

**Голоколос Д. А., Ким К. К., Иванов С. Н., Бельский К. О.**  
**D. A. Golokolos, K. K. Kim, S. N. Ivanov, K. O. Belsky**

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭКРАНИРОВАННЫМ АСИНХРОННЫМ  
ДВИГАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОПИСАНИЯ**

**SYNTHESIS OF A SHIELDED ASYNCHRONOUS MOTOR CONTROL SYSTEM BASED  
ON A VECTOR DESCRIPTION**

**Голоколос Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, инженер-разработчик программного обеспечения (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: em@email.knastu.ru.

**Dmitry A. Golokolos** – PhD in Engineering, Software Engineer (Russia, Sankt-Petersburg). E-mail: em@email.knastu.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Heat Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Бельский Кирилл Олегович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: em@email.knastu.ru.

**Kirill O. Belsky** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: em@email.knastu.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы создания системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором для специальных эксплуатационных условий. Особенностью конструкции двигателя является наличие электропроводящего экрана, отделяющего подвижную и стационарную части двигателя. Приведена структурная схема экранированного двигателя. Определены основные проектные параметры, и обоснована необходимость учёта параметров экрана при составлении схемы управления. Показано, что построение системы управления может быть основано на подходе с представлением напряжений, токов и потокосцеплений в асинхронном преобразователе в виде пространственных векторов.

**Summary.** The issues of creating control system for an asynchronous motor with a short-circuited rotor for special operating conditions are considered. A feature of the engine design is the presence of an electrically conductive screen separating the movable and stationary parts of the engine. The block diagram of the shielded motor is given. The main design parameters are determined and the necessity of taking into account the screen parameters when drawing up the control scheme is justified. It is shown that the construction of a control system can be based on an approach with the representation of voltages, currents and flow couplings in an asynchronous converter in the form of spatial vectors.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, векторное описание, система управления.

**Key words:** asynchronous motor, vector description, control system.

**Введение.** Повышение эффективности электромеханических преобразователей, в частности асинхронных электродвигателей с экранированным статором, средствами управления связано с необходимостью учёта большого числа параметров, степень влияния которых на начальном этапе слабо определена. Для синтеза системы управления экранированным асинхронным электродвигателем (ЭАД) теоретической основой является знание физических процессов электромагнитного преобразования электрической энергии в механическую и тепловую, что наиболее характерно рассматриваемому объекту. Практическая реализация системы управления двигателем с учётом внешних и/или внутренних возмущений предполагает её оптимизацию по заданным критериям качества регулирования в соответствии с особенностями технологического процесса. Техническая сложность объекта управления, которым является экранированный асинхронный двигатель, определяет структуру всей системы управления, а эффективность поведенческого алгоритма зависит от степени учёта взаимодействующих параметров синтезируемой системы [1].

**Объект управления.** Экранированный асинхронный двигатель эффективен при работе в наиболее тяжёлых эксплуатационных условиях. Это подтверждает изучение опыта мировых компаний нефтегазовой отрасли, в частности фирмы Siemens, специализирующейся на создании принципиально новых агрегатированных устройств, имеющих общий герметичный корпус электропривода. Блок частотного регулирования находится в верхней части агрегата, электропривод и исполнительный механизм с установленным на двух герметичных магнитных опорах монолитным валом – в нижней. Лобовые части статорных обмоток отогнуты под углом  $90^\circ$ , короткозамкнутый ротор имеет специальное защитное покрытие и выполнен с медной обмоткой. В зазоре между статором и ротором установлен специальный неподвижный элемент. Практика эксплуатации экранированных агрегатов Siemens показала, что по сравнению с традиционной конструкцией они позволяют существенно повысить герметичность и стойкость к агрессивным средам.

**Математическое описание объекта управления.** На рис. 1 условно представлены основные структурные элементы ЭАД с короткозамкнутым ротором при произвольной величине угла его поворота  $\Theta$ . В обозначениях токов и напряжений значение нижнего индекса идентифицирует принадлежность параметра к переменным статора (1), ротора (2), экрана (x). В случае пространственной симметрии обмоток двигателя допустимо считать:

$$Z_1 = Z_{1A} = Z_{1B} = Z_{1C}; \quad Z_2 = Z_{2a} = Z_{2b} = Z_{2c}; \quad Z_x = Z_{xA} = Z_{xB} = Z_{xC},$$

где  $Z_{1i}, Z_{2i}, Z_{xi}$  – полные сопротивления фазных обмоток статора, ротора и экрана соответственно.

