

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 18372

(13) С1

(46) 2014.06.30

(51) МПК

H 02P 23/14 (2006.01)

H 02P 21/14 (2006.01)

G 01R 27/02 (2006.01)

G 01R 31/34 (2006.01)

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

(21) Номер заявки: а 20111807

(22) 2011.12.23

(43) 2013.08.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Автор: Однолько Дмитрий Сергеевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) RU 2374752 C1, 2009.

RU 2385529 C1, 2010.

RU 2402866 C2, 2010.

JPS 5826582 A, 1983.

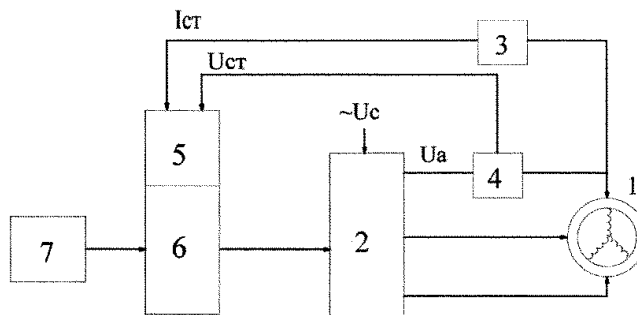
US 2009/021208 A1.

CN 2605580 Y, 2004.

(57)

Способ определения электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя, включающий измерение фазного тока статора и фазного напряжения статора, управление преобразователем, питающим обмотку статора, задание режимов работы с помощью вычислительного устройства через математическую модель параметра управления, при котором в вычислительное устройство предварительно вводят значение индуктивности цепи намагничивания, **отличающийся** тем, что в вычислительное устройство вводят конструктивные параметры асинхронного двигателя в виде активного сопротивления обмотки ротора, индуктивности статора и ротора, а значение электромагнитной постоянной времени ротора вычисляют в режиме неподвижного ротора, при этом подают инвертором на одну фазу обмотки статора постоянное напряжение, определяют в вычислительном устройстве омическое сопротивление статора в соответствии с выражением:

$$R_s((k+1)\Delta t) = R_s^{(0)}(k\Delta t) + (Q_s(k\Delta t)^T Q_s(k\Delta t))^{-1} Q_s(k\Delta t)^T (Z_s(k\Delta t) - Q_s(k\Delta t) \cdot R_s(k\Delta t)),$$



Фиг. 1

где R_s - активное сопротивление статора; $R_s^{(0)}$ - начальное значение активного сопротивления статора; k - номер шага дискретизации; Δt - период обновления сигнала информационного состояния; $(\dots)^T$ - операция транспонирования; величину информационного состояния Q_s определяют в соответствии с выражением:

$$Q_s = \sigma^{-1} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} i_{s\alpha},$$

где $\sigma = L_s \left(1 - L_m^2 / L_s L_r\right)$ - положительная константа; L_m , L_s , L_r - индуктивности соответственно цепи намагничивания, статора и ротора; $i_{s\alpha}$ - ток статора; $\alpha = R_r / L_r$ - величина, обратная электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя; R_r - активное сопротивление ротора; выходной сигнал Z_s определяют в соответствии с выражением:

$$Z_s = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} - \alpha(1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt},$$

где $\beta = L_m / \sigma L_r$ - положительная константа; $u_{s\alpha}$ - напряжение статора; сохраняют полученное значение активного сопротивления статора R_s в вычислительном устройстве; отключают режим неподвижного ротора, вычислительным устройством определяют величину α с учетом информации о величине активного сопротивления статора в соответствии с выражением:

$$\alpha((k+1)\Delta t) = \alpha^{(0)}(k\Delta t) + (Q_\alpha(k\Delta t)^T Q_\alpha(k\Delta t))^{-1} Q_\alpha(k\Delta t)^T (Z_\alpha(k\Delta t) - Q_\alpha(k\Delta t) \alpha(k\Delta t)),$$

