

АСТАТИЧЕСКАЯ ПО НАГРУЗКЕ СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЯ

Голочко О.И., Чекавский Г.С., Песковатская О.В.

г. Донецк, Украина, Донецкий национальный технический университет

Аннотация. Выполнен синтез наблюдателя состояния, восстанавливающего скорость и момент статического сопротивления на валу асинхронного двигателя. Выполнен анализ статических и динамических свойств системы векторного управления асинхронным электроприводом с ориентацией по вектору потокосцепления ротора, замкнутой по оценке скорости, с комбинированным управлением по оценке статического момента.

Annotation. The synthesis of state observer, which identifies the speed and the load torque on induction motor's shaft, has been carried out. Statics and transients of the induction motor vector field-oriented control system with the feedback by speed estimate and with complex control by load torque estimate have been analyzed.

Введение

Системы векторного управления (СВУ) асинхронным двигателем (АД) позволяют получить высококачественные статические и динамические характеристики электропривода. Основным сдерживающим фактором для внедрения таких систем в промышленности является сложность или невозможность измерения отдельных координат, таких, как потокосцепление ротора и частота вращения ротора двигателя.

Применение математических моделей (идентификаторов координат), использующих в качестве входных сигналов информацию о фазных напряжениях и токах АД, при вычислении потокосцепления дает удовлетворительные результаты [1]. При оценке же частоты вращения (скорости) ротора двигателя такие модели обычно содержат дифференцирующие звенья, и также приводят к появлению алгебраических контуров, что снижает точность идентификации и затрудняет ее техническую реализацию. В связи с этим одним из перспективных альтернативных методов восстановления скорости двигателя при создании качественных СВУ без использования механических датчиков на валу двигателя является использование наблюдателей состояния (НС), которые при традиционном подходе к их синтезу [2] лишены указанных недостатков и позволяют, кроме частоты вращения ротора, оценить величину статического момента на валу двигателя. Эта оценка может быть использована для реализации комбинированного управления по возмущающему воздействию с целью ликвидации статизма СВУ по нагрузке.

Результаты исследований. Математическое описание короткозамкнутого АД в ортогональной системе координат d, q , ориентированной по вектору потокосцепления ротора, используемое при традиционном векторном управлении, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \sigma L_S \frac{di_{Sd}}{dt} &= u_{Sd} - R_l i_{Sd} + \sigma L_S \omega_C i_{Sq} + \frac{k_R}{T_R} \Psi_R; \\ \frac{d\Psi_R}{dt} &= -\frac{1}{T_R} \Psi_R + k_R R_R i_{Sd}; \\ \sigma L_S \frac{di_{Sq}}{dt} &= u_{Sq} - R_l i_{Sq} - \sigma L_S \omega_C i_{Sd} - k_R \omega_C \Psi_R; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{3}{2} z_p k_R \Psi_R i_{Sq}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_C; \\ \omega_C &= z_p \omega + k_R R_R \frac{i_{Sq}}{\Psi_R}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u_{Sd}, u_{Sq}, i_{Sd}, i_{Sq}, \Psi_R$ – ортогональные составляющие вектора напряжения \vec{U}_S и тока \vec{I}_S статора АД и модуль вектора потокосцепления $\vec{\Psi}_R$ ротора;

M, M_C – электромагнитный момент АД и статический момент, приведенный к валу АД;

ω – частота вращения (скорость) ротора АД,

ω_C – частота вращения системы координат d, q ;

$T_R = L_R / R_R$ – электромагнитная постоянная времени ротора;

R_S, R_R – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора;

$R_l = R_S + k_R^2 R_R; L_S, L_R, L_m$ – полные индуктивности статора и ротора и взаимоиндуктивность;

$k_R = L_m / L_R$ – коэффициент электромагнитной связи ротора;

$\sigma = 1 - k_R L_m / L_S$ – коэффициент рассеяния;

J – суммарный момент инерции электромеханической системы, приведенный к валу АД.

Анализ математического описания (1) показывает, что прямую часть НС, оценивающего скорость АД, можно сформировать из части структурной схемы объекта регулирования, полученной из системы (1) после исключения из нее первых двух уравнений и сигнала M_C в уравнении движения привода, как неизмеряемого возмущения.

Структурная схема такого НС представлена на рис. 1. Его входными сигналами являются измеряемые координаты u_{Sq}, i_{Sd}, i_{Sq} и восстанавливаемые при помощи идентификатора потокосцепления [1] Ψ_R и ω_C .