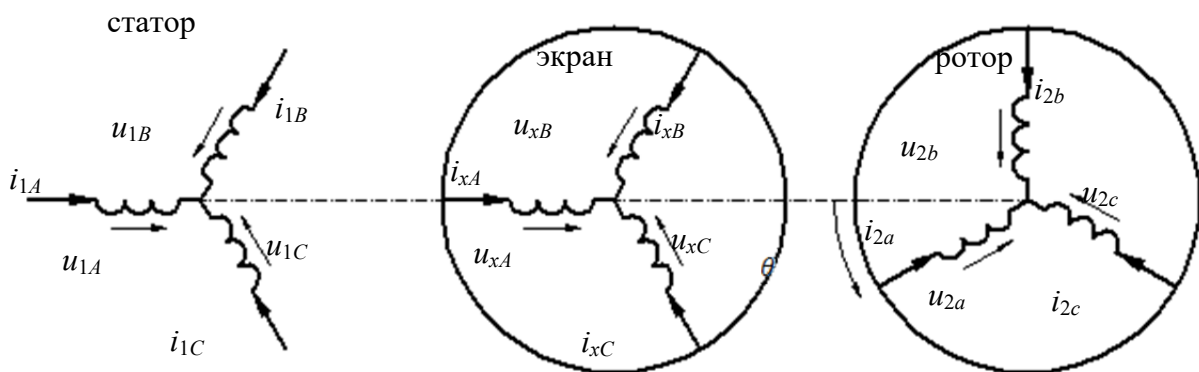


Рис. 1. Обмотки трёхфазного экранированного асинхронного двигателя

При использовании модели обобщённого преобразователя описание электромагнитных процессов производится с учётом замены реального преобразователя эквивалентным. Число витков обмоток с короткозамкнутыми контурами для обеспечения инвариантности магнитного потока

и мощности пересчитывается в соответствии с обмоточными данными первичной. Это обеспечивается неизменностью намагничивающих сил, а также основного потока, связывающего все обмотки ЭАД.

Возможность использования символического метода предполагает учёт только основной гармоники во всех электромагнитных параметрах преобразователя. Соответственно, поток взаимной индукции создаётся намагничивающим током, магнитодвижущая сила – сумма намагничивающих сил всех обмоток. В приведённом ЭАД число витков обмоток с короткозамкнутыми контурами совпадает с обмоточными данными статорной обмотки. Для предварительных расчётов можно принять, что дополнительные потоки (рассеяния) связаны лишь с одной обмоткой. Приведённые значения токов, напряжений и сопротивлений с учётом обмоточных коэффициентов обмоток и числа фаз получены в работах [2; 3]. В соответствии с электромашиностроительной практикой число короткозамкнутых витков ротора 0,5, при этом каждый стержень обмотки образует одну фазу, т. е. число пазов равно числу фаз [4–6]. Для экрана отсутствует распределение по пазам, поэтому число фаз экрана равно  $m_1$ . Обмоточный коэффициент первой гармоники статора принимается равным 0,93, обмоточный коэффициент короткозамкнутых обмоток равен 1 [4].

Поток взаимной индукции наводит пропорциональную числу витков каждой обмотки электро-движущую силу (ЭДС). Выше отмечено, что короткозамкнутые обмотки ротора и экрана приведены к обмотке статора, соответственно, уравнения равновесия ЭДС по второму закону Кирхгофа в одной части обращаются в нуль. Если частота напряжения регулируется относительно номинальной (частотное управление), то удобно рассматривать определяемую угловой скоростью относительную частоту.

Анализ переходных процессов в экранированном преобразователе возможен при учёте следующих факторов:

1. Многофазная система симметрична, параметры нулевой последовательности отсутствуют, сумма значений фазных токов в один и тот же момент времени равна нулю.

2. Отсутствует искажение синусоидальности намагничивающих сил по внутренней поверхности статора ЭАД.

3. За пределами активной длины статора источники магнитного поля отсутствуют.

