

УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУБОСТИ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ковбаса С. Н.
Национальный Технический Университет Украины «КПИ»

Как известно, при проектировании алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем (АД) [1], существует необходимость в получении информации о векторе потокосцепления ротора. Поскольку прямое измерение потокосцепления в машине труднодоступно, и его реализация экономически невыгодна, то обычно на практике используют наблюдатели магнитного потока АД [2], которые должны обеспечивать асимптотическую оценку этой переменной. Следует отметить, что достоверность работы таких наблюдателей зависит от точности определения параметров асинхронного двигателя. Вследствие нагрева машины изменяются активные сопротивления статора и ротора, что приводит к возникновению ошибок оценивания магнитного потока, что в свою очередь приводит к снижению энергетической эффективности процесса преобразования энергии и даже к потере устойчивости.

Целью данной статьи является исследование семейства наблюдателей магнитного потока АД для выявления их свойств грубоности по отношению к вариациям активного сопротивления ротора.

Математическая модель асинхронного двигателя в стационарной системе координат (a-b) имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \mu (\psi_a i_b - \psi_b i_a) - M_c / J \\ \dot{\psi}_a &= -\alpha \psi_a - \omega \psi_b + \alpha L_m i_a \\ \dot{\psi}_b &= -\alpha \psi_b + \omega \psi_a + \alpha L_m i_b \\ \dot{i}_a &= -\frac{R_1}{\sigma} i_a + \alpha \beta \psi_a + \beta \omega \psi_b - \alpha \beta L_m i_a + \frac{1}{\sigma} u_a \\ \dot{i}_b &= -\frac{R_1}{\sigma} i_b + \alpha \beta \psi_b - \beta \omega \psi_a - \alpha \beta L_m i_b + \frac{1}{\sigma} u_b \end{aligned} \quad (1)$$

где ω - угловая скорость ротора, i_a, i_b - токи статора, ψ_a, ψ_b - потокосцепления статора.

Положительные константы, связанные с электрическими и механическими параметрами АД, определены следующим образом:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \quad \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right); \quad \mu = \frac{3}{2} \frac{L_m}{J L_2};$$

где: J - полный момент инерции, R_1, R_2, L_1, L_2 - активные сопротивления и индуктивности статора и ротора соответственно, L_m - индуктивность намагничивающего контура, M_c - момент нагрузки. Без потери общности в модели (1) принята одна пара полюсов.

Перед рассмотрением исследуемых наблюдателей, определим векторы оценок токов $\mathbf{i} = (\hat{i}_a, \hat{i}_b)^T$ и потокосцеплений $\boldsymbol{\psi} = (\hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b)^T$, а также ошибки оценивания потокосцеплений и токов:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_a &= \psi_a - \hat{\psi}_a \\ \tilde{\psi}_b &= \psi_b - \hat{\psi}_b \\ \tilde{i}_a &= i_a - \hat{i}_a \\ \tilde{i}_b &= i_b - \hat{i}_b \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим наблюдатель в форме уравнений динамики роторной цепи:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}}_a &= -\alpha \hat{\psi}_a - \omega \hat{\psi}_b + \alpha L_m i_a \\ \dot{\hat{\psi}}_b &= -\alpha \hat{\psi}_b + \omega \hat{\psi}_a + \alpha L_m i_b \end{aligned} \quad (3)$$

Данный наблюдатель является асимптотически устойчивым и наиболее простым наблюдателем магнитного потока.

Следующий наблюдатель представляет собой систему четвертого порядка и имеет вид модели электромагнитной системы АД:

$$\begin{aligned}
 \dot{\Psi}_a &= -\alpha\Phi_a - \omega\Phi_b + \alpha L_m \dot{\xi}_a \\
 \dot{\Psi}_b &= -\alpha\Phi_b + \omega\Phi_a + \alpha L_m \dot{\xi}_b \\
 \dot{\xi}_a &= -\frac{R_1}{\sigma} \xi_a + \alpha\beta\Phi_a + \beta\omega\Phi_b - \alpha\beta L_m \xi_a + \frac{1}{\sigma} u_a \\
 \dot{\xi}_b &= -\frac{R_1}{\sigma} \xi_b + \alpha\beta\Phi_b - \beta\omega\Phi_a - \alpha\beta L_m \xi_b + \frac{1}{\sigma} u_b
 \end{aligned} \tag{4}$$

