

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ ПО ЦЕПИ РОТОРА

Введение. Для качественного векторного полеориентированного управления асинхронной машиной (АМ) по роторной цепи необходима идентификация опорного вектора потокосцепления и механических координат: угла поворота ротора и скорости. Современный подход заключается в создании вычислительных алгоритмов, использующих сигналы с датчиков фазных токов и напряжений статора и ротора АМ для проведения идентификации этих координат без переделки серийных или изготовления специальных двигателей со встроенными внутри датчиками магнитного потока и без установки на валу АМ вращающихся механических датчиков. Такие технические решения позволяют упростить конструктивное исполнение АМ, снижают эксплуатационные расходы в обслуживании и расширяют область применения электроприводов на запылённые и агрессивные среды, где затруднено применение прецизионных микромашин, каковыми являются датчики скорости и угла поворота.

Постановка задач исследования. Цель настоящей статьи состоит в разработке одного из возможных алгоритмов идентификации координат и параметров АМ с векторным полеориентированным управлением по ротору.

Материалы исследования. В начале рассмотрим возможный способ формирования расчётных соотношений для определения положения ротора. Основная идея заключается в том, что протекающие в электрической машине электромагнитные процессы содержат информацию о требуемых механических переменных, которая может быть получена путём измерения электрических параметров статора и ротора.

Пусть дана обобщённая переменная $\bar{\xi}$, представляющая некоторый вектор напряжения, потокосцепления или тока, которая может быть записана в двух системах координат: $\alpha\beta(\bar{\xi}_{\alpha\beta})$ и $dq(\bar{\xi}_{dq})$. Известно, что для любого вектора $\bar{\xi}$ функции $\bar{\xi}_{\alpha\beta}$ и $\bar{\xi}_{dq}$ связаны соотношением

$$\bar{\xi}_{dq} e^{j\gamma} = \bar{\xi}_{\alpha\beta}, \text{ или } \xi^2 e^{j\gamma} = \bar{\xi}_{\alpha\beta} \bar{\xi}_{dq}^*, \quad (1)$$

где $\bar{\xi}_{dq}^*$ – комплекс, сопряжённый $\bar{\xi}_{dq}$.

Перейдём в (1) от векторной формы записи к проекциям векторов

$$e^{j\gamma} = \cos \gamma + j \sin \gamma = \frac{(\xi_{\alpha} + j\xi_{\beta})(\xi_d - j\xi_q)}{\xi^2} = \frac{\xi_{\alpha}\xi_d + \xi_{\beta}\xi_q}{\xi^2} + j \frac{\xi_{\beta}\xi_d - \xi_{\alpha}\xi_q}{\xi^2}, \quad (2)$$

где γ – угол поворота оси d ротора относительно оси α статора в электрических радианах.

Тогда значения косинуса и синуса угла поворота оси d ротора относительно оси α статора будут определяться по формулам

$$\cos \gamma = \frac{\xi_{\alpha}\xi_d + \xi_{\beta}\xi_q}{\xi^2}; \quad \sin \gamma = \frac{\xi_{\beta}\xi_d - \xi_{\alpha}\xi_q}{\xi^2}. \quad (3)$$

Тангенс угла γ будет

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\xi_{\beta}\xi_d - \xi_{\alpha}\xi_q}{\xi_{\alpha}\xi_d + \xi_{\beta}\xi_q}. \quad (4)$$

С другой стороны, с целью получения формулы для определения скорости ротора можно записать

$$\frac{d \operatorname{tg} \gamma}{dt} = \frac{d\gamma/dt}{\cos^2 \gamma} = \frac{\omega}{\cos^2 \gamma} = \frac{\omega \xi^4}{(\xi_{\alpha}\xi_d + \xi_{\beta}\xi_q)^2}. \quad (5)$$

