УДК 621.3.07

О. А. ЛЫСЕНКО

Омский государственный
технический университет

НАБЛЮДАТЕЛЬ МОМЕНТА НАГРУЗКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДВОЙНОЙ БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКОЙ РОТОРА

В статье рассмотрены результаты разработки и исследования наблюдателя момента нагрузки на валу и переменных состояния асинхронных электродвигателей с двойной беличьей клеткой или с глубокопазными роторами. Для оценки момента нагрузки используется математическое описание на основе наблюдателя Люенбергера полного порядка. Методы исследования: теория автоматического управления и электрических машин. Приведены графические результаты численного моделирования и показана эффективность использования разработанных алгоритмов и методик.

Ключевые слова: бездатчиковое управление, асинхронный двигатель, наблюдатель Люенбергера, оценка момента нагрузки.

Задача по разработке бездатчиковых систем управления асинхронными электроприводами остается актуальной сегодня для многих специалистов данной области. Под бездатчиковым управлением [1–3] понимают системы векторного управления электродвигателем без датчика скорости на валу двигателя (бездатчиковые системы), использующие для управления легко доступные измерению координаты (ток, напряжение). Данные системы применяются при небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точности ее поддержания не более ±0,5 %. В остальных случаях, если скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до ±0,02 % при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала, а также при необходимости регулирования момента на валу электродвигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости [4].

В качестве объекта управления используется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым глубокопазным ротором или ротором с двойной беличьей клеткой. Данные конструкции ротора широко используются и позволяют получить увеличенный пусковой момент.

В настоящее время известен широкий круг методов учета различных конструкций роторов асинхронных машин: эквивалентные схемы замещения (метод зубцовых контуров, эквивалентные каскадные схемы замещения) [5]; методы конечно-элементного и конечно-разностного анализа и другие.

Имеются различные подходы к определению вектора состояния асинхронных двигателей, среди них можно выделить применение наблюдателя Люенбергера [6–7] и алгоритма расширенного фильтра Калмана [8–9]. В данной статье мы будем рассматривать вычислитель момента нагрузки асинхронного двигателя на основе наблюдателя Люенбергера.

Для исследования динамических режимов работы рассматривается трехфазная машина, состоящая из трехфазной обмотки на статоре и трехфазной обмотки на роторе. Для учета конструкции ротора с двойной беличьей клеткой, ротор представляется двумя параллельными ветвями. Каждая из ветвей ротора состоит из активного сопротивления, учитывающего тепловые потери и индуктивности связывающей данную ветвь через соответствующие потокосцепления с другой ветвью ротора и ветвью намагничивания. Таким образом, каждая из ветвей ротора создает свой электромагнитный момент. Результирующий электромагнитный момент при этом будет составлять сумму всех электромагнитных моментов короткозамкнутых обмоток ротора.

Система уравнений для описания асинхронной машины с короткозамкнутым ротором ($\vec{u}_R = 0$) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\vec{\psi}_S}{dt} = \vec{u}_S - R_S\vec{i}_S - j\omega_k\vec{\psi}_S \\ \dfrac{d\vec{\psi}_{R1}}{dt} = -R_{R1}\vec{i}_{R1} - j\left(\omega_k - p_p\omega_m\right)\vec{\psi}_{R1} \\ \dfrac{d\vec{\psi}_{R2}}{dt} = -R_{R2}\vec{i}_{R2} - j\left(\omega_k - p_p\omega_m\right)\vec{\psi}_{R2} \\ \vec{\psi}_S = L_S\vec{i}_S + L_m(\vec{i}_{R1} + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\psi}_{R1} = L_{R1}\vec{i}_{R1} + L_m(\vec{i}_S + \vec{i}_{R2}) \\ \vec{\psi}_{R2} = L_{R2}\vec{i}_{R2} + L_m(\vec{i}_S + \vec{i}_{R1}) \\ M = k_1\,Mod\left(\vec{\psi}_i \times \vec{i}_k\right) + k_2\,Mod\left(\vec{\psi}_j \times \vec{i}_n\right) \\ \dfrac{d\omega_m}{dt} = \dfrac{M - T_L}{J}. \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{u}_S$, $\vec{i}_S$, $\vec{\psi}_S$ — пространственные векторы напряжения, тока и потокосцепления статора соответственно;