Наблюдатели представленные уравнениями (3) и (4) являются разомкнутыми. Для повышения грубости и скорости сходимости ошибок оценивания, введем обратные связи v_a, v_b в уравнения токов, и v_a, v_b в уравнения потокосцеплений

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{\Psi}}_a &= -\alpha\hat{\Phi}_a - \omega\hat{\Phi}_b + \alpha L_m \dot{\hat{\xi}}_a + v_a \\
 \dot{\hat{\Psi}}_b &= -\alpha\hat{\Phi}_b + \omega\hat{\Phi}_a + \alpha L_m \dot{\hat{\xi}}_b + v_b \\
 \dot{\hat{\xi}}_a &= -\frac{R_1}{\sigma} \hat{\xi}_a + \alpha\beta\hat{\Phi}_a + \beta\omega\hat{\Phi}_b - \alpha\beta L_m \hat{\xi}_a + \frac{1}{\sigma} u_a + v_a \\
 \dot{\hat{\xi}}_b &= -\frac{R_1}{\sigma} \hat{\xi}_b + \alpha\beta\hat{\Phi}_b - \beta\omega\hat{\Phi}_a - \alpha\beta L_m \hat{\xi}_b + \frac{1}{\sigma} u_b + v_b.
 \end{aligned} \tag{5}$$

С учетом (2) перепишем (5) в форме ошибок оценивания

$$\begin{aligned}
 \dot{\tilde{\Psi}}_a &= -\alpha\tilde{\Psi}_a - \omega\tilde{\Psi}_b + \alpha L_m \dot{\tilde{i}}_a - v_a \\
 \dot{\tilde{\Psi}}_b &= -\alpha\tilde{\Psi}_b + \omega\tilde{\Psi}_a + \alpha L_m \dot{\tilde{i}}_b - v_b \\
 \dot{\tilde{i}}_a &= -\frac{R_1}{\sigma} \tilde{i}_a + \alpha\beta\tilde{\Psi}_a + \beta\omega\tilde{\Psi}_b - \alpha\beta L_m \tilde{i}_a + \frac{1}{\sigma} u_a - v_a \\
 \dot{\tilde{i}}_b &= -\frac{R_1}{\sigma} \tilde{i}_b + \alpha\beta\tilde{\Psi}_b - \beta\omega\tilde{\Psi}_a - \alpha\beta L_m \tilde{i}_b + \frac{1}{\sigma} u_b - v_b
 \end{aligned} \tag{6}$$

Для синтеза корректирующих обратных связей рассмотрим функцию Ляпунова в виде

$$V = \frac{1}{2} \left(\gamma_2 (\tilde{i}_a^2 + \tilde{i}_b^2) + (\tilde{\Psi}_a^2 + \tilde{\Psi}_b^2) \right), \tag{7}$$

где $\gamma_2 > 0$ произвольная константа.

Производная от функции Ляпунова в силу уравнений (6) равна:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -\gamma_2 \tilde{i}_a^2 - \gamma_2 \tilde{i}_b^2 - \alpha\tilde{\Psi}_a^2 - \alpha\tilde{\Psi}_b^2 + (\alpha\beta\gamma_2 + \alpha L_m) (\tilde{i}_a \tilde{\Psi}_a + \tilde{i}_b \tilde{\Psi}_b) + \\
 &+ \beta\omega\gamma_2 (\tilde{i}_a \tilde{\Psi}_b - \tilde{i}_b \tilde{\Psi}_a) - \gamma_2 \tilde{i}_a v_a - \gamma_2 \tilde{i}_b v_b - \tilde{\Psi}_a v_a - \tilde{\Psi}_b v_b,
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta$.

Для асимптотической устойчивости наблюдателя необходимо чтобы производная функции Ляпунова (8) была отрицательно определенной, т. е. $\dot{V} < 0$, следовательно, корректирующие обратные связи заданные v_a, v_b, v_a, v_b , могут принимать следующий вид:

$$\begin{aligned}
 v_a &= k_1 \tilde{i}_a \mp k_2 \tilde{i}_b \\
 v_b &= k_1 \tilde{i}_b \pm k_2 \tilde{i}_a \\
 v_a &= -\lambda_1 \omega \tilde{i}_b \pm \lambda_2 \tilde{i}_a \\
 v_b &= \lambda_1 \omega \tilde{i}_a \pm \lambda_2 \tilde{i}_b
 \end{aligned} \tag{9}$$