Дифференцируя выражение (4) и проводя упрощения, будем иметь

$$\frac{d \operatorname{tg} \gamma}{dt} = \frac{d \left(\frac{\xi_{\beta}\xi_d - \xi_{\alpha}\xi_q}{\xi_{\alpha}\xi_d + \xi_{\beta}\xi_q} \right)}{dt} = \frac{(\xi'_{\beta}\xi_{\alpha} + \xi'_d\xi_q - \xi'_{\alpha}\xi_{\beta} - \xi'_q\xi_d)\xi^2}{(\xi_{\alpha}\xi_d + \xi_{\beta}\xi_q)^2}. \quad (6)$$

Если приравнять результаты преобразований (5) и (6) и разрешить полученное тождество относительно скорости вращения ротора, то придём к соотношению для её определения

$$\omega = \frac{\xi'_{\beta}\xi_{\alpha} - \xi_{\beta}\xi'_{\alpha}}{\xi^2} - \frac{\xi'_q\xi_d - \xi_q\xi'_d}{\xi^2}. \quad (7)$$

Первое слагаемое в (7) представляет скорость вращения вектора $\bar{\xi}$ относительно оси α , а второе слагаемое в этом выражении определяет скорость вращения вектора $\bar{\xi}$ относительно оси d .

Уравнения равновесия напряжений статорной и роторной цепей асинхронной машины имеют вид

$$\vec{U}_s = p\vec{\Psi}_s + j\omega_k\vec{\Psi}_s + R_s\vec{I}_s; \quad \vec{U}_r = p\vec{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega)\vec{\Psi}_r + R_r\vec{I}_r, \quad (8)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; ω_k – скорость вращения системы координат.

При ориентации системы управления по вектору потокосцепления статора $\vec{\Psi}_s$ переменную $\vec{\xi}$ отождествим с этим вектором. Получим соотношения для определения проекций опорного вектора $\vec{\Psi}_s$ на координатные оси α, β и d, q .

Полагая $\omega_k = 0$, переходим в систему координат α, β , в которой уравнение равновесия напряжений статорной цепи в скалярной форме запишется так:

$$U_{s\alpha} = p\Psi_{s\alpha} + R_s I_{s\alpha}; \quad U_{s\beta} = p\Psi_{s\beta} + R_s I_{s\beta}. \quad (9)$$

Уравнения электрического равновесия роторной цепи в осях d, q при $\omega_k = \omega$ имеют вид

$$U_{rd} = p\Psi_{rd} + R_r I_{rd}; \quad U_{rq} = p\Psi_{rq} + R_r I_{rq}. \quad (10)$$

Соотношения для потокосцеплений в осях dq

$$\begin{aligned} \Psi_{sd} &= L_s I_{sd} + L_m I_{rd}; & \Psi_{rd} &= L_r I_{rd} + L_m I_{sd}; \\ \Psi_{sq} &= L_s I_{sq} + L_m I_{rq}; & \Psi_{rq} &= L_r I_{rq} + L_m I_{sq}. \end{aligned} \quad (11)$$

Выразим из первой пары уравнений проекции тока статора и подставим их значения в следующие два уравнения. Тогда после преобразований получим

$$\Psi_{rd} = k_s \Psi_{sd} + L_\delta I_{rd}; \quad \Psi_{rq} = k_s \Psi_{sq} + L_\delta I_{rq}, \quad (12)$$

где $L_\delta = (L_s L_r - L_m^2) / L_s$; $k_s = L_m / L_s$.

Если в формулах (10) вместо Ψ_{rd} и Ψ_{rq} записать выражения (12), то получим

$$U_{rd} = k_s p\Psi_{sd} + L_\delta pI_{rd} + R_r I_{rd}; \quad U_{rq} = k_s p\Psi_{sq} + L_\delta pI_{rq} + R_r I_{rq}. \quad (13)$$

Расчётные зависимости (3) для вектора $\vec{\Psi}_s$ запишутся таким образом:

$$\cos \gamma = \frac{\hat{\Psi}_{s\alpha} \hat{\Psi}_{sd} + \hat{\Psi}_{s\beta} \hat{\Psi}_{sq}}{\hat{\Psi}_s^2}; \quad \sin \gamma = \frac{\hat{\Psi}_{s\beta} \hat{\Psi}_{sd} - \hat{\Psi}_{s\alpha} \hat{\Psi}_{sq}}{\hat{\Psi}_s^2}, \quad (14)$$