$\vec{i}_{R1}$, $\vec{i}_{R2}$, $\vec{\psi}_{R1}$, $\vec{\psi}_{R2}$ — токи, потокосцепления первой и второй ветвей ротора соответственно;

ω_m, ω_k — частота вращения ротора и частота вращения системы координат;

M — момент на валу машины;

T_L — момент нагрузки рабочего механизма, приведенный к валу.

J — момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма;

L_S, L_{R1}, L_{R2}, L_m — индуктивности статора, ротора и взаимоиндуктивность между статором и ротором соответственно;

p_p — число пар полюсов.

Исключив из (1) $\vec{i}_{R1}$, $\vec{i}_{R2}$ и $\vec{\psi}_S$, получим:

$$\begin{cases} \vec{u}_S = R_S\vec{i}_S + k_{iS}\dfrac{d\vec{i}_S}{dt} + k_{R2}\dfrac{d\vec{\psi}_{R1}}{dt} + k_{R1}\dfrac{d\vec{\psi}_{R2}}{dt} + \\ + j\omega_k(k_{iS}\vec{i}_S + k_{R2}\vec{\psi}_{R1} + k_{R1}\vec{\psi}_{R2}) \\ 0 = -k_{R2}R_{R1}\vec{i}_S + \dfrac{1}{T_{R1}}\vec{\psi}_{R1} + \dfrac{d\vec{\psi}_{R1}}{dt} - \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\vec{\psi}_{R2} + j(\omega_k - p_p\omega_m)\vec{\psi}_{R1} \\ 0 = -k_{R1}R_{R2}\vec{i}_S + \dfrac{1}{T_{R2}}\vec{\psi}_{R2} + \dfrac{d\vec{\psi}_{R2}}{dt} - \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\vec{\psi}_{R1} + j(\omega_k - p_p\omega_m)\vec{\psi}_{R2} \\ M = \dfrac{3}{2}p_pk_{R2}Mod(\vec{\psi}_{R1}\times\vec{i}_S) + \dfrac{3}{2}p_pk_{R1}Mod(\vec{\psi}_{R2}\times\vec{i}_S) \\ \dfrac{d\omega_m}{dt} = \dfrac{M - T_L}{J}, \end{cases} \quad (2)$$

здесь $k_{R1} = \dfrac{L_{R1}L_m - L_m^2}{L_{R1}L_{R2} - L_m^2}$, $k_{R2} = \dfrac{L_{R2}L_m - L_m^2}{L_{R1}L_{R2} - L_m^2}$, $\sigma = L_{R1}L_{R2} - L_m^2$,

$k_{iS} = \dfrac{L_SL_{R1}L_{R2} - L_SL_m^2 - L_{R1}L_m^2 - L_{R2}L_m^2 + 2L_m^3}{L_{R1}L_{R2} - L_m^2}$ — безразмерные коэффициенты;

$T_{R1} = \dfrac{L_{R1}L_{R2} - L_m^2}{R_{R1}L_{R2}}$, $T_{R2} = \dfrac{L_{R1}L_{R2} - L_m^2}{R_{R2}L_{R1}}$ — постоянные времени ветвей ротора.

В неподвижной системе координат ($\omega_k = 0$) с вещественной и мнимой осями α и β соответственно, пространственные вектора принимают вид: $\vec{u}_S = u_{S\alpha} + ju_{Sy}$, $\vec{i}_S = i_{S\alpha} + ji_{S\beta}$, $\vec{\psi}_{R1} = \psi_{R1\alpha} + j\psi_{R1\beta}$, $\vec{\psi}_{R2} = \psi_{R2\alpha} + j\psi_{R2\beta}$.