где $\alpha^{(0)}$ - начальное значение величины, обратной постоянной времени короткозамкнутого ротора; величину информационного состояния Q_α определяют в соответствии с выражением:

$$Q_\alpha = (1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} R_s i_{s\alpha},$$

а выходной информационный сигнал Z_α определяют в соответствии с выражением:

$$Z_\alpha = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt} - \sigma^{-1} R_s \frac{di_{s\alpha}}{dt};$$

при этом для каждого значения α на каждом такте вычисления вычислительным устройством определяют квадрат ошибки измерения данной величины в соответствии с выражением:

$$E^2(\alpha) = (Z_\alpha(k\Delta t) - Q_\alpha(k\Delta t) \cdot \alpha(k\Delta t))^2,$$

при этом в вычислительном устройстве определяют значение величины обратной электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора α_{\min} , соответствующее минимальному значению среднеквадратичной ошибки, а текущее значение электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора T_R определяют в вычислительном устройстве в соответствии с выражением:

$$T_R = 1/\alpha_{\min}.$$

Изобретение относится к автоматизированному асинхронному электроприводу, в частности к автоматизированной идентификации параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКР), и может найти применение в системах автоматического управления тяговым электроприводом, в электроприводах грузоподъемных машин, прочих частотно-регулируемых электроприводах, характеризующихся повторно-кратковременным режимом работы.

Известен способ определения электромагнитной постоянной времени ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя [1], включающий измерение частоты вращения ротора, фазного тока статора, фазного напряжения статора, частоты вращения магнитного

ВУ 18372 С1 2014.06.30

поля статора, управление преобразователем, питающим обмотку статора, задание режимов работы с помощью вычислительного устройства через математическую модель параметра управления, при этом в вычислительное устройство дополнительно вводят конструктивные параметры асинхронного двигателя в виде активного сопротивления обмотки статора и индуктивности цепи намагничивания, коэффициентов рассеяния магнитных потоков статора и ротора в функции тока статора, в процессе работы вводят информацию об угле фазового сдвига между напряжением и током одной из фаз обмотки статора, а вычислительным устройством определяют электромагнитную постоянную времени ротора по математической формуле, в которую входят все параметры, которые доступны для непосредственного измерения при любом режиме работающего двигателя:

$$T = \frac{|Z_0| \sin \varphi - \omega_1 L_m \sigma_1}{(|Z_0| \cos \varphi - R_1) \omega_{ск} \sigma_2},$$

где $|Z_0|$ - модуль полного сопротивления фазы обмотки статора; равный

$$\left| Z_0 = \frac{U_1}{I_1} \right|,$$

где U_1 - фазное напряжение;

I_1 - фазный ток;

φ - угол фазового сдвига между фазным током I_1 и фазным напряжением U_1 ;

R_1 - активное сопротивление обмотки статора;

$\omega_{ск}$ - частота скольжения ротора относительно частоты вращения магнитного поля статора ω_1 :

$$\omega_{ск} = \omega_1 - \omega_2,$$

где ω_2 - частота вращения ротора;

L_m - индуктивность цепи намагничивания;

σ_1 и σ_2 - коэффициенты рассеяния магнитных потоков статора и ротора соответственно.

Недостатком данного способа является некорректность применения теории полной мощности для анализа несинусоидальных процессов, которые имеют место в частотно-регулируемых электроприводах, ввиду несоответствия ее закону сохранения энергии. К недостаткам относится необходимость в установке датчика частоты вращения ротора. Способ неустойчив к воздействию помех и ложным срабатываниям штатных датчиков. Способ оперирует переменными, определение которых требует привлечения дополнительных вычислительных алгоритмов, которые не предусмотрены.

Задачей предлагаемого способа является снижение вероятности ошибочного определения электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора, а также уменьшение количества используемых датчиков, что ведет к удешевлению его схемы.