где $\hat{\Psi}_{s\alpha} = \int (U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt$; $\hat{\Psi}_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt$; (15)

$$\hat{\Psi}_{sd} = \frac{1}{k_s} \int (U_{rd} - R_r I_{rd}) dt - L_\delta I_{rd}; \quad \hat{\Psi}_{sq} = \frac{1}{k_s} \int (U_{rq} - R_r I_{rq}) dt - L_\delta I_{rq}; \quad L_\delta = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m}; \quad (16)$$

Соотношения (15), (16) вытекают из выражений (9) и (13) при интегрировании их относительно оценок проекций вектора потокосцепления статора.

Скорость вращения ротора вычисляется по формуле (7), которая принимает вид

$$\omega = \frac{p\hat{\Psi}_{s\beta} \hat{\Psi}_{s\alpha} - \hat{\Psi}_{s\beta} p\hat{\Psi}_{s\alpha} - p\hat{\Psi}_{sq} \hat{\Psi}_{sd} - \hat{\Psi}_{sq} p\hat{\Psi}_{sd}}{\hat{\Psi}_s^2}, \quad (17)$$

где $p\hat{\Psi}_{s\alpha} = U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}$; $p\hat{\Psi}_{s\beta} = U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}$; (18)

$$p\hat{\Psi}_{sd} = \frac{U_{rd} - R_r I_{rd}}{k_s} - L_\delta pI_{rd}; \quad p\hat{\Psi}_{sq} = \frac{U_{rq} - R_r I_{rq}}{k_s} - L_\delta pI_{rq}. \quad (19)$$

Формулы (18), (19) получаются из выражений (9) и (13) при разрешении их относительно производных проекций потокосцепления статора.

Если под величиной $\vec{\xi}$ понимать векторы токов \vec{I}_r или \vec{I}_s , то расчётные соотношения (3) примут вид:

$$\cos \gamma = \frac{I_{rd} \hat{I}_{r\alpha} + I_{rq} \hat{I}_{r\beta}}{I_r^2}; \quad \sin \gamma = \frac{I_{rd} \hat{I}_{r\beta} - I_{rq} \hat{I}_{r\alpha}}{I_r^2}, \quad (20)$$

или

$$\cos \gamma = \frac{I_{s\alpha} \hat{I}_{sd} + I_{s\beta} \hat{I}_{sq}}{I_s^2}; \quad \sin \gamma = \frac{I_{s\beta} \hat{I}_{sd} - I_{s\alpha} \hat{I}_{sq}}{I_s^2}, \quad (21)$$

где составляющие $I_{s\alpha}, I_{s\beta}, I_{rd}, I_{rq}$ поддаются измерению, а оценки проекций $\hat{I}_{r\alpha}, \hat{I}_{r\beta}, \hat{I}_{sd}, \hat{I}_{sq}$ вычисляются по формулам

$$\hat{I}_{r\alpha} = \frac{1}{L_m} \int (U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt - \frac{I_{s\alpha}}{k_s}; \quad \hat{I}_{r\beta} = \frac{1}{L_m} \int (U_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt - \frac{I_{s\beta}}{k_s}; \quad (22)$$

$$\hat{I}_{sd} = \frac{1}{L_m} \int (U_{rd} - R_r I_{rd}) dt - \frac{I_{rd}}{k_r}; \quad \hat{I}_{sq} = \frac{1}{L_m} \int (U_{rq} - R_r I_{rq}) dt - \frac{I_{rq}}{k_r}. \quad (23)$$

Из зависимостей (14)-(23) следует, что для определения механических координат требуется информация о текущих значениях параметров схемы замещения АМ. Существенный недостаток методов идентификации состоит в необходимости на практике ухода от идеального интегрирования, встречающегося в зависимостях (15), (16), (22), (23), для избежания накопления ошибки при интегрировании. Особенно это необходимо при низких частотах, когда вследствие увеличенного периода изменения напряжений и токов вносимая погрешность при интегрировании наиболее значительна. Поэтому важно иметь точные значения параметров АМ, и в первую очередь тех, которые входят в подынтегральные выражения расчётных формул, а именно активных сопротивлений фазных обмоток статора и ротора. Технически проще всего уменьшение дрейфа интегратора достигается его охватом слабой отрицательной обратной связью. Однако указанное приближённое интегрирование даёт хорошие результаты в области верхних частот и вносит дополнительные погрешности по мере уменьшения частоты [1,2]. Следовательно, при построении вычислительных алгоритмов идентификации количество операций интегрирования нужно свести к минимуму, а в подынтегральных выражениях избегать переменных ротора в осях d,q.