После разделения на мнимую и вещественную части система (2) примет следующий вид (3):

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_Si_{S\alpha} + k_{iS}\dfrac{di_{S\alpha}}{dt} + k_{R2}\dfrac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} + k_{R1}\dfrac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} = R_Si_{S\beta} + k_{iS}\dfrac{di_{S\beta}}{dt} + k_{R2}\dfrac{d\psi_{R1\beta}}{dt} + k_{R1}\dfrac{d\psi_{R2\beta}}{dt} \\ 0 = -k_{R2}R_{R1}i_{S\alpha} + \dfrac{1}{T_{R1}}\psi_{R1\alpha} + \dfrac{d\psi_{R1\alpha}}{dt} - \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\psi_{R2\alpha} + p_p\omega_m\psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2}R_{R1}i_{S\beta} + \dfrac{1}{T_{R1}}\psi_{R1\beta} + \dfrac{d\psi_{R1\beta}}{dt} - \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\psi_{R2\beta} - p_p\omega_m\psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1}R_{R2}i_{S\alpha} + \dfrac{1}{T_{R2}}\psi_{R2\alpha} + \dfrac{d\psi_{R2\alpha}}{dt} - \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\psi_{R1\alpha} + p_p\omega_m\psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1}R_{R2}i_{S\beta} + \dfrac{1}{T_{R2}}\psi_{R2\beta} + \dfrac{d\psi_{R2\beta}}{dt} - \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\psi_{R1\beta} - p_p\omega_m\psi_{R2\alpha} \\ M = \dfrac{3}{2}p_pk_{R2}(\psi_{R1\alpha}i_{S\beta} - \psi_{R1\beta}i_{S\alpha}) + \dfrac{3}{2}p_pk_{R1}(\psi_{R2\alpha}i_{S\beta} - \psi_{R2\beta}i_{S\alpha}) \\ \dfrac{d\omega_m}{dt} = \dfrac{M - T_L}{J} \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) уравнений в операторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} u_{S\alpha} = R_S(\dfrac{k_{iS}}{R_S}p + 1)i_{S\alpha} + k_{R2}p\psi_{R1\alpha} + k_{R1}p\psi_{R2\alpha} \\ u_{S\beta} = R_S(\dfrac{k_{iS}}{R_S}p + 1)i_{S\beta} + k_{R2}p\psi_{R1\beta} + k_{R1}p\psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R2}R_{R1}i_{S\alpha} + \dfrac{1}{T_{R1}}(T_{R1}p + 1)\psi_{R1\alpha} - \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\psi_{R2\alpha} + p_p\omega_m\psi_{R1\beta} \\ 0 = -k_{R2}R_{R1}i_{S\beta} + \dfrac{1}{T_{R1}}(T_{R1}p + 1)\psi_{R1\beta} - \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\psi_{R2\beta} - p_p\omega_m\psi_{R1\alpha} \\ 0 = -k_{R1}R_{R2}i_{S\alpha} + \dfrac{1}{T_{R2}}(T_{R2}p + 1)\psi_{R2\alpha} - \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\psi_{R1\alpha} + p_p\omega_m\psi_{R2\beta} \\ 0 = -k_{R1}R_{R2}i_{S\beta} + \dfrac{1}{T_{R2}}(T_{R2}p + 1)\psi_{R2\beta} - \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\psi_{R1\beta} - p_p\omega_m\psi_{R2\alpha} \\ M = \dfrac{3}{2}p_pk_{R2}(\psi_{R1\alpha}i_{S\beta} - \psi_{R1\beta}i_{S\alpha}) + \dfrac{3}{2}p_pk_{R1}(\psi_{R2\alpha}i_{S\beta} - \psi_{R2\beta}i_{S\alpha}) \\ \omega_m = \dfrac{M - T_L}{Jp} \end{cases} \quad (4)$$

Для построения электромагнитной подсистемы наблюдателя необходимо в систему уравнений (4) ввести дополнительные слагаемые — скорректированные разницы между измеренными и определенными наблюдателем значениями составляющих тока статора (невязки).