4. Магнитное поле рассматривается только нормальной компонентой, которая равномерно и гармонически изменяется в области расчётной длины и неизменна по толщине экрана.

5. Экран имеет магнитную проницаемость  $\mu_0$ .

Для оценки влияния экрана преобразователь можно рассмотреть с положения обобщённой машины [6]. Экранированный двигатель имеет ряд особенностей, отличающих его от традиционных устройств:

1. Использование экрана приводит к увеличению немагнитного зазора между статором и ротором.

2. Возрастает отношение активной длины магнитопровода к полюсному делению с целью снижения потерь в экране статора.

3. Для достижения требуемой устойчивости вал изготавливается фактически массивным.

4. Для исключения деформации экрана из-за внутреннего давления требуется полузакрытое или закрытое исполнение пазов статора.

**Синтез системы управления на основе векторного описания объекта управления.**

Синтез системы управления экранированным электромагнитным преобразователем возможен на основе следующих подходов: обобщённого двухфазного преобразователя, обобщённого пространственного вектора и преобразованием фазовых и координатных переменных состояния.

Векторное описание объекта управления учитывает все три фазы, что соответствует реальному физическому процессу. Фазы  $B$  и  $C$  сдвинуты во временном пространстве относительно обмотки фазы  $A$  соответственно на электрический угол  $2\pi/3$  и  $4\pi/3$ . Полные потокосцепления обмоток фаз создаются током рассматриваемой обмотки и токами в остальных обмотках.

Исходная система уравнений в матричной форме содержит матрицы-столбцы мгновенных значений фазных напряжений, связанных токов и потокосцеплений. Введение функционала в виде

собственной индуктивности обмоток, определяемой главными потокосцеплениями и потокосцеплениями в смежных фазах, наиболее целесообразно при частотном регулировании электропривода [7]. Для симметричного режима работы достаточно учесть одну фазу двигателя, т. к. токи нулевой последовательности отсутствуют.

Токи обмоток в исходных уравнениях посредством взаимной индуктивности, являющейся функцией угла  $\gamma$  (поворота ротора), влияют на потокосцепления каждой обмотки.

Уравнения связи потокосцеплений и токов в матричной форме:

$$\langle \Psi_1 \rangle = |L_1| \langle i_1 \rangle + |L_{12}| \langle i_1 \rangle + |L_{1x}| \langle i_1 \rangle;$$

$$\langle \Psi_2 \rangle = |L_{21}| \langle i_1 \rangle + |L_2| \langle i_1 \rangle + |L_{2x}| \langle i_1 \rangle;$$

$$\langle \Psi_x \rangle = |L_{x1}| \langle i_1 \rangle + |L_{x2}| \langle i_1 \rangle + |L_x| \langle i_1 \rangle,$$

где  $|L_1|$ ,  $|L_2|$ ,  $|L_x|$  – матрицы индуктивностей,

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{1\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{1\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{1\sigma} \end{bmatrix};$$

$$[L_2] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{2\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{2\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{2\sigma} \end{bmatrix};$$

$$[L_x] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} + L_{x\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{x\sigma} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} + L_{x\sigma} \end{bmatrix}.$$

В каждой матрице первая строка представляет коэффициенты для мгновенных значений токов фазы. Остальные строки матрицы  $[L_i]$  учитывают фазовый сдвиг  $B$  и  $C$  относительно фазы  $A$  статора, матрицы  $[L_1]$  – фаз ротора в пространстве.

Матрицы взаимоиндуктивностей, учитывающих влияние токов обмоток:

$$[L_{12}] = [L_{x2}] = L_{m\phi} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos\gamma & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos\gamma \end{bmatrix};$$

$$[L_{21}] = [L_{2x}] = L_{m\phi} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos\gamma & \cos(\gamma - 2\pi/3) \\ \cos(\gamma - 2\pi/3) & \cos(\gamma + 2\pi/3) & \cos\gamma \end{bmatrix};$$

$$[L_{1x}] = [L_{x1}] = \begin{bmatrix} L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} \\ -\frac{1}{2}L_{m\phi} & -\frac{1}{2}L_{m\phi} & L_{m\phi} \end{bmatrix}.$$