Руководствуясь указанными критериями, предлагается для построения вычислительного алгоритма выбрать соотношения (20) и (22), в которых присутствуют только две операции интегрирования в отличие от выражений (14)-(16) и не интегрируются переменные ротора как в (14)-(16) или (21), (23).

Системы управления АМ со стороны ротора часто ориентируются по вектору потокосцепления статора $\vec{\Psi}_s$. Исходя из этого предположения, сформированы расчётные соотношения (14)-(23). В таком случае задачи определения механических координат АМ и текущего положения опорного вектора потокосцепления $\vec{\Psi}_s$ могут быть совмещены в одном вычислительном алгоритме, а базовыми для вычисления указанных величин будут следующие уравнения:

$$\hat{\Psi}_{s\alpha} = \int (U_{s\alpha} - \hat{R}_s I_{s\alpha}) dt; \quad \hat{\Psi}_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - \hat{R}_s I_{s\beta}) dt; \quad \hat{\Psi}_s = \sqrt{\hat{\Psi}_{s\alpha}^2 + \hat{\Psi}_{s\beta}^2}; \quad \overline{\cos \delta} = \frac{\hat{\Psi}_{s\alpha}}{\hat{\Psi}_s}; \quad \overline{\sin \delta} = \frac{\hat{\Psi}_{s\beta}}{\hat{\Psi}_s}; \quad (24)$$

$$\overline{\cos \gamma} = \frac{I_{rd} \hat{I}_{r\alpha} + I_{rq} \hat{I}_{r\beta}}{I_r^2}; \quad \overline{\sin \gamma} = \frac{I_{rd} \hat{I}_{r\beta} - I_{rq} \hat{I}_{r\alpha}}{I_r^2}; \quad \hat{I}_{r\alpha} = \frac{\hat{\Psi}_{s\alpha}}{L_m} - \frac{I_{s\alpha}}{k_s}; \quad \hat{I}_{r\beta} = \frac{\hat{\Psi}_{s\beta}}{L_m} - \frac{I_{s\beta}}{k_s}; \quad (25)$$

$$\hat{\omega} = \frac{p \hat{I}_{r\beta} \hat{I}_{r\alpha} - \hat{I}_{r\beta} p \hat{I}_{r\alpha}}{I_r^2} - \frac{p I_{rq} I_{rd} - I_{rq} p I_{rd}}{I_r^2}; \quad p \hat{I}_{r\alpha} = \frac{U_{s\alpha} - \hat{R}_s I_{s\alpha}}{L_m} - \frac{p I_{s\alpha}}{k_s}; \quad p \hat{I}_{r\beta} = \frac{U_{s\beta} - \hat{R}_s I_{s\beta}}{L_m} - \frac{p I_{s\beta}}{k_s}. \quad (26)$$

Здесь вместо фактического сопротивления фазной обмотки статора R_s используется его оценка \hat{R}_s . При рассогласовании оценки активного сопротивления статора и его действительного значения система может потерять устойчивость вследствие накопления ошибки [3]. Уход активного сопротивления обмоток от номинального значения может происходить, например, в результате нагрева. Поэтому в контексте проблем повышения точности идентификации координат при изменении внутренних параметров объекта управления рассмотрим задачу определения опорного вектора потокосцепления $\vec{\Psi}_s$ при изменении во времени активного сопротивления статора R_s .