Тогда получим следующую систему уравнений для электромагнитной подсистемы наблюдателя:

$$\begin{cases} R_S(\dfrac{k_{iS}}{R_S}p + 1)\hat{i}_{S\alpha} = u_{S\alpha} - k_{R2}p\hat{\psi}_{R1\alpha} - k_{R1}p\hat{\psi}_{R2\alpha} + k_{LIs}\Delta\hat{i}_{S\alpha} \\ R_S(\dfrac{k_{iS}}{R_S}p + 1)\hat{i}_{S\beta} = u_{S\beta} - k_{R2}p\hat{\psi}_{R1\beta} - k_{R1}p\hat{\psi}_{R2\beta} + k_{LIs}\Delta\hat{i}_{S\beta} \\ \dfrac{1}{T_{R1}}(T_{R1}p + 1)\hat{\psi}_{R1\alpha} = k_{R2}R_{R1}\hat{i}_{S\alpha} + \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\hat{\psi}_{R2\alpha} - p_p\hat{\omega}_m\hat{\psi}_{R1\beta} \\ \dfrac{1}{T_{R1}}(T_{R1}p + 1)\hat{\psi}_{R1\beta} = k_{R2}R_{R1}\hat{i}_{S\beta} + \dfrac{R_{R1}L_m}{\sigma}\hat{\psi}_{R2\beta} + p_p\hat{\omega}_m\hat{\psi}_{R1\alpha} \\ \dfrac{1}{T_{R2}}(T_{R2}p + 1)\hat{\psi}_{R2\alpha} = k_{R1}R_{R2}\hat{i}_{S\alpha} + \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\hat{\psi}_{R1\alpha} - p_p\hat{\omega}_m\hat{\psi}_{R2\beta} \\ \dfrac{1}{T_{R2}}(T_{R2}p + 1)\hat{\psi}_{R2\beta} = k_{R1}R_{R2}\hat{i}_{S\beta} + \dfrac{R_{R2}L_m}{\sigma}\hat{\psi}_{R1\beta} + p_p\hat{\omega}_m\hat{\psi}_{R2\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

где $\hat{\omega}_m$ — оценка угловой скорости;

$\hat{i}_{S\alpha}, \hat{i}_{S\beta}, \hat{\psi}_{R1\alpha}, \hat{\psi}_{R1\beta}, \hat{\psi}_{R2\alpha}, \hat{\psi}_{R2\beta}$ — оценки проекций пространственных векторов тока статора и потокосцеплений ротора соответственно;

$\Delta\hat{i}_{S\alpha} = i_{S\alpha} - \hat{i}_{S\alpha}; \Delta\hat{i}_{S\beta} = i_{S\beta} - \hat{i}_{S\beta}$ — невязки токов статора;

k_{LIs} — коэффициент усиления невязок тока наблюдателя.

Электромагнитная подсистема наблюдателя приведена на рис. 1.

Механическая подсистема наблюдателя определяется, главным образом, формированием переменной состояния момента нагрузки (6).

Данная переменная состояния образуется как алгебраическая сумма произведений невязок тока и соответствующих составляющих потокосцеплений ротора.

Полученное значение момента нагрузки обрабатывается пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором (ПИД-регулятор).

