

УДК 62-83::621.3.07

## Векторная ориентация переменных асинхронного двигателя без информации о потокосцеплениях

Б.С. Курнышев

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: bor403@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Техническая реализация принципа векторной ориентации требует информации о потокосцеплениях асинхронного двигателя. Такая информация является труднодоступной. Тензорный метод математического описания электромеханических процессов позволяет устранить указанную трудность.

**Материалы и методы:** Исследования статических и динамических характеристик системы управления электропривода с векторной ориентацией относительно неконтролируемых переменных ротора проведены на компьютерной модели с использованием возможностей тензорного анализа. Разработанный алгоритм векторного управления реализован в программной среде Mathcad.

**Результаты:** Показано, что систему векторного управления возможно разработать без информации о потокосцеплениях и такая система управления обладает адаптивными свойствами. Предложен алгоритм формирования вектора тока статора, позволяющий задавать базовые переменные ротора асинхронного двигателя.

**Выводы:** Модельные эксперименты подтвердили адаптивные свойства разработанной векторной СУЭП. Введение корректирующей угловой невязки позволяет ослабить влияние параметрических возмущений в асинхронном двигателе.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, векторное управление, идентификатор.

## Vector Orientation of Asynchronous Motor Variables without Information about Magnetic Flux Linkage

B.S. Kurnyshev

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: bor403@yandex.ru

### Abstract

**Background:** Technical implementation of vector orientation principle requires the information about magnetic flux linkage of asynchronous motors. This kind of information is difficult to access. The tensor method of mathematical description of electromechanical processes allows eliminating the mentioned difficulties.

**Materials and methods:** The research of statistic and dynamic characteristics of electric drive control system with vector orientation according to the uncontrolled variables of rotors is carried out on the basis of the computer model with tensor analysis. The developed algorithm of vector control is used in Mathcad program software.

**Results:** In the article it is shown that the vector control system may be developed without information about magnetic flux linkages and this kind of control system has the adapted characteristics. The algorithm of stator current vector allows setting the basic variables of asynchronous motors rotors.

**Conclusions:** The model tests confirm the adapted characteristics of the developed vector of electrical drive control system. Correcting angular discrepancy allows reducing the influence of parametric disturbances in asynchronous motors.

**Key words:** asynchronous electric drive, vector control, identifier.

В системах векторного управления асинхронным электроприводом [1] обычно применяют либо датчики для измерения электромагнитного потока, либо идентификаторы для его восстановления. Применение датчиков требует изменения конструкции двигателя, а применение идентификаторов приводит к значительной чувствительности системы к изменению его параметров.

Возможен принципиально другой подход, отличающийся от всех известных (по научным публикациям) и позволяющий значительно улучшить качество векторного управления.

Показано, что систему векторного управления возможно разработать без информации о потокосцеплениях и что такая система управ-

ления обладает адаптивными свойствами. В основе адаптивных свойств лежит введение корректирующей угловой невязки, которая позволяет ослабить влияние параметрических возмущений в асинхронном двигателе.

Нужно принять во внимание единственный (очевидный) факт, что характер протекания физических процессов в любой электромеханической (электромехатронной) системе ни качественно, ни количественно не зависит от выбора системы координат, что позволяет в полной мере использовать возможности тензорного анализа [2].

Дифференциальные уравнения электромагнитных процессов в асинхронном двига-

теле (АД) нужно представить в виде, инвариантном к преобразованию координатного базиса, т.е. в тензорной форме [3]:

$$\frac{D\vec{\Psi}_S}{dt} + R_1 \vec{I}_S = \vec{U}_S, \quad (1)$$

$$\frac{D\vec{\Psi}_R}{dt} + R_2 \vec{I}_R = 0, \quad (2)$$

$$\vec{\Psi}_S = L_1 \vec{I}_S + L_m \vec{I}_R, \quad (3)$$

$$\vec{\Psi}_R = L_2 \vec{I}_R + L_m \vec{I}_S, \quad (4)$$

$$\vec{M}_{эм} = p_n L_m \vec{I}_S \times \vec{I}_R, \quad (5)$$

где  $\vec{\Psi}_S$ ,  $\vec{\Psi}_R$  – абсолютные векторы потокосцеплений статора и ротора соответственно;  $\vec{I}_S$ ,  $\vec{I}_R$  – абсолютные векторы токов статора и ротора соответственно;  $\vec{U}_S$  – абсолютный вектор напряжения статора;  $\vec{M}_{эм}$  – абсолютный вектор электромагнитного момента АД;  $D$  – оператор абсолютного дифференцирования [2];  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_m$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $p_n$  – параметры АД.