Основное поле статора создаётся суммой пульсирующих полей фазных обмоток, которые, как принято выше, изменяются по гармоническому закону. Ток синусоидален, индукция и намагничивающая сила создают вращающийся вектор, который является векторной суммой намагничивающих сил фаз. Аналогично определение пространственного вектора для других трёхфазных переменных: напряжений, токов, потокосцеплений. Применительно к комплексной плоскости рассматривая в качестве вещественной ось обмотки фазы  $A$ , выражение для пространственного вектора можно записать в виде

$$\vec{F} = \frac{2}{3} \left( F_A + F_B e^{\frac{j2\pi}{3}} + F_C e^{\frac{j4\pi}{3}} \right);$$

где  $F_i$  – мгновенное значение намагничивающей силы в соответствующей фазе.

Модифицированный вектор

$$\vec{F} = \langle a \rangle^T \begin{bmatrix} F_{1A} \\ F_{1B} \\ F_{1C} \end{bmatrix}; \langle a \rangle^T = 2/3 [1 \quad a \quad a^2],$$

где  $a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$ .

Рассматривая плоскость комплексного переменного в осях  $x - y$ , связанных со статором,  $\vec{F}$  можно разложить на проекции в декартовых координатах:

$$\vec{F} = f_{1x} + jf_{1y}.$$

В неподвижной системе координат переменные с индексами «1» и «x» имеют скорость  $w_0$ , переменные с индексом «2» – скорость  $w_2$ , равную частоте электродвижущей силы ротора с учётом вращения последнего со скоростью, пропорциональной числу пар полюсов. В подвижной системе координат  $d - q$ , связанных с обмоткой «2», переменные ротора вращаются со скоростью  $w_2$  относительно самого ротора.

Для синтеза системы управления экранированным асинхронным двигателем представленные выше уравнения приводятся к вращающейся с синхронной скоростью системе координат  $\alpha - \beta$ .

Векторное описание объекта управления во вращающейся с синхронной скоростью системе координат имеет вид

$$\begin{aligned} 0 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + jw_2 \vec{\Psi}_2; \quad 0 = R_x \vec{I}_x + \frac{d\vec{\Psi}_x}{dt} + jw_0 \vec{\Psi}_x; \quad \vec{\Psi}_1 = L_1 \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x; \\ \vec{\Psi}_2 = L_m \vec{I}_1 + L_2 \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x; \quad \vec{\Psi}_x = L_m \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_x \vec{I}_x; \quad \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p (\vec{I}_2 \cdot \vec{\Psi}_m) \right). \end{aligned} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) управляющими воздействиями (внешними) являются составляющие пространственного вектора напряжения и частота. Это не позволяет принять последнюю величину за неизвестную переменную, поэтому выбранную систему необходимо преобразовать в связанную с потокосцеплением  $\Psi_2$ . Синхронно вращающееся по отношению к неподвижной системе  $x - y$  потокосцепление  $\Psi_2$  представляет сигнал постоянного тока в системе  $\alpha - \beta$ , сдвинутый относительно оси  $\alpha$  на угол  $\gamma_1$ .

Комплексная форма пространственного вектора при совмещении действительной оси с  $\alpha$ , а мнимой – с  $\beta$  имеет вид

$$\vec{\Psi}_2 = \Psi_{2a} + j\Psi_{2b}.$$

Мгновенное значение угла поворота вращающейся системы координат  $\alpha - \beta$  оставляет систему уравнений без изменений, его влияние заключается в соотношении на оси координат  $\alpha - \beta$  проекций вектора. Для согласования системы координат по  $\vec{\Psi}_2$  необходимо уравнение [8, 9]

$$\Psi_{2b} = 0.$$

Соответственно, уравнение электрического равновесия для ротора

$$0 = R_2 \vec{I}_2 + \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} + jw_2 \vec{\Psi}_2 \rightarrow \frac{d\vec{\Psi}_2}{dt} = -R_2 i_{2a}; w_0 = \frac{R_2 i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_n w.$$