Таким образом, получаем семейство наблюдателей магнитного потока АД. Исследование свойств грубости проведем для разомкнутых наблюдателей и для замкнутых наблюдателей со следующими вариантами обратных связей:

$$\text{a) } v_a = k_1 \tilde{i}_a; v_b = k_1 \tilde{i}_b; v_a = 0; v_b = 0; \tag{10}$$

$$\text{b) } v_a = 0; v_b = 0; v_a = -\lambda_1 \omega \tilde{i}_b; v_b = \lambda_1 \omega \tilde{i}_a; \tag{11}$$

$$\text{c) } v_a = k_1 \tilde{i}_a; v_b = k_1 \tilde{i}_b; v_a = -\lambda_1 \omega \tilde{i}_b; v_b = \lambda_1 \omega \tilde{i}_a; \tag{12}$$

$$\text{d) } v_a = k_1 \tilde{i}_a - k_2 \tilde{i}_b; v_b = k_1 \tilde{i}_b + k_2 \tilde{i}_a; v_a = -\lambda_1 \omega \tilde{i}_b; v_b = \lambda_1 \omega \tilde{i}_a \tag{13}$$

$$e) \quad v_a = k_1 \tilde{i}_a; v_b = k_1 \tilde{i}_b; v_a = -\lambda_1 \omega \tilde{i}_b + \lambda_2 \tilde{i}_a; v_b = \lambda_1 \omega \tilde{i}_a + \lambda_2 \tilde{i}_b \quad (14)$$

$$f) \quad v_a = k_1 \tilde{i}_a - k_2 \tilde{i}_b; v_b = k_1 \tilde{i}_b + k_2 \tilde{i}_a; v_a = -\lambda_1 \omega \tilde{i}_b + \lambda_2 \tilde{i}_a; v_b = \lambda_1 \omega \tilde{i}_a + \lambda_2 \tilde{i}_b \quad (15)$$

$$g) \quad v_a = k_1 \tilde{i}_a + \beta \omega L_m \tilde{i}_b; v_b = k_1 \tilde{i}_b - \beta \omega L_m \tilde{i}_a; v_a = -L_m \omega \tilde{i}_b; v_b = L_m \omega \tilde{i}_a; \quad (16)$$

Вариант обратной связи (16) рассмотрен в [3].

В качестве критерия оценки грубости сравниваемых наблюдателей используется величина ошибки оценивания модуля потока АД в установившемся режиме при нагруженном двигателе:

$$|\tilde{\Psi}| = \sqrt{\tilde{\Psi}_a^2 + \tilde{\Psi}_b^2}. \quad (17)$$

Параметры $k_1, k_2, \lambda_1, \lambda_2$ приняты следующими: $k_1 = -100; k_2 = 10; \lambda_1 = \lambda_2 = 1$.

Для исследования свойств грубости наблюдателей заданных уравнениями (3), (4) и (5) при различных вариантах корректирующих обратных связей (10) – (16) использовалась моделирующая программа, структура которой показана на Рис. 1. Исследование выполнено для АД со следующими параметрами: $P_n=750$ Вт, $M_n=2.5$ Нм, $R_1=11$ Ом, $R_2=5.51$ Ом, $L_1=0.95$ Г, $L_2=0.95$ Г, $L_m=0.91$ Г, число пар полюсов $p=1, J=0.0035$ кг·м².

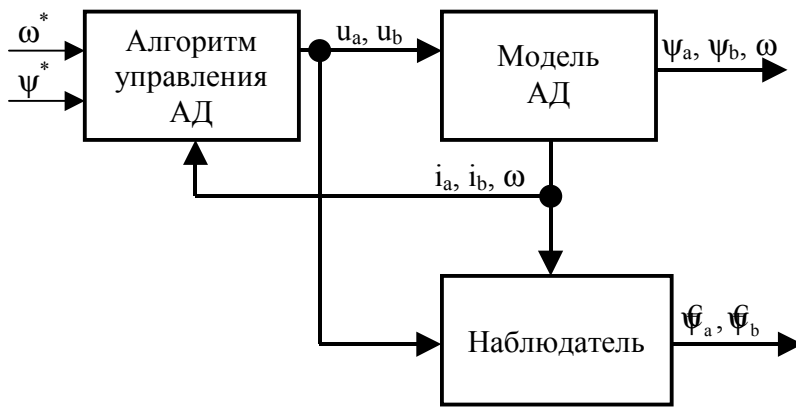


Рис. 1. Структура исследовательской программы

Как видно из структуры на Рис. 1, данные полученные при помощи исследуемого наблюдателя используются только для получения его показателей, и не используются в алгоритме управления. Считается также, что в алгоритме управления и модели АД все параметры известны и постоянны. Вариация активного сопротивления ротора задается непосредственно в модели наблюдателя.