Из (1)–(5) следует:

$$\frac{D\vec{\Psi}_R}{dt} = L_2 \frac{D\vec{I}_R}{dt} + L_m \frac{D\vec{I}_S}{dt}, \quad (6)$$

$$\vec{I}_S = \vec{I}_A + \vec{I}_B = I_A \vec{i}_a + I_B \vec{i}_b, \quad (7)$$

$$\vec{I}_R = -\frac{L_m}{L_2} \vec{I}_A + \Delta \vec{I}_R, \quad (8)$$

$$\vec{\Psi}_R = L_m \vec{I}_B + \Delta \vec{\Psi}_R, \quad (9)$$

$$\Delta \vec{I}_R = \Delta I_{RA} \vec{i}_a + \Delta I_{RB} \vec{i}_b, \quad (10)$$

$$\Delta I_{RA} = -|\Delta \vec{I}_R| \cos \delta, \quad (11)$$

$$\Delta I_{RB} = -|\Delta \vec{I}_R| \sin \delta, \quad (12)$$

$$\frac{D\vec{I}_S}{dt} = \frac{dI_A}{dt} \vec{i}_a + I_A \frac{d\vec{i}_a}{dt} + \frac{dI_B}{dt} \vec{i}_b + I_B \frac{d\vec{i}_b}{dt}, \quad (13)$$

$$\frac{D\vec{I}_R}{dt} = -\frac{L_m}{L_2} \frac{dI_A}{dt} \vec{i}_a - \frac{L_m}{L_2} I_A \frac{d\vec{i}_a}{dt} - \cos \delta \frac{d|\Delta \vec{I}_R|}{dt} \vec{i}_a +$$

$$+ |\Delta I_R| \sin \delta \frac{d\delta}{dt} \vec{i}_a - |\Delta I_R| \cos \delta \frac{d\vec{i}_a}{dt} -$$

$$- \sin \delta \frac{d|\Delta \vec{I}_R|}{dt} \vec{i}_b - |\Delta \vec{I}_R| \cos \delta \frac{d\delta}{dt} \vec{i}_b - |\Delta \vec{I}_R| \sin \delta \frac{d\vec{i}_b}{dt}, \quad (14)$$

$$\frac{d\vec{i}_a}{dt} = \vec{\omega}_{AB}^R \times \vec{i}_a = \omega_{AB}^R \vec{i}_b, \quad (15)$$

$$\frac{d\vec{i}_b}{dt} = \vec{\omega}_{AB}^R \times \vec{i}_b = -\omega_{AB}^R \vec{i}_a, \quad (16)$$

где  $\vec{I}_A$ ,  $\vec{I}_B$  – составляющие вектора тока статора в системе координат (СК)  $A, B$ , вращающейся относительно ротора с угловой частотой  $\omega_{AB}^R$ ;  $\vec{i}_a$ ,  $\vec{i}_b$  – единичные базисные векторы в направлении осей СК  $A, B$ ;  $\Delta \vec{I}_R$  – неизвестная составляющая вектора тока ротора, в любой момент времени дополняющая известную (детерминированную) составляющую, равную  $(-L_m/L_2)I_A$ ,

до фактической величины вектора  $\vec{I}_R$ ;  $\Delta \vec{\Psi}_R$  – неизвестная составляющая вектора потокосцепления ротора, дополняющая детерминированную составляющую, равную  $L_m \vec{I}_B$ , до фактической величины вектора  $\vec{\Psi}_R$ ;  $\delta$  – угол между векторами неизвестной и детерминированной составляющих вектора тока ротора.

Геометрический смысл перечисленных переменных иллюстрирует векторная диаграмма, показанная на рис. 1.