Вектор намагничивающего тока:

$$\vec{I}_m = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_x.$$

Система (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{\Psi}_1}{dt} &= \vec{U}_1 - R_1 \vec{I}_1 - jw_0 \vec{\Psi}_1; \quad \frac{d\Psi_{2a}}{dt} = -R_2 i_{2a}; \quad \frac{d\vec{\Psi}_x}{dt} = -R_x \vec{I}_x - jw_0 \vec{\Psi}_x; \\ \vec{I}_1 &= L_{1\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_1 - \vec{\Psi}_m); \quad \vec{I}_2 = L_{2\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_2 - \vec{\Psi}_m); \quad \vec{I}_x = L_{x\sigma}^{-1}(\vec{\Psi}_x - \vec{\Psi}_m); \\ \vec{\Psi}_m &= L_m \vec{I}_1 + L_m \vec{I}_2 + L_m \vec{I}_x; \quad w_0 = \frac{R_2 i_{2b}}{\Psi_{2a}} + p_n w; \quad \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_n (\vec{I}_2 \cdot \vec{\Psi}_m) - M_c \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Система уравнений (2) дополнена уравнением движения, обусловленным взаимодействием тока  $\vec{I}_2$  с потокоцеплением  $\vec{\Psi}_m$  с учётом момента инерции  $J$  и момента нагрузки  $M_c$ , включающего механические потери двигателя.

Такими образом, при описании ЭАД вращающимися синхронно с системой координат пространственными векторами входные переменные идентифицируются сигналами постоянного тока, изменяющимися только при переходных процессах [9]. Управляющим является пространственный вектор  $\vec{U}_1$ , частота которого  $w_0$  определяется скоростью  $w$  и частотой  $w_2$  и не является управляющим воздействием.

Модель может быть уточнена за счёт учёта изменения степени насыщения магнитной цепи, которое является одной из причин вариативности индуктивных сопротивлений обмоток и коэффициентов в дифференциальных уравнениях. Считая, что насыщение проявляется в изменении коэффициента, связывающего основной магнитный поток и намагничивающий ток, при этом между потоками рассеяния и токами связь соответствует ненасыщенной машине с постоянными индуктивностями рассеяния  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}, L_{x\sigma}$  [9], полные индуктивности можем записать следующим образом:

$$L_1 = L_{1\sigma} + k_\Psi(\Psi_m)L_m; \quad L_2 = L_{2\sigma} + k_\Psi(\Psi_m)L_m; \quad L_x = L_{x\sigma} + k_\Psi(\Psi_m)L_m.$$

Изменение активного и индуктивного сопротивлений учитывается коэффициентами, характеризующими эффект вытеснения.

Индуктивность обмотки ротора

$$L_2 = k_x L_{2\pi} + k_\Psi L_m,$$

где  $L_{2\pi}$  – индуктивность обмотки при неподвижном роторе.

Активное сопротивление ротора

$$R_2 = k_x R_{2\pi},$$

где  $R_{2\pi}$  – сопротивление обмотки при неподвижном роторе.

**Система управления в MATLAB Simulink.** Имитационная схема динамической модели объекта моделирования в среде моделирования MATLAB Simulink приведена на рис. 2. В ней учтено, что описание динамических процессов использует сигналы в комплексной форме; нелинейности модели на каждом шаге итерации учитываются активными сопротивлениями и индуктивностями всех обмоток, индуктивностью намагничивающего контура.

Питание подаётся от симметричной системы трёхфазного напряжения, генерируемого блоком «Источник напряжения».