Исследование наблюдателей состоит из двух тестов. Тест А: задается вариация активного сопротивления ротора (от 0.5 до 2 номинальных значений), двигатель разгоняется до скорости $\omega=150$ рад/с и к валу прикладывается заданный момент нагрузки (0.25, 0.5, 0.75, 1, 2 нМ); после завершения переходного процесса, снимается модуль ошибки оценивания. Тест Б: задается вариация активного сопротивления ротора, двигатель разгоняется до заданной скорости (0, 10, 20 ... 150 рад/с), после чего к валу двигателя прикладывается номинальный момент нагрузки; после завершения переходного процесса снимается величина ошибки оценивания.

Таким образом, для каждого наблюдателя получаем два вида графиков:

а) – зависимость ошибки оценивания от величины вариации активного сопротивления роторной цепи при различных моментах нагрузки. Цифрами обозначены следующие значения прикладываемого момента: 1 – 2М_н, 2 – М_н, 3 – 0.75М_н, 4 – 0.5М_н, 5 – 0.25М_н.

б) – зависимость ошибки оценивания магнитного потока от скорости вращения ротора при номинальном моменте нагрузки и вариациях активного сопротивления ротора 0.5; 0.75; 1; 1.5; 2 (обозначены соответственно цифрами 1, 2, 3, 4, 5).

Рассмотрим результаты исследования для варианта работы двигателя с номинальным моментом и отношением $k = R_{20}/R_{2N} = 2$, где R_{20} - значение сопротивления ротора используемое в наблюдателе, R_{2N} - реальное сопротивление ротора.

Наблюдатель представленный системой уравнений (3) дает значительные ошибки оценивания, а именно 0.63 Вб. Величина ошибки оценивания не зависит от скорости вращения ротора (Рис.2).

Наблюдатель представленный системой уравнений (4) для рассматриваемой точки дает ошибку оценивания равную 0.262 Вб, которая увеличивается при уменьшении скорости вращения ротора. (Рис. 3).

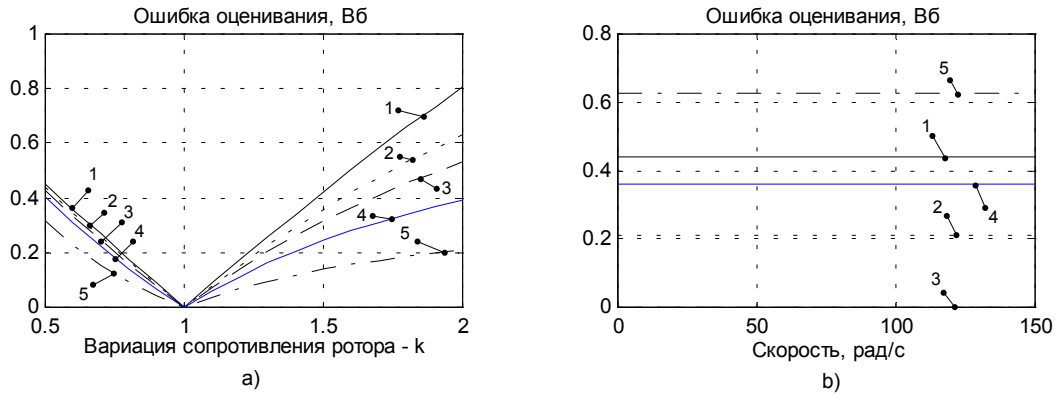


Рис. 2. Ошибки оценивания наблюдателя (3)