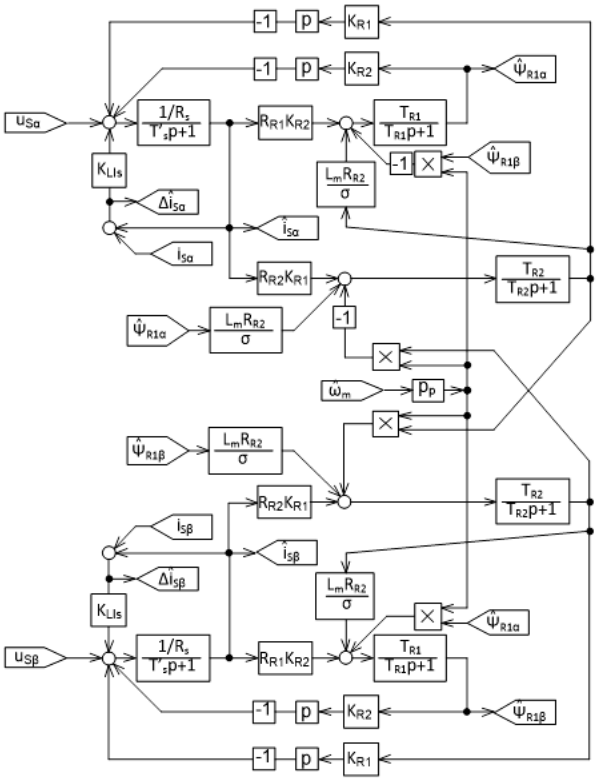


Рис. 1. Электромагнитная подсистема наблюдателя параметров состояния

$$
\begin{cases}
\hat{M} = \frac{3}{2} p_p k_{R2} \left(\hat{\psi}_{R1\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \hat{i}_{S\alpha} \right) + \frac{3}{2} p_p k_{R1} \left(\hat{\psi}_{R2\alpha} \hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \hat{i}_{S\alpha} \right) \\
T_{LP} = K_{Tmp} \left[\begin{array}{l} k_{R2} \left(\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta\hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta\hat{i}_{S\alpha} \right) + \\ + k_{R1} \left(\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta\hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta\hat{i}_{S\alpha} \right) \end{array} \right] \\
T_{LI} = \frac{K_{Tmi}}{p} \left[\begin{array}{l} k_{R2} \left(\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta\hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta\hat{i}_{S\alpha} \right) + \\ + k_{R1} \left(\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta\hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta\hat{i}_{S\alpha} \right) \end{array} \right] \\
T_{LD} = pK_{Tmd} \left[\begin{array}{l} k_{R2} \left(\hat{\psi}_{R1\alpha} \Delta\hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R1\beta} \Delta\hat{i}_{S\alpha} \right) + \\ + k_{R1} \left(\hat{\psi}_{R2\alpha} \Delta\hat{i}_{S\beta} - \hat{\psi}_{R2\beta} \Delta\hat{i}_{S\alpha} \right) \end{array} \right] \\
T_L = \frac{3}{2} p_p \left(T_{LP} + T_{LI} + T_{LD} \right) \\
\omega_m = \frac{M - T_L}{Jp}
\end{cases}
\quad (6)
$$

Структурная схема механической подсистемы наблюдателя момента представлена на рис. 2.

Таким образом, совмещая электромагнитную и механическую подсистемы (рис. 1–2) получим общую структуру наблюдателя параметров состояния асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой ротора.

Для исследования режимов работы наблюдателя в среде MatLab были разработаны математические модели асинхронного двигателя (мощностью 1500 Вт и синхронной скоростью вращения 3000 об/мин), а также модель определения момента нагрузки и других параметров состояния по значениям напряжения и тока статорной обмотки. Математическое описание моделей соответствует системам дифференциальных уравнений (4–6). Параметры переходного процесса определялись методом Рунге–Кутта четвертого порядка, с шагом численного интегрирования 1e-7c.