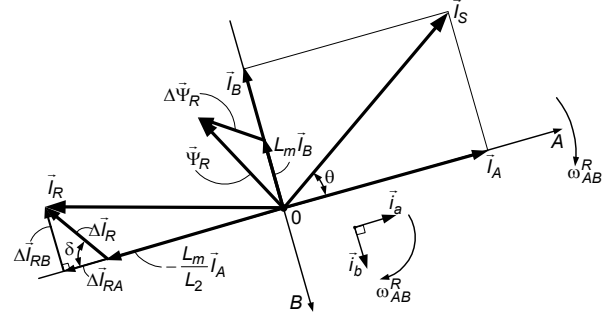


Рис. 1. Векторная диаграмма к анализу электромагнитных процессов в роторе

В результате преобразований при допущении, что  $I_B = \text{const}$ , можно получить следующее уравнение:

$$\frac{d|\Delta \vec{I}_R|}{dt} = -\frac{L_m}{L_2} I_B \cos \delta \omega_{AB}^R - R_2 \frac{L_m}{L_2^2} I_A \cos \delta - \frac{R_2}{L_2} |\Delta \vec{I}_R|. \quad (17)$$

Из (17) следует, что если скорость вращения СК  $A, B$  определяется соотношением

$$\omega_{AB}^R = \frac{R_2 I_A}{L_2 I_B}, \quad (18)$$

то независимо от величины угла  $\delta$  становится справедливым уравнение

$$\frac{d|\Delta \vec{I}_R|}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} |\Delta \vec{I}_R|. \quad (19)$$

Аналогично,

$$\frac{d|\Delta \vec{\Psi}_R|}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} |\Delta \vec{\Psi}_R|. \quad (20)$$

Из (19), (20) следует, что объект управления относительно модулей отклонений векторов тока и потокосцепления ротора от своих детерминированных составляющих, равных соответственно  $(-L_m/L_2)I_A$  и  $L_m I_B$ , асимптотически устойчив с точкой равновесия в начале координат фазовой плоскости. То есть при устранении действия возмущающего фактора, вызвавшего появление указанных отклонений, происходит их уменьшение по экспоненциальному закону с постоянной времени цепи ротора. Таким образом, если формировать вектор тока статора, задавая его компоненты  $I_A$  и  $I_B$  в ортогональных координатах  $A, B$ , вращающихся относительно ротора с угловой частотой, определяемой через сами эти токовые составляющие согласно выражению (18), и при этом

изменять только составляющую  $I_A$ , поддерживая всегда постоянной компоненту  $I_B$ , то для асинхронной машины будет свойственным возникновение режима, характеризующегося следующими особенностями.

В условиях отсутствия возмущений между модулями фактических векторов тока и потокоцепления ротора и соответствующими составляющими вектора тока статора устанавливаются безинерционные связи. Кроме того, векторные переменные ротора совпадают по направлению в пространстве с координатными осями  $A$  и  $B$  как в статике, так и в динамике. Но тогда из (5) следует, что

$$M_{эм} = -p_n \frac{L_m^2}{L_2} I_B I_A, \quad (21)$$

то есть регулирование составляющей  $I_A$  означает непосредственное регулирование электромагнитного момента АД, аналогичное регулированию момента в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением за счет изменения тока якоря.

Таким образом, канал непосредственного управления моментом АД может быть построен в условиях полного отсутствия информации о базовых переменных ротора, поскольку они могут однозначно задаваться через составляющие формируемого по предложенному алгоритму вектора тока статора.

Если же информация о параметрах ротора АД известна недостоверно, то формирование вектора тока статора по описанному выше алгоритму в СК, вращающейся со скоростью, определяемой (18), приведет к тому, что неконтролируемые переменные ротора будут задаваться через составляющие  $I_A$  и  $I_B$  с ошибками как по модулю, так и по углу, которые с течением времени уже не будут сводиться к нулю, что следует из анализа (17).

Появление отличных от нуля ошибок регулирования переменных ротора приводит к отклонениям динамических и энергетических характеристик векторной системы управления электроприводом (СУЭП) от оптимальных и не дает возможности эффективно реализовать потенциальные регулировочные возможности АД. Поскольку вариации постоянной времени цепи ротора из-за тепловых изменений активного сопротивления его обмотки весьма широки, то они в полной мере способны вызывать указанные выше неблагоприятные явления.

Для снижения влияния параметрических возмущений на точность задания неконтролируемых переменных ротора необходимо корректировать задаваемое угловое положение СК  $A, B$ , в которой формируется вектор тока статора. Тогда скорость вращения указанной СК будет определяться по уравнению

$$\omega_{AB}^R = \frac{R_2}{L_2} \frac{I_A}{I_B} + \omega_\lambda, \quad (22)$$

отличающемуся от (18) появлением в правой части дополнительной скоростной составляющей  $\omega_\lambda$ . Величина  $\omega_\lambda$  вычисляется в функции угловой невязки  $\tilde{\rho}$  между текущим пространственным положением осей СК  $A, B$  и положением этих же осей, которое должно было бы иметь место в случае корректного выполнения условия векторной ориентации:

$$\omega_\lambda = -\lambda \operatorname{tg} \tilde{\rho}, \quad (23)$$

$$\tilde{\rho} = \varphi_{AB}^S - \varphi_{AB}^{S*} = \rho^* - \rho, \quad (24)$$