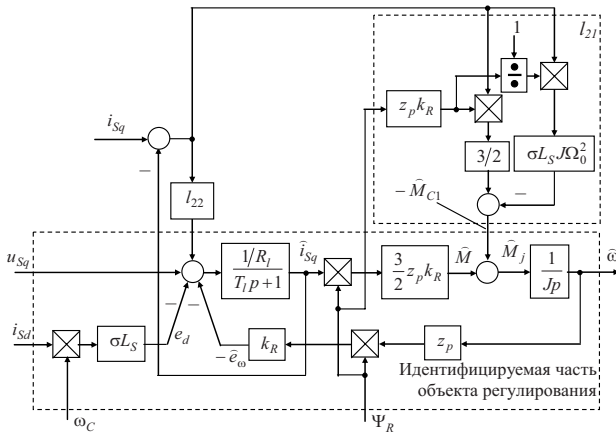


Рисунок 1. Структурная схема наблюдателя состояния

Для обеспечения желаемого характеристического полинома НС:

$$H_2(p) = p^2 + \gamma\Omega_0 p + \Omega_0^2$$

Коэффициенты корректирующих связей НС, должны вычисляться по формулам:

$$l_{21} = \frac{3}{2} z_p k_R \Psi_R - \frac{\sigma L_S J}{(z_p k_R \Psi_R)^2} \Omega_0^2;$$

$$l_{22} = R_l (\gamma \Omega_0 T_l - 1),$$

где Ω_0 – среднегеометрический корень характеристического полинома.

Для нормальной работоспособности НС его среднегеометрический корень должен превышать среднегеометрический корень системы, поэтому его значение может быть принято равным:

$$\Omega_0 = \lambda / T_\mu, \tag{2}$$

где $\lambda = 1,0 \div 2,0$.

Восстановленное значение скорости $\hat{\omega}$ отличается от действительной скорости ω на величину $\tilde{\omega}$, пропорциональную моменту нагрузки M_C , поскольку последний не воздействует на НС, но прикладывается к объекту. При совпадении сходственных параметров объекта регулирования и его модели в составе НС передаточную функцию $K_f(p)$ от статического момента до ошибки оценивания скорости, как показано в [3], можно определить по структурной схеме рис. 2:

$$K_f(p) = \frac{\tilde{\omega}(p)}{M_C(p)} = -\frac{1}{J} \cdot \frac{p + \gamma\Omega_0}{H_2(p)}.$$

Для установившегося режима ($p \rightarrow 0$) ошибка оценивания с учетом (2) составит:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_{уст} &= k_f M_C = K_f(0) \cdot M_C = -\frac{\gamma}{J\Omega_0} M_C = \\ &= -\frac{\gamma}{\lambda} \cdot \frac{T_\mu}{J} M_C \end{aligned} \tag{3}$$

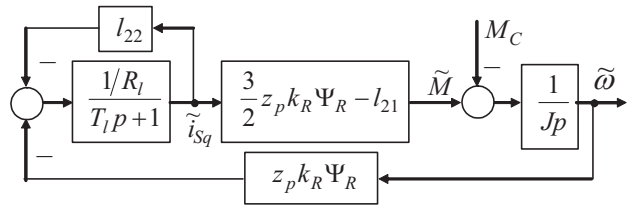


Рисунок 2. Расчетная схема НС для определения ошибки оценивания скорости

где $k_f = \frac{\tilde{\omega}_{уст}}{M_C} = -\frac{\gamma}{\lambda} \cdot \frac{T_\mu}{J}.$

Из выражения (3) следует, что, имея информацию о статическом моменте, ошибку оценивания скорости можно компенсировать. Учитывая наличие в наблюдателе, представленном на рис. 1, оценки динамического момента \hat{M}_j , момент статического сопротивления можно идентифицировать по одной из следующих формул:

$$\hat{M}_C = M - \hat{M}_j = \frac{3}{2} z_p k_R \Psi_R i_{Sq} - \hat{M}_j,$$

$$\hat{M}_{C1} = \hat{M} - \hat{M}_j. \tag{4}$$

Первая из формул (4) точнее, а вторая – удобнее тем, что сигнал $-\hat{M}_{C1}$ уже присутствует в НС рис. 1, т.е. не требует дополнительных операций по его формированию.

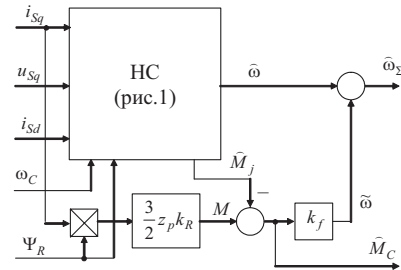


Рисунок 3. Структурная схема НС с компенсацией ошибки оценивания скорости и вычислением статического момента

Наблюдатель состояния с компенсацией статической ошибки оценивания скорости приведен на рис. 3. Если в этом НС коэффициент передачи k_f заменить передаточной функцией $K_f(p)$, то компенсация будет осуществляться не только в статике, но и в динамике.