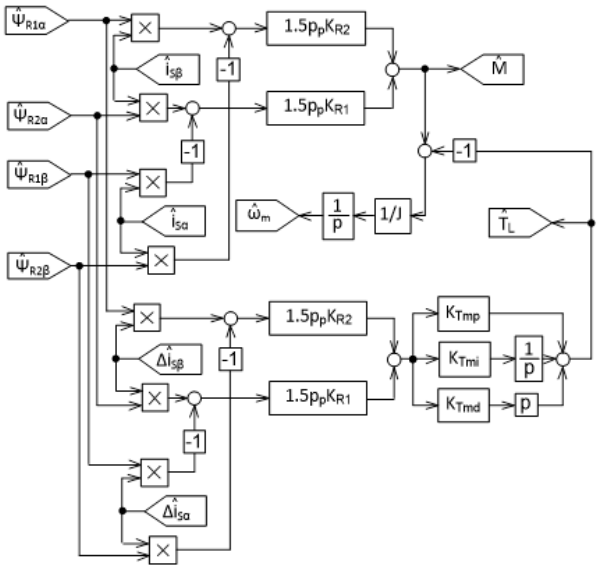


Рис. 2. Механическая подсистема наблюдателя параметров состояния

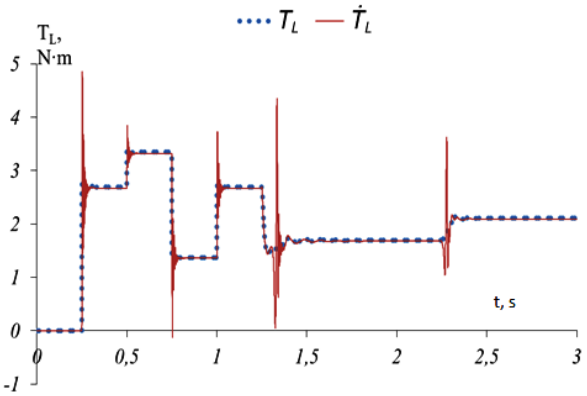


Рис. 3. Графики переходных процессов момента нагрузки асинхронного двигателя (T_L) и его оценки ($\dot{T}_L$).

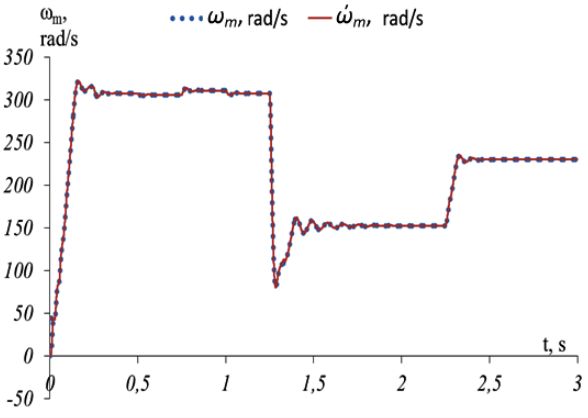


Рис. 4. Графики переходных процессов угловой скорости вращения ротора асинхронного двигателя (ω_m) и его оценки ($\dot{\omega}_m$)

В процессе исследования рассматривалось поведение параметров состояния динамической системы при различных входных воздействиях момента нагрузки (пуск на холостом ходу и наброс нагрузки), частоты и амплитуды питающего напряжения

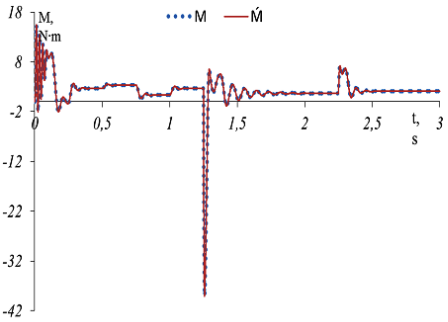


Рис. 5. Графики переходных процессов электромагнитного момента асинхронного двигателя (M) и его оценки (Ḿ)

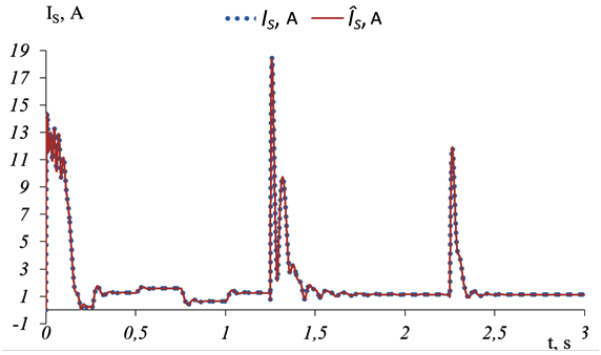


Рис. 6. Графики переходных процессов тока статора асинхронного двигателя (I_S) и его оценки ($\hat{I}_S$)