где  $\varphi_{AB}^S, \varphi_{AB}^{S*}$  – текущая и «корректная» угловые позиции СК  $A$  и  $B$  относительно неподвижной системы отсчета соответственно;  $\rho, \rho^*$  – текущая и «корректная» угловые позиции вектора напряжения статора относительно СК  $A, B$ ;  $\lambda$  – настраиваемый коэффициент усиления в канале корректирующей связи по угловой невязке.

Ситуацию, когда угловая невязка  $\tilde{\rho}$  отлична от нуля, иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 2.

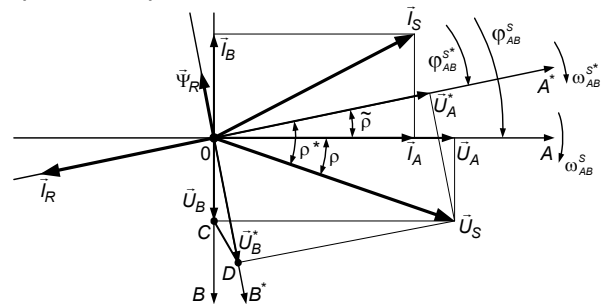


Рис. 2. Векторная диаграмма для случая отличной от нуля невязки по углу поворота СК  $A, B$

При вычислении величины  $\omega_{AB}^R$  с использованием соотношений (22)–(24) происходит уменьшение длины отрезка  $CD$  по экспоненциальному закону с постоянной времени, равной  $1/\lambda$ . Следовательно, настраивая коэффициент усиления в канале корректирующей связи по угловой невязке, можно влиять на динамику сходимости текущего пространственного положения СК  $A, B$  с положением СК  $A^*, B^*$ , отвечающим корректному выполнению условия векторной ориентации.

Для вычисления угловой невязки при формировании корректирующего сигнала  $\omega_\lambda$  необходима информация о векторе напряжения статора. Для определения «корректной» угловой позиции вектора  $\vec{U}_S$  в СК  $A, B$  были детально рассмотрены электромагнитные процессы в статоре АД при корректном выполнении условия векторной ориентации. Методика преобразования тензорного уравнения электрического равновесия цепи статора (1) с учетом (3) при этом основывалась на соотношениях (7), (8), (13) и (14), записанных с учетом того, что при корректном протекании процесса управления имеют место равенства  $\Delta \vec{i}_R = 0$  и

$I_B = \text{const}$ . Кроме того, в процессе преобразований использовались следующие уравнения:

$$\frac{D\vec{\Psi}_S}{dt} = L_1 \frac{D\vec{I}_S}{dt} + L_m \frac{D\vec{I}_R}{dt}, \quad (25)$$

$$\vec{U}_S = \vec{U}_A^* + \vec{U}_B^* = U_A^* \vec{i}_a + U_B^* \vec{i}_b, \quad (26)$$

$$\frac{d\vec{i}_a}{dt} = \vec{\omega}_{AB}^S \times \vec{i}_a = \omega_{AB}^S \vec{i}_b, \quad (27)$$

$$\frac{d\vec{i}_b}{dt} = \vec{\omega}_{AB}^S \times \vec{i}_b = -\omega_{AB}^S \vec{i}_a, \quad (28)$$

$$\omega_{AB}^S = \omega_{AB}^R + p_n \Omega, \quad (29)$$

где  $\vec{U}_A^*$ ,  $\vec{U}_B^*$  – составляющие вектора напряжения статора в СК  $A, B$  при корректном протекании управления;  $\omega_{AB}^S$  – угловая частота вращения СК  $A, B$  относительно неподвижного статора;  $\Omega$  – угловая частота вращения вала АД.