Поставленная задача решается тем, что в способе определения электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя, включающем измерение фазного тока статора и фазного напряжения статора, управление преобразователем, питающим обмотку статора, задание режимов работы с помощью вычислительного устройства через математическую модель параметра управления, при котором в вычислительное устройство предварительно вводят значение индуктивности цепи намагничивания, в вычислительное устройство вводят конструктивные параметры асинхронного двигателя в виде активного сопротивления обмотки ротора, индуктивности статора и ротора, а значение электромагнитной постоянной времени ротора вычисляют в режиме неподвижного ротора, при этом подают инвертором на одну фазу обмотки статора постоянное напряжение, определяют в вычислительном устройстве омическое сопротивление статора в соответствии с выражением:

$$R_s((k+1)\Delta t) = R_s^{(0)}(k\Delta t) + \left(Q_s(k\Delta t)^T Q_s(k\Delta t) \right)^{-1} Q_s(k\Delta t)^T (Z_s(k\Delta t) - Q_s(k\Delta t) \cdot R_s(k\Delta t)),$$

где R_s - активное сопротивление статора; $R_s^{(0)}$ - начальное значение активного сопротивления статора; k - номер шага дискретизации; Δt - период обновления сигнала информационного состояния; $(\dots)^T$ - операция транспонирования; величину информационного состояния Q_s определяют в соответствии с выражением:

$$Q_s = \sigma^{-1} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} i_{s\alpha},$$

где $\sigma = L_s (1 - L_m^2 / L_s L_r)$ - положительная константа; L_s, L_r, L_m - индуктивность статора, ротора и цепи намагничивания; $i_{s\alpha}$ - ток статора; $\alpha = R_r / L_r$ - величина, обратная электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя; R_r - активное сопротивление ротора; выходной сигнал Z_s определяют в соответствии с выражением:

$$Z_s = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} - \alpha(1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt},$$

где $\beta = L_m / \sigma L_r$ - положительная константа; $u_{s\alpha}$ - напряжение статора;

сохраняют полученное значение активного сопротивления статора R_s в вычислительном устройстве; отключают режим неподвижного ротора, вычислительным устройством определяют величину α с учетом информации о величине активного статорного сопротивления в соответствии с выражением:

$$\alpha((k+1)\Delta t) = \alpha^{(0)}(k\Delta t) + (Q_\alpha(k\Delta t)^T Q_\alpha(k\Delta t))^{-1} Q_\alpha(k\Delta t)^T (Z_\alpha(k\Delta t) - Q_\alpha(k\Delta t) \alpha(k\Delta t)),$$

где $\alpha^{(0)}$ - начальное значение величины, обратной постоянной времени короткозамкнутого ротора; величину информационного состояния Q_α определяют в соответствии с выражением:

$$Q_\alpha = (1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} R_s i_{s\alpha},$$

а выходной информационный сигнал Z_α определяют в соответствии с выражением:

$$Z_\alpha = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt} - \sigma^{-1} R_s \frac{di_{s\alpha}}{dt};$$

при этом для каждого значения α на каждом такте вычисления вычислительным устройством определяют квадрат ошибки измерения данной величины в соответствии с выражением:

$$E^2(\alpha) = (Z_\alpha(k\Delta t) - Q_\alpha(k\Delta t) \cdot \alpha(k\Delta t))^2,$$

при этом в вычислительном устройстве определяют значение величины обратной электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора α_{\min} , соответствующее минимальному значению среднеквадратичной ошибки, а текущее значение электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора T_R определяют в вычислительном устройстве в соответствии с выражением:

$$T_R = 1/\alpha_{\min}.$$

Выражения для определения активного сопротивления статора и электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора получены следующим образом.