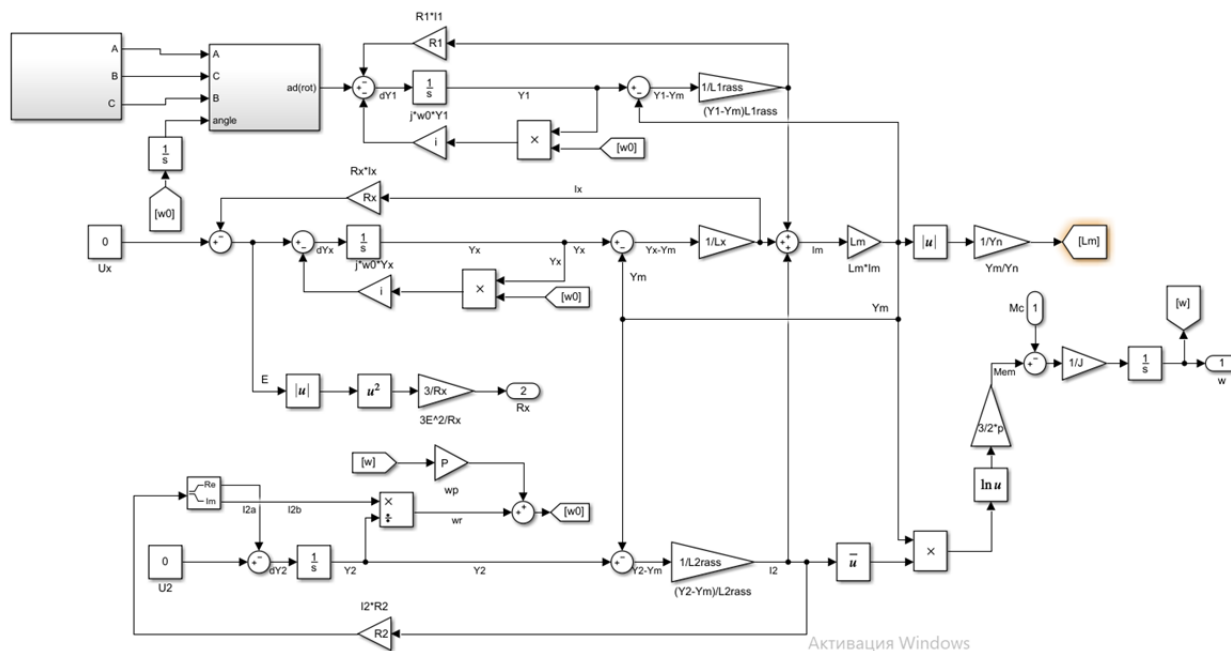


Рис. 2. Модель системы управления экранированного преобразователя

Переход в систему координат  $\alpha - \beta$  обеспечивает «Преобразователь фаз». Трёхфазная система напряжений переводится в двухфазную  $x - y$  прямым преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix},$$

в двухосную вращающуюся – преобразованием Парка:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix}.$$

Комплексный вид питающего напряжения:

$$U_1 = U_\alpha + jU_\beta.$$

Обратное преобразование позволяет перейти к значениям фазных величин:

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A_A \\ A_B \\ A_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix},$$

где  $A_i$  – амплитуда переменной в соответствующей системе координат.

На рис. 3 приведена визуализация механических характеристик экранированного двигателя, выполненных в двух программных средах. Из рисунка видно, что изменение сопротивления экрана неоднозначно влияет на электромагнитный момент. При достаточно большом активном сопротивлении экрана  $R_x$  характеристики экранированного двигателя практически совпадают с характе-

ристикami обычного преобразователя. Также полученные результаты подтверждают незначительное влияние индуктивности на механические характеристики. Расчёт переходных процессов в пакете MATLAB Simulink показал, что уменьшение активного сопротивления экрана приводит к снижению динамики системы. При использовании материалов экрана с низким электрическим сопротивлением динамические характеристики системы ухудшаются не менее чем на 20 %. Это указывает, что при оптимизации ЭАД средствами управления целесообразно использование подходов на основе нечёткой логики и/или нейронных сетей, поскольку позволит обойти математические неопределённости модели и повысить устойчивость работы [11; 12].