В результате преобразований получено следующее уравнение для «корректной» компоненты вектора напряжения по оси  $B$ :

$$U_B^* = L_1^* \omega_{AB}^S I_A + R_1 I_B, \quad (30)$$

где  $L_1^* = (L_1 L_2 - L_m^2) / L_2$ . «Корректную» компоненту  $U_A^*$  по оси  $A$  можно определить, исходя из

величины модуля вектора напряжения статора и (30), по теореме Пифагора. Исходя из величин составляющих  $U_A^*$  и  $U_B^*$ , можно вычислить «корректную» угловую позицию вектора  $\vec{U}_S$  в СК  $A, B$ , т. е. угол  $\rho^*$ . Текущее значение угла  $\rho$  может быть вычислено, исходя из текущего углового положения СК  $A, B$  (угол  $\varphi_{AB}^S$ ) и текущего угла поворота фактического вектора напряжения (угол  $\varphi_{U_S}$ ). Сравнивая полученные значения  $\rho^*$  и  $\rho$ , в соответствии с (24) можно определить величину угловой невязки, затем в соответствии с (22) и (23) можно выработать корректирующий скоростной сигнал  $\omega_\lambda$ .

На рис. 3 показана структурная схема блока адаптации (БА), генерирующего указанный корректирующий сигнал.

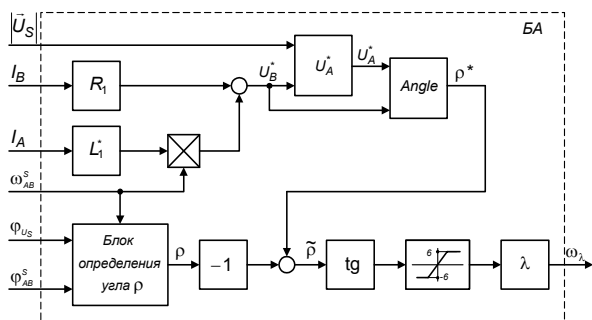


Рис. 3. Схема структурная блока адаптации:  $U_A^*$  – блок вычисления «корректной» компоненты  $U_A^*$  по теореме Пифагора;  $Angle$  – блок вычисления угловой координаты вектора через его ортогональные составляющие

Применение предложенной схемы БА обеспечивает инвариантные характеристики векторной СУЭП по отношению к вариации параметров активного сопротивления ротора и индуктивности контура намагничивания АД.

Возможны другие варианты построения БА. В частности, можно синтезировать вариант внутренней структуры БА, обеспечивающий пониженную чувствительность характеристик системы к одновременной вариации активных сопротивлений обмоток ротора и статора.

На рис. 4 приведена структурная схема векторной СУЭП, функционирующей по разработанному алгоритму.

Разработанный алгоритм векторного управления был реализован в программной среде Mathcad. Результаты исследований статических и динамических характеристик СУЭП с векторной ориентацией относительно неконтролируемых переменных ротора, выполненных на компьютерной модели, позволили сделать вывод о правильности теоретических положений, положенных в ее основу. Модельные эксперименты подтвердили адаптивные свойства разработанной векторной СУЭП.

### Заключение

Техническая реализация принципа векторной ориентации требует информации о потокосцеплениях асинхронного двигателя. Такая информация является труднодоступной. Тензорный метод математического описания электромеханических (электромехатронных) процессов позволяет устранить указанную трудность. Систему векторного управления возможно разработать без информации о потокосцеплениях. Оказывается, что такая система управления обладает адаптивными свойствами. При этом именно введение корректирующей угловой невязки позволяет ослабить влияние параметрических возмущений в асинхронном двигателе.

Разработанная структура системы векторного управления АД реализует косвенную ориентацию вектора тока статора относительно ортогональной системы векторов тока и потокосцепления ротора. Ортогональная система векторов тока и потокосцепления ротора не контролируется с помощью датчиков и не восстанавливается с помощью идентификаторов состояния. При разработке алгоритма управления использован способ задания трудноконтролируемых переменных состояния объекта управления (АД) через его легко контролируемые координаты.

Предложенный способ понижения чувствительности векторной СУЭП по отношению к действию возмущающих факторов обеспечивает, в том числе, и компенсацию действия параметрических возмущений. Способ заключается в применении настраиваемой корректирующей связи по угловой невязке.