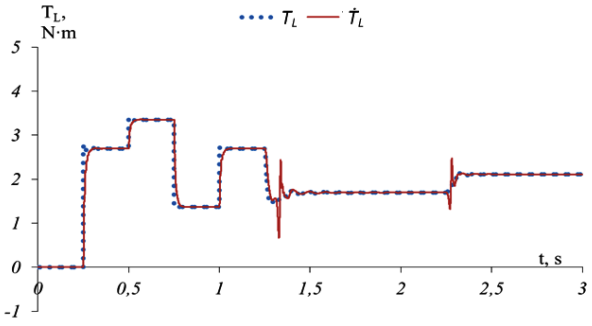


Рис. 7. Совмещенные графики переходных процессов момента нагрузки асинхронного двигателя (T_L) и его оценки ($\hat{T}_L$) с применением пассивного фильтра

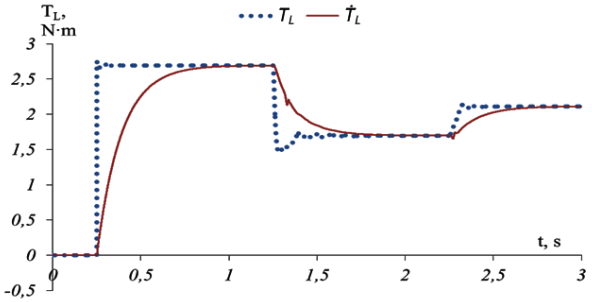


Рис. 8. Совмещенные графики переходных процессов момента нагрузки асинхронного двигателя (T_L) и его оценки ($\hat{T}_L$) с применением пассивного фильтра и увеличенной T_{FT}

(в момент времени 1,25 с — уменьшение в 2 раза частоты и амплитуды напряжения). Характер механической характеристики — вентиляторный, то есть имеет место квадратичная зависимость момента нагрузки от скорости вращения ротора.

На рис. 3–6 представлены совмещенные графические зависимости переходных процессов асинхронного двигателя и наблюдателя. Как видно на рис. 5–7, имеет место практически полное совпадение между характеристиками объекта и наблюдателя. Данный факт говорит о принципиальной возможности применения предложенного наблюдателя параметров состояния асинхронных электродвигателей двигателей с двойной беличьей клеткой в системах управления электроприводов.

С другой стороны, на рис. 4 имеются заметные расхождения между динамическими характеристиками объекта и наблюдателя. Проанализировав переходный процесс оценки момента нагрузки, можно сделать вывод о целесообразности применения пассивного фильтра. В качестве пассивного фильтра можно использовать апериодическое звено первого порядка со следующей передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{k_{FT}}{T_{FT}p + 1}, \qquad (7)$$

где k_{FT} — пропорциональный коэффициент фильтра;

T_{FT} — постоянная времени фильтра.

После применения пассивного фильтра получим улучшенные характеристики для наблюдателя момента нагрузки (рис. 7).

Из графиков, представленных на рис. 5, видно, что при изменении только задающего момента нагрузки система «наблюдатель–фильтр» ведет себя вполне корректно и показывает полную работоспособность. Однако при одновременном изменении задающего момента нагрузки и величин амплитуды и частоты питающего напряжения в моменты времени приблизительно в 1,75 с и в 2,25 с имеется некорректное оценивание величины момента нагрузки. Данную нестабильность поведения можно устранить, увеличив постоянную времени фильтра (T_{FT} = 13,76 с), если не применяются высокие требования [10, 11] по быстродействию системы управления. Результаты применения наблюдателя с увеличенной постоянной времени фильтра представлены на рис. 8.

Разработанный наблюдатель момента нагрузки и параметров состояния асинхронного электродвигателя позволяет учитывать конструктивные особенности ротора, такие как двойная беличья клетка или глубокие пазы.

Проведенные численные эксперименты показали работоспособность наблюдателя полного порядка на основе алгоритмов идентификации Люенбергера. Для повышения качества оценки момента нагрузки был применен пассивный фильтр.

Разработанный наблюдатель момента нагрузки и угловой скорости ротора можно применить к широкому кругу объектов управления с асинхронными двигателями.

На основе использования наблюдателей такого класса возможно построение систем бездатчикового управления асинхронными электроприводами различного назначения.

Библиографический список

1. Афанасьев, К. С. Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя / К. С. Афанасьев, А. С. Глазырин // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2013. — № 4. — С. 24—30.