Если принять, что координаты математической модели АМ зависят от параметра \hat{R}_s , то полную производную по времени от целевой функции J можно записать так: $\frac{dJ}{dt} = \frac{\partial J}{\partial \hat{R}_s} \frac{d\hat{R}_s}{dt}$. При формировании целевой функции в виде положительно определённой квадратичной формы условие асимптотической устойчивости процесса идентификации изменяющегося параметра \hat{R}_s должно быть $\frac{dJ}{dt} < 0$, что выполняется, если

$$\frac{d\hat{R}_s}{dt} = -\lambda \frac{\partial J}{\partial \hat{R}_s}, \quad \lambda > 0, \quad (27)$$

где коэффициент λ задаёт скорость изменения параметра \hat{R}_s , тем самым определяя скорость убывания целевой функции J , являющейся по сути функцией Ляпунова.

Из уравнения (27) настройки параметра \hat{R}_s видно, что параметрическая идентификация осуществляется хорошо известным градиентным методом. В соответствии с этим методом скорость настройки параметров модели пропорциональна скорости изменения критерия качества по этим же параметрам. Применение метода позволяет свести поиск экстремума целевой функции к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений [4,5].

Степень близости модели и объекта задаём критерием самонастройки, который представляет собой некоторую функцию от вектора ошибок, являющихся разностью между измеренными значениями координат АМ и вычисленными идентификатором. Трудность в построении алгоритмов для уточнённого определения характеристик векторов потокосцеплений состоит в том, что указанные характеристики только вычисляются, но не измеряются. Следовательно, если их ввести в состав критерия качества, его величину нельзя будет определить. В таких условиях подходящим оказывается критерий в виде суммы квадратов мгновенных ошибок идентификации проекций токов. Контролируемыми величинами возьмём проекции тока статора на оси α, β . Тогда математическое выражение критерия качества самонастройки будет таким:

$$J = (\hat{I}_{s\alpha} - I_{s\alpha})^2 + (\hat{I}_{s\beta} - I_{s\beta})^2. \quad (28)$$

Частная производная от соотношения (28) по параметру \hat{R}_s с учётом того, что измеряемые значения токов не зависят от него, запишется следующим образом:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{R}_s} = 2(\hat{I}_{s\alpha} - I_{s\alpha}) \frac{\partial \hat{I}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} + 2(\hat{I}_{s\beta} - I_{s\beta}) \frac{\partial \hat{I}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s}. \quad (29)$$

Оценки проекций тока статора $\hat{I}_{s\alpha}$ и $\hat{I}_{s\beta}$ вычисляются при решении уравнений математической модели АМ в осях α, β

$$\begin{aligned} p\hat{\Psi}_{s\alpha} &= U_{s\alpha} - \hat{R}_s \hat{I}_{s\alpha}; & p\hat{\Psi}_{s\beta} &= U_{s\beta} - \hat{R}_s \hat{I}_{s\beta}; \\ p\hat{I}_{s\alpha} &= \left(-\frac{\hat{R}_s}{L'_\delta} - \frac{R_r}{L_\delta} \right) \hat{I}_{s\alpha} - \hat{\omega} \hat{I}_{s\beta} + \frac{\hat{\omega}}{L'_\delta} \hat{\Psi}_{s\beta} + \frac{\hat{\Psi}_{s\alpha}}{L'_\delta T_r} + \frac{U_{s\alpha}}{L'_\delta} - \frac{U_{r\alpha}}{L''_\delta}; \\ p\hat{I}_{s\beta} &= \left(-\frac{\hat{R}_s}{L'_\delta} - \frac{R_r}{L_\delta} \right) \hat{I}_{s\beta} + \hat{\omega} \hat{I}_{s\alpha} - \frac{\hat{\omega}}{L'_\delta} \hat{\Psi}_{s\alpha} + \frac{\hat{\Psi}_{s\beta}}{L'_\delta T_r} + \frac{U_{s\beta}}{L'_\delta} - \frac{U_{r\beta}}{L''_\delta}, \end{aligned} \quad (30)$$

где $L'_\delta = (L_s L_r - L_m^2) / L_r$; $T_r = L_r / R_r$.

Система (30) образовалась дополнением уравнений (9) двумя уравнениями для токов.