Как известно, электромагнитные процессы в АДКР могут быть описаны в неподвижной относительно статора системе координат (a-b). Когда возбуждена только одна ось а двухфазной машины, ротор остается неподвижным и уравнения динамики электрической части АДКР имеют вид:

$$\begin{aligned} di_{s\alpha}/dt &= -R_s \sigma^{-1} i_{s\alpha} - \alpha(1 + L_m \beta) i_{s\alpha} + \alpha \sigma^{-1} \psi_{s\alpha} + \sigma^{-1} u_{s\alpha}; \\ d\psi_{s\alpha}/dt &= -R_s i_{s\alpha} + u_{s\alpha}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $i_{s\alpha}, u_{s\alpha}, \psi_{s\alpha}$ - ток, напряжение и потокосцепление статора по оси а;

$\sigma = L_s (1 - L_m^2 / L_s L_r)$, $\beta = L_m / \sigma L_r$ - положительные константы;

$\alpha = R_r / L_r$ - величина, обратная электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя;

R_s, R_r - активные сопротивления статора и ротора; L_s, L_r, L_m - индуктивность статора, ротора и цепи намагничивания.

Возьмем производную правой и левой частей первого уравнения системы (1) и подставим в него второе уравнение системы (1):

$$0 = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} - R_s \sigma^{-1} \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \alpha(1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \alpha \sigma^{-1} R_s i_{s\alpha} + \alpha \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt}. \quad (2)$$

К полученному уравнению применяем метод наименьших квадратов, при этом искомым параметром задается активное сопротивление статора R_s .

Алгоритм идентификации методом наименьших квадратов построен на том, что оценка искомого параметра определяется из условия минимума суммы квадратов ошибок измерений согласно известному статистическому методу обработки данных:

$$F(R_s) = E^2(R_s) = (Z_S - W(R_s, i_{s\alpha}, u_{s\alpha}))^T (Z_S - W(R_s, i_{s\alpha}, u_{s\alpha})) \rightarrow \min_{R_s}, \quad (3)$$

где $F(R_s)$ - критерий оптимальности метода наименьших квадратов;

$E(R_s)$ - ошибка измерений R_s ;

$(\dots)^T$ - операция транспонирования;

$$Z_S = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} - \alpha(1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt};$$

$$W(R_s, i_{s\alpha}, u_{s\alpha}) = \left(\sigma^{-1} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \alpha \sigma^{-1} i_{s\alpha} \right) \times R_s = Q_S \times R_s.$$

Решение оптимизационной задачи (3) позволяет получить аналитическое выражение для оценки активного сопротивления статора методом наименьших квадратов:

$$R_s = R_s^{(0)} + (Q_S^T Q_S)^{-1} Q_S^T (Z_S - W(R_s^{(0)}, i_{s\alpha}, u_{s\alpha})), \quad (4)$$

где $R_s^{(0)}$ - начальное значение активного сопротивления статора, $R_s^{(0)} = 0$;

$(\dots)^{-1}$ - операция инвертирования.

Учитывая, что заявленный способ реализуется на микропроцессорной технике, выражение (4) в дискретной форме будет иметь вид:

$$R_s((k+1)\Delta t) = R_s^{(0)}(k\Delta t) + (Q_S(k\Delta t)^T Q_S(k\Delta t))^{-1} Q_S(k\Delta t)^T (Z_S(k\Delta t) - Q_S(k\Delta t) \cdot R_s(k\Delta t)), \quad (5)$$

Δt - период обновления сигнала информационного состояния Q_S , $\Delta t = 0,001$ с;

$k\Delta t$ - интервал наблюдаемости системы, характеризующийся фиксированными значениями входных сигналов $i_{s\alpha}, u_{s\alpha}$.