Система, замкнутая по скорректированной оценке скорости $\hat{\omega}_\Sigma$, будет иметь такой же статизм при набросе нагрузки, как и СВУ, замкнутая по измеренной скорости:

$$\Delta\omega_{C0} = k_{f.CAP} M_C = -\frac{T_\omega}{J} M_C, \tag{5}$$

где $T_\omega = 4T_\mu$ – постоянная времени интегрирования разомкнутого контура скорости;

T_μ – малая постоянная времени системы, отражающая инерционность АИН с ШИМ.

Восстанавливаемый с помощью НС сигнал статического момента может быть использован для организации канала компенсации возмущения (статического момента). Для достижения астатизма системы по возмущению коэффициент передачи корректирующей связи по оценке статического момента должен быть равен:

$$k_k = \frac{k_{\omega} T_{\omega}}{J},$$

где k_{ω} – коэффициент передачи обратной связи по скорости.

Выберем в качестве желаемого характеристического полинома полином Баттерворта ($\gamma = \sqrt{2}$) и зададимся конкретными параметрами АД (тип 4А-112-М4, 5.5 кВт, 380 В, 10.4 А). Сравним между собой представленные на рис. 4 графики переходных процессов при набросе нагрузки в следующих астатических СБУ:

1. В предложенной системе с комбинированным управлением по оценке статического момента, замкнутой по оценке скорости (непрерывные линии).
2. В традиционной СБУ с пропорционально-интегральным РС, замкнутой по измеренной скорости (пунктирные линии).
3. В идеализированной СБУ с пропорциональным РС и с комбинированным управлением по измеренному статическому моменту, замкнутой по измеренной скорости, которая является вариантом предложенной системы при $\lambda = \infty$ (точечные линии).

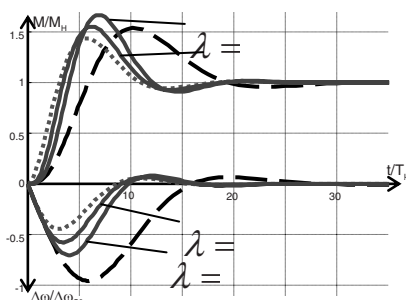


Рисунок 4. Переходные процессы в СБУ при набросе нагрузки

Таким образом, в системе с предложенным НС может быть достигнут астатизм по нагрузке. При соответствующем выборе значения Ω_0 такие системы имеют динамические свойства, которые характеризуются большим быстродействием без существенного увеличения колебательности переходных процессов, по сравнению с динамическими свойствами системы с пропорционально-интегральным РС.

Выводы

1. Синтезированный НС позволяет точно восстанавливать значение частоты вращения ротора АД за счет компенсации ошибки оценивания, возникающей при наличии возмущающего воздействия в объекте (момента нагрузки).
2. Восстанавливаемое значение момента нагрузки может быть использовано для организации допол-

нительной связи в однократно-интегрирующей СБУ скоростью АД с целью полной компенсации статизма системы, причем по сравнению с динамическими свойствами традиционных двукратно-интегрирующих СБУ удастся уменьшить динамическую просадку скорости и время ее восстановления без существенного увеличения перерегулирования по электромагнитному моменту, которое к тому же может быть снижено при увеличении λ .

3. Выполненные теоретические исследования системы, замкнутой по оценке скорости, позволяют судить о возможности использования синтезированного НС для построения астатических по возмущению систем косвенного регулирования скорости АД с векторным управлением и ориентацией по вектору потокосцепления ротора без установки механических датчиков на валу двигателя. При этом дополнительных исследований требуют вопросы разработки и сравнительного анализа способов снижения чувствительности НС к помехам во входных сигналах и к изменению параметров объекта, разработки мер по практической реализации НС и управляющей части системы в целом и др.

Литература

1. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: Монография. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.
2. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
3. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерегачами стану. Навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Донецьк: Норд-Прес, 2004. – 298 с.



Толочко

Ольга Ивановна – д.т.н., профессор, кафедра "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Донецкого национального технического университета



Чекавский

Глеб Станиславович – к.т.н., доцент, кафедра "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Донецкого национального технического университета



Песковатская

Ольга Викторовна – аспирант, кафедра "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Донецкого национального технического университета