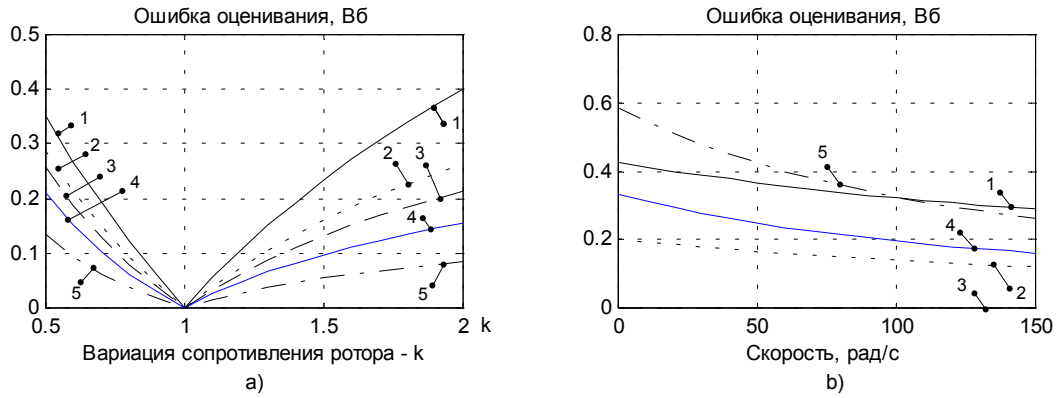


Рис. 3. Ошибки оценивания наблюдателя (4)

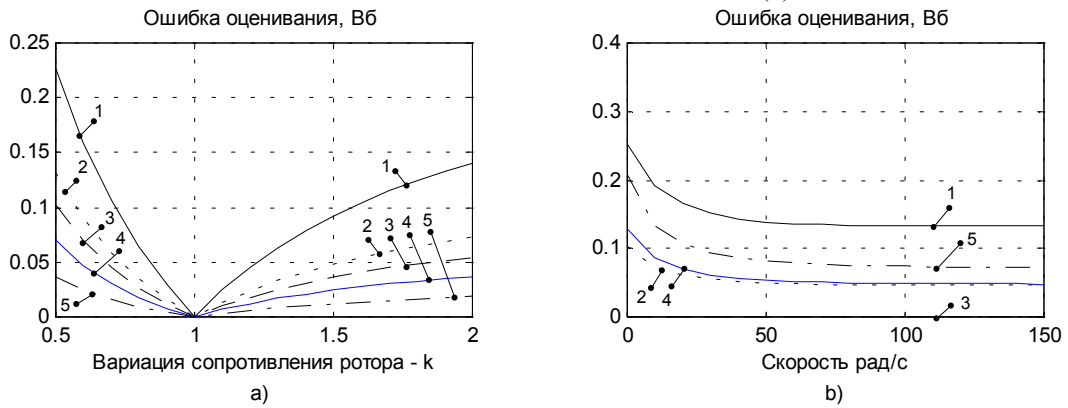


Рис. 4. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (10)

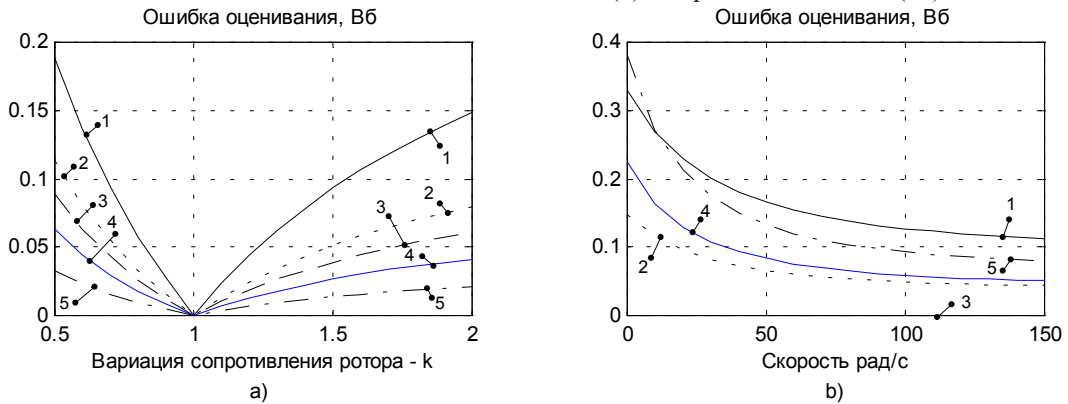


Рис. 5. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (11)

