивления ротора k_R в режимах: 1 (а); 2 (б); 3 (в)

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. При наличии достоверной информации о сопротивлении ротора векторное управление позволяет формировать динамические процессы высокого качества, однако в процессе функционирования сопротивлению ротора меняется в достаточно широких пределах. Результаты моделирования показывают, что ошибки в априорной оценке сопротивления ротора приводят к существенному снижению точности управления электромагнитным моментом, а также и качества динамики электромагнитных процессов.

2. Предложенный алгоритм динамической оценки сопротивления обмотки ротора позволяет синтезировать адаптивный алгоритм управления электромагнитным моментом. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного алгоритма и целесообразность его применения. Данный алгоритм оценки сопротивления ротора достаточно прост в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов.

3. Алгоритм динамической оценки сопротивления обмотки ротора при векторном управлении АД показал хорошую устойчивость даже при двукратных ошибках в их априорной оценке. На уточнение априорной оценки сопротивления обмотки ротора затрачивается время, равное 2...3 продолжных постоянных времени $T_r = L_d/R_1$.

4. Представленный алгоритм оценки сопротивления ротора может быть рекомендован для применения в системах в векторных системах управления мощными гребными АД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов И. В. Широтно-импульсные преобразователи электрической энергии: моногр. / И. В. Белоусов [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. — 231 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. Григорьев А. В. Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 1) / А. В. Григорьев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2012. — № 2 (90). — С. 53–58.
4. 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.
5. Виноградов А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А. Б. Виноградов, В. Л. Чистосердов, А. Н. Сибирцев // Электротехника. — 2003. — № 7. — С. 7–17.
6. 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.
7. Matsuo T. A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives / T. Matsuo, T. A. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. — 1985. — Vol. IA-21. — Is. 3. — Pp. 624–632. DOI: 10.1109/TIA.1985.349719.
8. Wade S. A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines / S. Wade, W. Dunnigan, B. W. Williams // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 1997. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 247–257. DOI: 10.1109/41.564164.
9. Luenberger D. G. Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications / D. G. Luenberger. — 1st Edition. — N. Y.: Wiley, 1979. — 464 p.
10. Laroche E. Methodological insights for online estimation of induction motor parameters / E. Laroche, E. Sedda, C. Durieu // IEEE transactions on control systems technology. — 2008. — Vol. 16. — Is. 5. — Pp. 1021–1028. DOI: 10.1109/TCST.2007.916317.
11. Campbell M. L. Speed sensorless identification of the rotor time constant in induction machines / M. L. Campbell, J. Chiasson, M. Bodson, L. Tolbert // IEEE transactions on automatic control. — 2007. — Vol. 52. — Is. 4. — Pp. 758–763. DOI: 10.1109/TAC.2007.894548.

12. Хлопенко Н. Я. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора / Н. Я. Хлопенко, И. Н. Хлопенко // *Электротехника и электромеханика*. — 2017. — № 1. — С. 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.

13. Базылев Д. Н. Метод идентификации сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя / Д. Н. Базылев, А. А. Бобцов, А. А. Пыркин, Р. Ортега // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2017. — Т. 60. — № 9. — С. 807–811. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-807-811.

14. Терехин А. А. Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода / А. А. Терехин, Д. А. Даденков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. — 2017. — № 22. — С. 55–66.

15. Самосейко В. Ф. Алгоритмы управления электрическими машинами. Том 1. Алгоритмы управления асинхронной электрической машиной: моногр. / В. Ф. Самосейко [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2020. — 116 с.

16. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

REFERENCES

1. Belousov, I. V., F. A. Gel'ver, V. F. Samoseiko, and V. A. Khomyak. *Shirotno-impul'snye preobrazovateli elektricheskoi energii. Monografiya*. SPb.: Izd. Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2019.

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. Grigor'ev, A. V. "Obzor variantov pryamogo upravleniya momentom asinkhronnykh elektrodvigateli (chast' 1)." *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 2(90) (2012): 53–58.

4. 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.

5. Vinogradov, A. B., V. L. Chistoserdiv, and A. N. Sibirtsev. "Adaptive vector control system for an asynchronous electric drive." *Russian Electrical Engineering* 74.7 (2003): 8–20.

6. 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.

7. Matsuo, Takayoshi, and Thomas A. Lipo. "A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives." *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-21.3 (1985): 624–632. DOI: 10.1109/TIA.1985.349719.

8. Wade, Scott, W. Dunnigan, and Barry W. Williams. "A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.2 (1997): 247–257. DOI: 10.1109/41.564164.

9. Luenberger, David G. *Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications*. 1st Edition. N.Y.: Wiley, 1979.

10. Laroche, Edouard, Emmanuel Sedda, and Cécile Durieu. "Methodological insights for online estimation of induction motor parameters." *IEEE transactions on control systems technology* 16.5 (2008): 1021–1028. DOI: 10.1109/TCST.2007.916317.

11. Campbell, Mengwei Li, John Chiasson, Marc Bodson, and Leon M. Tolbert. "Speed sensorless identification of the rotor time constant in induction machines." *IEEE transactions on automatic control* 52.4 (2007): 758–763. DOI: 10.1109/TAC.2007.894548.

12. Khlopenko, N. J., and I. N. Khlopenko. "Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage." *Electrical Engineering & Electromechanics* 1 (2017): 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.

13. Bazylev, D. N., A. A. Bobtsov, A. A. Pyrkin, and R. Ortega. "Method for identification of asynchronous motor stator and rotor resistance." *Journal of Instrument Engineering* 60.9 (2017): 807–811.

14. Terekhin, A. A., and D. A. Dadenkov. "Review of identification methods of induction motor parameters." *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems* 22 (2017): 55–66.

15. Samoseiko, V. F., I. V. Belousov, F. A. Gel'ver, and V. A. Khomyak. *Algoritmy upravleniya elektricheskimi mashinami. Tom 1. Algoritmy upravleniya asinkhronnoi elektricheskoi mashinoi: Monografiya*. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2020.

16. Samoseyko, V. F. *Teoreticheskiye osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.

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 21 марта 2021 г.
Received: March 21 2021.*