По аналогии с (5), выражения для оценки величины обратной электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора а методом наименьших квадратов имеет вид (6):

$$\alpha((k+1)\Delta t) = \alpha^{(0)}(k\Delta t) + (Q_\alpha(k\Delta t)^T Q_\alpha(k\Delta t))^{-1} Q_\alpha(k\Delta t)^T (Z_\alpha(k\Delta t) - Q_\alpha(k\Delta t) \cdot \alpha(k\Delta t)), \quad (6)$$

$\alpha^{(0)}$ - начальное значение величины обратной постоянной времени короткозамкнутого ротора, $\alpha^{(0)} = 0$;

Δt - период обновления сигнала информационного состояния Q_α , $\Delta t = 0,001$ с;

$$Z_\alpha = -\frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + \sigma^{-1} \frac{du_{s\alpha}}{dt} - \sigma^{-1} R_s \frac{di_{s\alpha}}{dt};$$

$$Q_\alpha = (1 + L_m \beta) \frac{di_{s\alpha}}{dt} - \sigma^{-1} u_{s\alpha} + \sigma^{-1} R_s i_{s\alpha}.$$

Так как электромагнитная постоянная времени короткозамкнутого ротора наиболее явно проявляет себя в начале переходного процесса, где на вычисления значительно влияют производные тока первого и второго порядка, то полученное на каждом шаге дискретизации Δt значение α дополнительно проверяется по критерию качества минимума среднеквадратичной ошибки:

$$E^2(\alpha) = (Z_\alpha(k\Delta t) - Q_\alpha(k\Delta t) \cdot \alpha(k\Delta t))^2. \quad (7)$$

На основании выражения (7) определяется значение $\alpha_{\text{мин}}$, которому соответствует минимальная ошибка измерений. Тогда электромагнитная постоянная времени короткозамкнутого ротора, учитывая полученное значение $\alpha_{\text{мин}}$, определяется в соответствии с выражением:

$$T_R = 1/\alpha_{\text{мин}}. \quad (8)$$

В выражения (5), (6) входят параметры, доступные для измерения тока $i_{s\alpha}$ и напряжения $u_{s\alpha}$ на входе фазной обмотки, а также конструктивные параметры индуктивность статора L_s , индуктивность ротора L_r , индуктивность цепи намагничивания L_m и каталожное значение активного сопротивления ротора R_r .

Программная реализация числового дифференцирования сигналов фазного тока статора $i_{s\alpha}$ и фазного напряжения $u_{s\alpha}$ выполняется согласно известным выражениям и с учетом режима неподвижного ротора, используемого в способе, имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}(k\Delta t)}{dt} &\approx \frac{i_{s\alpha}((k+1)\Delta t) - i_{s\alpha}((k-1)\Delta t)}{2\Delta t}, \\ \frac{d^2i_{s\alpha}(k\Delta t)}{dt^2} &\approx \frac{i_{s\alpha}((k+1)\Delta t) - 2i_{s\alpha}(k\Delta t) + i_{s\alpha}((k-1)\Delta t)}{\Delta t^2}, \\ \frac{du_{s\alpha}(k\Delta t)}{dt} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $i_{s\alpha}$, $u_{s\alpha}$ - ток и напряжение статора по оси a ;

Δt - период дискретизации, $\Delta t = 0,001$ с;

k - номер шага дискретизации, характеризующийся фиксированными значениями входных сигналов $i_{s\alpha}$, $u_{s\alpha}$.

Сущность способа поясняется фигурами, где на фиг. 1 - блок-схема устройства; фиг. 2 - график напряжения питающего обмотку статора и ток статора в зависимости от времени.

К обмотке статора асинхронного двигателя 1 подключен инвертор 2, получающий питание от силового трансформатора, датчик 3 фазного тока, датчик 4 фазного напряжения. К вычислительному устройству 5 подключены датчики 3, 4. Вычислительное устройство конструктивно выполнено заодно с блоком 6 системы управления, к которому подсоединен задатчик 7 режимов работы.