Для определения градиента критерия качества контура самонастройки (29) необходимо вычислять функции чувствительности $\partial \hat{I}_{s\alpha} / \partial \hat{R}_s$ и $\partial \hat{I}_{s\beta} / \partial \hat{R}_s$. Эти функции находятся в результате решения уравнений модели чувствительности, которая получается формальным дифференцированием уравнений математической модели объекта (30) относительно варьируемого параметра (в данном случае \hat{R}_s) [6]. Тогда уравнения чувствительности запишутся в виде системы

$$\begin{aligned} p \frac{\partial \hat{\Psi}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} &= -\hat{R}_s \frac{\partial \hat{I}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} - \hat{I}_{s\alpha}; & p \frac{\partial \hat{\Psi}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} &= -\hat{R}_s \frac{\partial \hat{I}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} - \hat{I}_{s\beta}; \\ p \frac{\partial \hat{I}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} &= \left(-\frac{\hat{R}_s}{L'_\delta} - \frac{R_r}{L_\delta} \right) \frac{\partial \hat{I}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} - \hat{\omega} \frac{\partial \hat{I}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} + \frac{\hat{\omega}}{L'_\delta} \frac{\partial \hat{\Psi}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} + \frac{1}{L'_\delta T_r} \frac{\partial \hat{\Psi}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} - \frac{\hat{I}_{s\alpha}}{L'_\delta}; \\ p \frac{\partial \hat{I}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} &= \left(-\frac{\hat{R}_s}{L'_\delta} - \frac{R_r}{L_\delta} \right) \frac{\partial \hat{I}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} + \hat{\omega} \frac{\partial \hat{I}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} - \frac{\hat{\omega}}{L'_\delta} \frac{\partial \hat{\Psi}_{s\alpha}}{\partial \hat{R}_s} + \frac{1}{L'_\delta T_r} \frac{\partial \hat{\Psi}_{s\beta}}{\partial \hat{R}_s} - \frac{\hat{I}_{s\beta}}{L'_\delta}. \end{aligned} \quad (31)$$

Таким образом, решаются системы уравнений (30), (31) и находятся величины $\hat{I}_{s\alpha}$, $\hat{I}_{s\beta}$, $\partial \hat{I}_{s\alpha} / \partial \hat{R}_s$, $\partial \hat{I}_{s\beta} / \partial \hat{R}_s$, после чего они подставляются в выражение (29). Далее траектория изменения во времени параметра \hat{R}_s формируется интегрированием уравнения (27)

$$\hat{R}_s = R_{sh} - \lambda \int_0^\infty \frac{\partial J}{\partial \hat{R}_s} dt, \quad (32)$$

где начальное значение оценки \hat{R}_s принято равным номинальному активному сопротивлению фазы статора. Когда оценка \hat{R}_s станет равной фактическому сопротивлению статора R_s , целевая функция J достигнет минимума, а её градиент примет нулевое значение. При этом переходный процесс $\hat{R}_s(t)$ дойдёт до установившегося уровня $\hat{R}_s = R_s$.

Функциональная схема идентификатора, реализующего разработанный алгоритм, показана на рисунке 1. Внутри блоков указаны обозначения их наименований в соответствии с функциональным назначением и номе-

ра расчётных соотношений, которые они реализуют. С датчиков фазных токов и напряжений статора и ротора АМ сигналы после перевода в ортогональные системы координат α, β и d, q поступают в идентификатор. В вычислительном устройстве ВУ по формулам (24)-(26) находятся оценки механических координат АМ и величины, определяющие опорный вектор потокосцепления статора. Значения синуса и косинуса угла поворота ротора $\overline{\sin \gamma}, \overline{\cos \gamma}$ передаются в координатный преобразователь КП, который пересчитывает проекции вектора напряжения ротора на оси d, q в проекции этого же вектора на оси α, β по формулам

$$U_{r\alpha} = U_{rd} \overline{\cos \gamma} - U_{rq} \overline{\sin \gamma}; \quad U_{r\beta} = U_{rd} \overline{\sin \gamma} + U_{rq} \overline{\cos \gamma}. \quad (33)$$