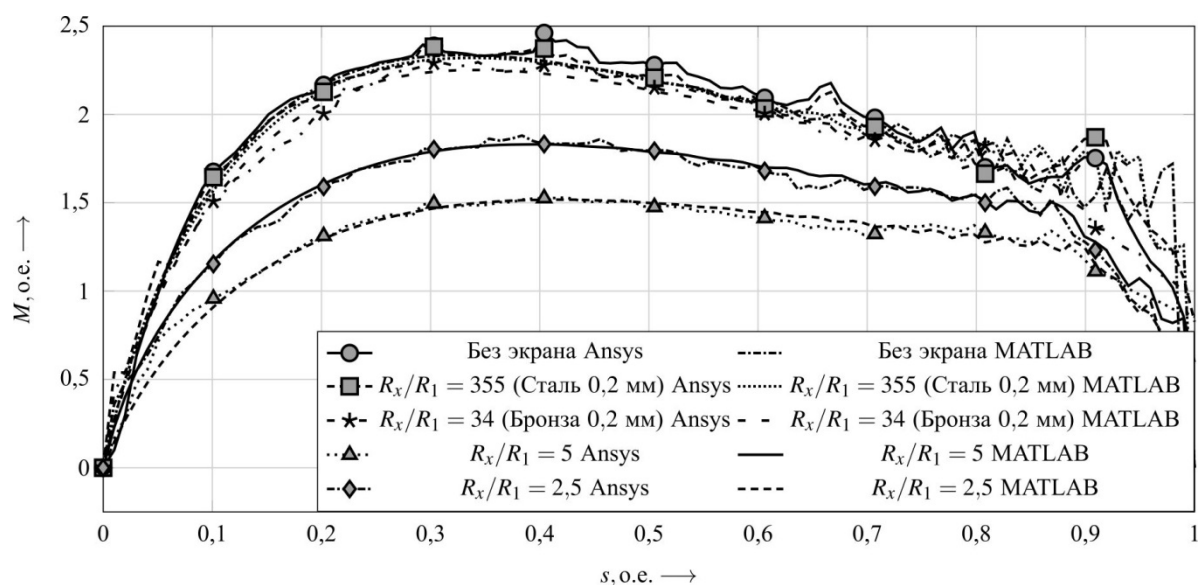


Рис. 3. Влияние параметров экрана на механические характеристики при различных  $R_x$

**Заключение.** Реализация системы управления экранированным электромеханическим преобразователем на основе описания его параметров пространственными векторами зависит от точности нахождения определяющих коэффициентов математической модели. Оценка влияния экрана необходима как для обеспечения устойчивости системы, так и для достижения заданных регуляционных характеристик. Математическая модель, полученная на основе векторного описания объекта управления с учётом принятых допущений, реализована в системе управления экранированным асинхронным двигателем при вариативной параметризации экрана. Основными входными величинами её формирования являются первичные напряжения, размерные соотношения, обмоточные данные. Модель позволяет учесть нелинейность коэффициентов, связанных с определяемыми активными сопротивлениями, индуктивностями, взаимными индуктивностями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голоколов, Д. А. Повышение эффективности совмещённых энергетических комплексов переменного тока средствами управления / Д. А. Голоколов, С. Н. Иванов // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды Всероссийской научно-практической конференции (г. Хабаровск, 25-27 сентября 2013 г.). — Хабаровск: ДВГУПС, 2013. — С. 104-110.
2. Голоколов, Д. А. Исследование характеристик экранированного асинхронного двигателя / Д. А. Голоколов, Г. М. Гринфельд, К. К. Ким // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 4. — С. 33-36.
3. Голоколов, Д. А. Энергетические соотношения в герметичных электротехнических комплексах специального назначения / Д. А. Голоколов, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. — 2014. — № III-1 (19). — С. 4-10.
4. Беспалов, А. В. Проектирование асинхронного двигателя общего назначения короткозамкнутым ротором: учеб. пособие / А. В. Беспалов. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2012. — 154 с.



5. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов [и др.]. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.
6. Уайт, Д. С. Электромеханическое преобразование энергии / Д. С. Уайт, Г. Х. Вудсон; под ред. С. В. Страхова; пер. с англ. Л. А. Ильинского, В. К. Садовского. – Л.: Энергия, 1964. – 528 с.
7. Барыльник, Д. В. Математическое описание и моделирование систем компенсации силы тяжести с асинхронными частотно-регулируемыми электроприводами / Д. В. Барыльник, О. А. Кравченко, Г. Я. Пятибратов. – Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. техн. ун-т., 2006. – 150 с.
8. Калачев, Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю. Н. Калачев. – СПб.: «ЭФО», 2013. – 63 с.
9. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 272 с.
10. Каган, А. В. Математическое моделирование в электромеханике. Ч. 2. Письменные лекции / А. В. Каган. – СПб.: Сев.-Зап. гос. заочн. техн. ун-т, 2002. – 73 с.
11. Имитационная модель трёхточечного узла процесса формования листового материала электромеханического типа / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, В. В. Тетерин, Чжо Аунг Хтет // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № II. – С. 86-90.
12. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объёмного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.