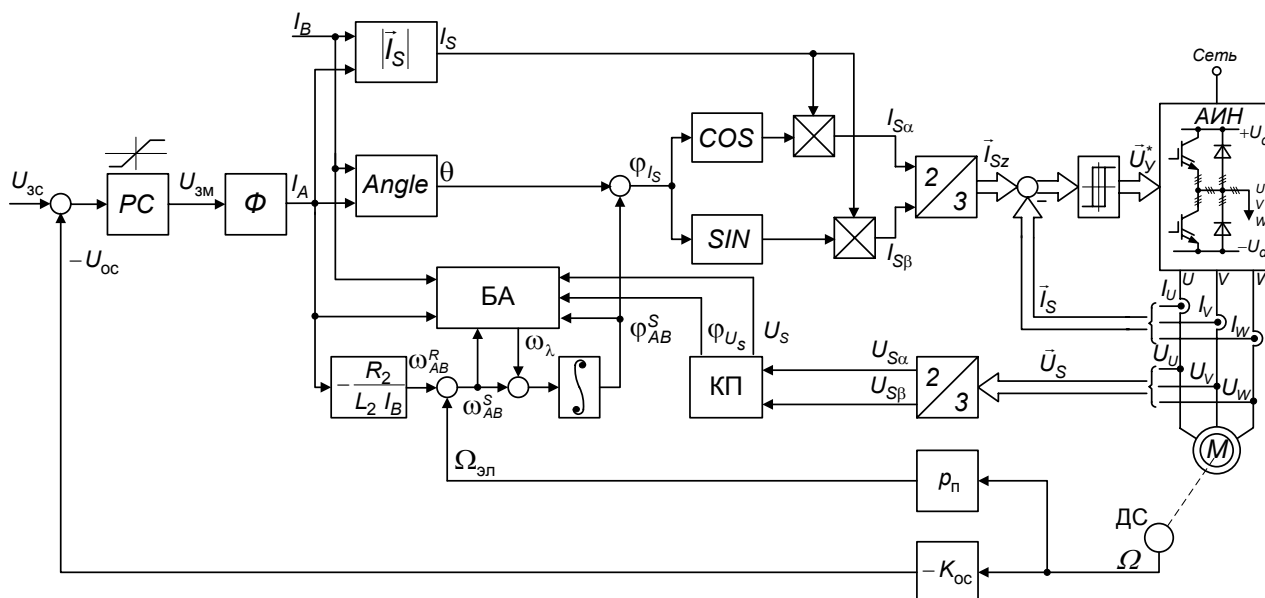


Рис. 4. Схема структурная СУЭП с векторной ориентацией относительно неконтролируемых переменных ротора: PC – регулятор скорости;  $\Phi$  – фильтр 1-го порядка, формирующий желаемые динамические свойства канала регулирования момента;  $|I_S|$  – блок вычисления модуля вектора тока статора; 2/3 и 3/2 – блоки преобразований от двухфазной неподвижной СК  $\alpha, \beta$  к трехфазной СК  $U, V, W$  и обратно; КП – координатный преобразователь, осуществляющий переход к полярному представлению вектора напряжения статора; ДС – датчик скорости;  $\bar{I}_S$  – заданное значение результирующего вектора тока статора;  $\bar{U}_y^*$  – вектор дискретных сигналов управления ключевыми элементами автономного инвертора напряжения (АИИ);  $U_{зс}, U_{зм}$  – сигналы задания по скорости и моменту;  $U_{ос}$  – сигнал обратной связи в контуре регулирования скорости;  $K_{ос}$  – масштабирующий коэффициент в канале обратной связи по скорости;  $\theta$  – угол вектора тока статора относительно СК  $A, B$ ;  $\Omega_{эл}$  – электрическая угловая частота вращения вала двигателя

Анализ полученных результатов исследований показал, что при использовании предложенного алгоритма коррекции можно действительно эффективно управлять моментом и скоростью АД в условиях полного отсутствия информации о базовых переменных ротора, а также в условиях отсутствия достоверной информации о параметрах двигателя. Выявленные робастные свойства системы векторного управления с ориентацией относительно неконтролируемых переменных ротора обеспечивают энергетические и динамические характеристики электропривода, близкие к оптимальным, несмотря на действие значительных параметрических возмущений.

#### Список литературы

1. Рудаков В.В., Столярков И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.

Курнышев Борис Сергеевич,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
e-mail: bor403@yandex.ru

2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: пер. с англ. / под ред. И.Г. Арамановича, А.М. Березмана. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

3. Курнышев Б.С., Данилов С.П. Тензорная методология в теории электротехнических систем: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002. – 180 с.

#### References

1. Rudakov, V.V., Stolyarov, I.M., Dartau, V.A. *Asinkhronnye elektroprivody s vektornym upravleniem* [Asynchronous Electric Drives with Vector Control]. Leningrad, Energoatomizdat, 1987. 136 p.

2. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Reference Book on Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka, 1973. 832 p.

3. Kurnyshev, B.S., Danilov, S.P. *Tenzornaya metodologiya v teorii elektrotekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie* [Tensor Methodology in the Theory of Electrical and Technical Systems]. Ivanovo, 2002. 180 p.