В блоке модели объекта управления МОУ решается система уравнений (30) при известных входных сигналах напряжений. В звене модели чувствительности МЧ решается система уравнений (31) с использованием оценок проекций тока статора $\hat{I}_{s\alpha}, \hat{I}_{s\beta}$. В МОУ и МЧ подаются вычисленные значения скорости $\hat{\omega}$ из ВУ и активного сопротивления фазы статора \hat{R}_s из блока настройки БН. Величина \hat{R}_s также используется ВУ и в начале вычислительного процесса принимается равной номинальному значению $R_{сн}$. В блоке настройки опреде-

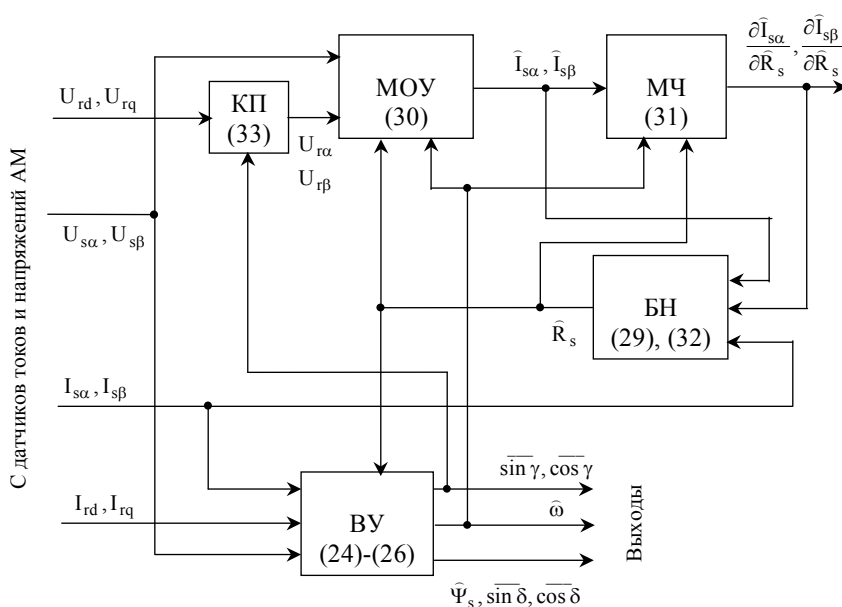


Рисунок 1 - Функциональная схема идентификатора

ляется параметр \hat{R}_s градиентным методом в соответствии с выражениями (29) и (32). Для вычисления градиента целевой функции по настраиваемому параметру (29) в БН поступают вычисленные и измеренные проекции вектора тока статора на оси α, β $\hat{I}_{s\alpha}, \hat{I}_{s\beta}, I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ и функции чувствительности $\partial \hat{I}_{s\alpha} / \partial \hat{R}_s, \partial \hat{I}_{s\beta} / \partial \hat{R}_s$ оценочных значений токов относительно параметра \hat{R}_s .

Таким образом, уравнения (24)-(26), (29)-(32) образуют замкнутую систему, в результате интегрирования которой можно получить оценки активного сопротивления статора R_s , положения и угловой скорости ротора АМ $\sin \gamma, \cos \gamma, \omega$, модуля и направляющих синуса и

косинуса опорного вектора потокосцепления статора $\Psi_s, \sin \delta, \cos \delta$.

Выводы. Разработанный в статье контур параметрической обратной связи обеспечивает процессу идентификации свойство инвариантности к возмущениям оцениваемого параметра и тем самым повышает точность определения координат АМ, далее используемых в системе векторного управления по цепи ротора.

Литература.

1. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. - Днепропетровск: НГУ, 2006. - 470с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. - М.: АСАДЕМА, 2006.- 265с.
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Барац Е.И. Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя /Электротехника.-2001.- №11.
4. Костюк В.И. Беспойсковые градиентные самонастраивающиеся системы. - К.: Техника, 1969. - 276с.
5. Козлов Ю.М., Юсупов Р.М. Беспойсковые самонастраивающиеся системы. - М.: Наука, 1969. - 456с.
6. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464с.