2. M. K. Metwally. Sensorless speed control of 4-switch three phase inverter fed induction motor drives at very low and zero speed. Alexandria Engineering Journal. Vol. 52, Issue 3, September 2013, P. 327—336. Doi:10.1016/j.aej.2013.05.003.

3. Vas, Peter. Sensorless vector and direct torque control / Peter Vas. — Oxford, UK. : Oxford University Press, 1998. — 768 P. — ISBN 0198564651.

4. D. Arun Dominic, Thanga Raj Chelliah. Analysis of field-oriented controlled induction motor drives under sensor faults and an overview of sensorless schemes. ISA Transactions. Vol. 53, Issue 5, September 2014, P. 1680—1694. Doi:10.1016/j.isatra.2014.04.008.

5. D. Picovici, D. Levy, A. E. Mahdi, T. Coffey. The cascade induction machine: a reliable and controllable motor or generator. Electric Power Systems Research. Vol. 68, Issue 3, March 2004, P. 193—207. Doi:10.1016/j.epsr.2003.06.008.

6. Mabrouk Jouili, Kamel Jarray, Yassine Koubaa, Mohamed Boussak. Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. Electric Power Systems Research. Vol. 89, 2012, P. 139—147. Doi:10.1016/j.epsr.2012.02.014.

7. George Ellis. Chapter 18 — Using the Luenberger Observer in Motion Control. Control System Design Guide (Third Edition), 2004, P. 389—411. Doi:10.1016/B978-012237461-6/50019-9.

8. Zafer Aydogmus, Omur Aydogmus. A comparison of artificial neural network and extended Kalman filter based sensorless speed estimation. Measurement, Vol. 63, March 2015, P. 152—158. Doi:10.1016/j.measurement.2014.12.010.

9. Francesco Alonge, Filippo D'Ippolito, Adriano Fagiolini, Antonino Sferlazza. Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor. Control Engineering Practice, Vol. 27, May 2014, P. 1—10. Doi:10.1016/j.conengprac.2014.02.007.

10. Adel Khedher, Mohamed Faouzi Mimouni. Sensorless-adaptive DTC of double star induction motor. Energy Conversion and Management, Vol. 51, Issue 12, December 2010, P. 2878—2892. Doi:10.1016/j.enconman.2010.06.028.

11. S. Hadj Saıd, F. M'Sahli, M.F. Mimouni, M. Farza. Adaptive high gain observer based output feedback predictive controller for induction motors. Computers & Electrical Engineering, Vol. 39, Issue 2, February 2013, P. 151—163. Doi:10.1016/j.compeleceng.2012.12.016.

ЛЫСЕНКО Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрической техники. Адрес для переписки: deolas@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2016 г.
© О. А. Лысенко

УДК 621.311

В. А. ОЩЕПКОВ
А. О. ШЕПЕЛЕВ
Н. С. КАПИТОНОВ

Омский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ

Техническое состояние электрических сетей значительно влияет на экономические показатели передачи электроэнергии по сетям. На экономичность передачи также влияет режим работы нейтрали. В данной статье рассматривается распределительная сеть, работающая с компенсацией емкостного тока. Определены уровни перенапряжения, возникающие на элементах электрической сети, а также емкостной ток сети и ток реактора.

Ключевые слова: моделирование переходных процессов, сеть с компенсацией емкостных токов, однофазное замыкание на землю, дугогасительный реактор.

В связи тем, что сети с изолированной нейтралью в России имеют большое распространение, вопрос о перенапряжениях, возникающих при замыканиях фазы на землю, является актуальным, несмотря на многочисленные работы, посвященные этому вопросу [1—3]. Особенно остро стоит вопрос с перенапряжениями при возникновении дуговых явлений, связанных с большими токами замыкания на землю. Вопросы имитационного моделирования с учетом дуговых явлений и будет рассматриваться в этой статье.

Имитационное моделирование переходных процессов, возникающих в распределительных сетях электроэнергетических систем, позволяет получить достаточно достоверную картину изменения токов и напряжений на элементах сети