Способ определения электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора осуществляется следующим образом: в вычислительное устройство 5 вводят конструктивные параметры асинхронного двигателя - индуктивность статора L_s , индуктивность ротора L_r , индуктивность цепи намагничивания L_m и каталожное значение активного сопротивления ротора R_r , затем в период паузы в работе электропривода задатчик 7 режимов работы подает в систему 6 управления электроприводом команду на инициализацию режима неподвижного ротора; система 6 управления формирует управляющий сигнал и подает его в инвертор 2, который обеспечивает подачу в одну фазу обмотки статора асинхронного двигателя 1 постоянного напряжения $U_{\text{пит}}$ на интервале времени $0 < t < t_1$; в вычислительное устройство подают информацию от датчика 3 о силе тока $I_{\text{ст}}$ и от датчика 4 о величине фазного напряжения $U_{\text{ст}}$; вычислительное устройство 5 осуществляет дискретизацию входных сигналов по времени с периодом дискретизации $\Delta t = 0,001$ с, числовое дифференцирование входных сигналов $I_{\text{ст}}$, $U_{\text{ст}}$ согласно (9), определяет значение активного сопротивления статора R_s за время $0 < t < t_1$ согласно формуле (5); полученное значение сохраняется в вычислительном устройстве 5; затем задатчик 7 режимов работы подает в систему 6 управления электроприводом команду на окончание режима неподвижного ротора; система 6 управления формирует управляющий сигнал и подает его в инвертор 2, который отключает подачу постоянного напряжения $U_{\text{пит}}$, и на интервале времени $t_1 < t < t_2$ (фиг. 2) вычислительное устройство 5 определяет на каждом шаге дискретизации значение величины обратной электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора α согласно выражению (6); для полученного на каждом шаге дискретизации значе-

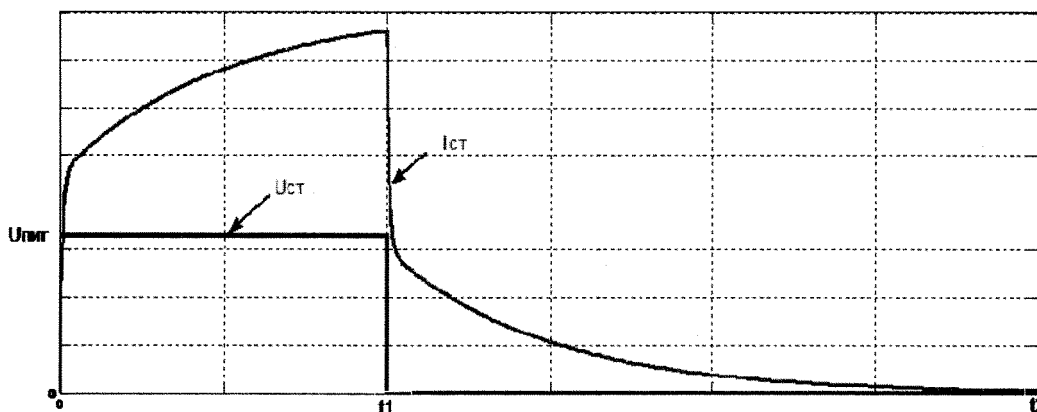
ния α вычислительным устройством 5 определяется квадрат ошибки измерений параметра α согласно выражению (7), за время $t_1 < t < t_2$ вычислительное устройство 5 определяет значение $\alpha_{\text{мин}}$, которому соответствует минимальная ошибка измерений, и определяет значение электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора, учитывая полученное значение $\alpha_{\text{мин}}$, по формуле (8); вычислительное устройство 5 подает информацию в систему 6 управления электроприводом, которая, объединив эту информацию с информацией от датчика 7 режимов работы, управляет в дальнейшем инвертором 2, питающим асинхронный двигатель 1.

Для уменьшения потребляемой двигателем мощности в режиме неподвижного ротора и, соответственно, нежелательного перегрева ротора в процессе измерения напряжение питания статорной обмотки $U_{\text{пит}}$ должно быть как можно меньше.

В результате перечисленных взаимодействий осуществляется определение электромагнитной постоянной времени короткозамкнутого ротора, снижается вероятность ее ошибочного определения и по ее величине осуществляется управление асинхронным двигателем.

Источники информации:

1. RU 2374752, МПК Н 02Р 23/14, 21/14; G 01R 27/02, 31/34, 2009.



Фиг. 2