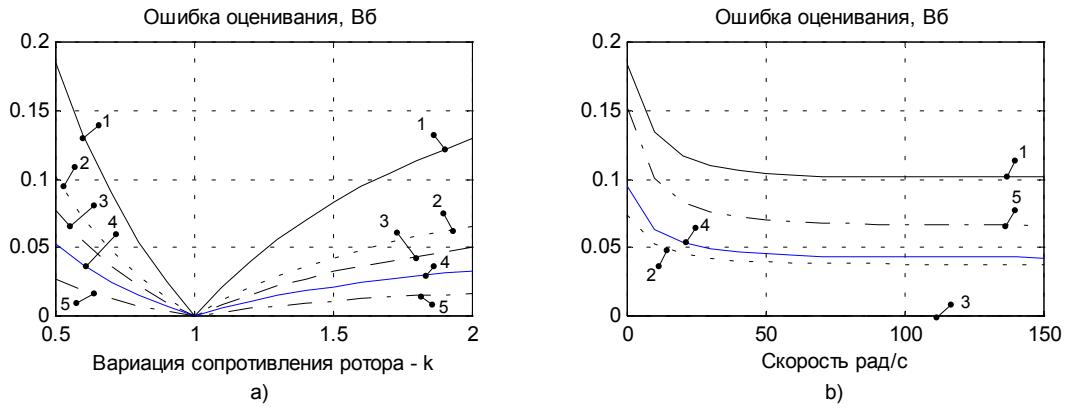


Рис. 6. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (12)

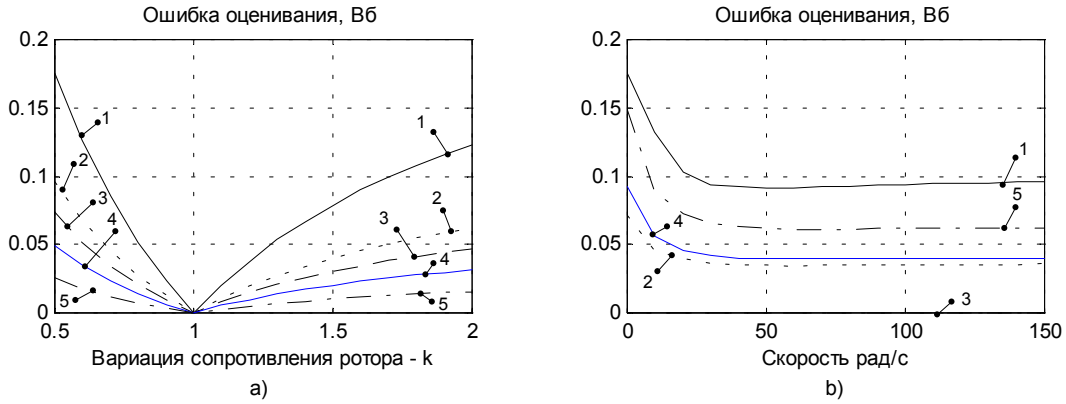


Рис. 7. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (13)

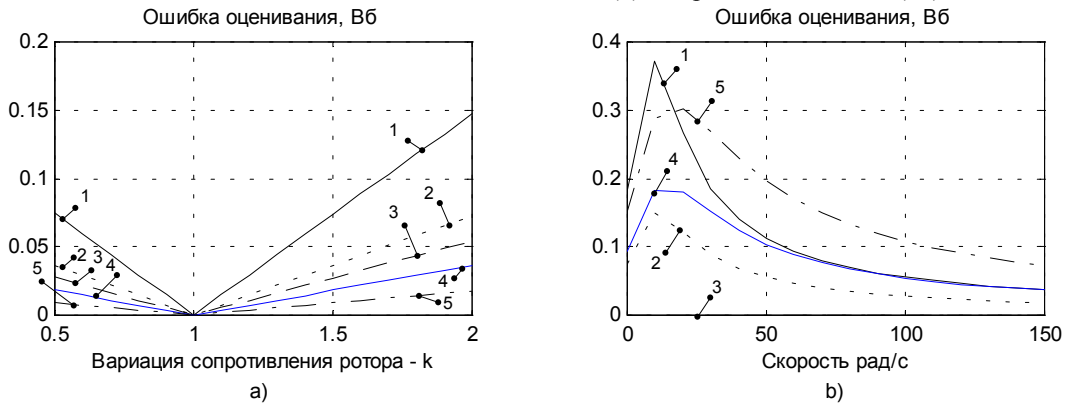


Рис. 8. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (14)

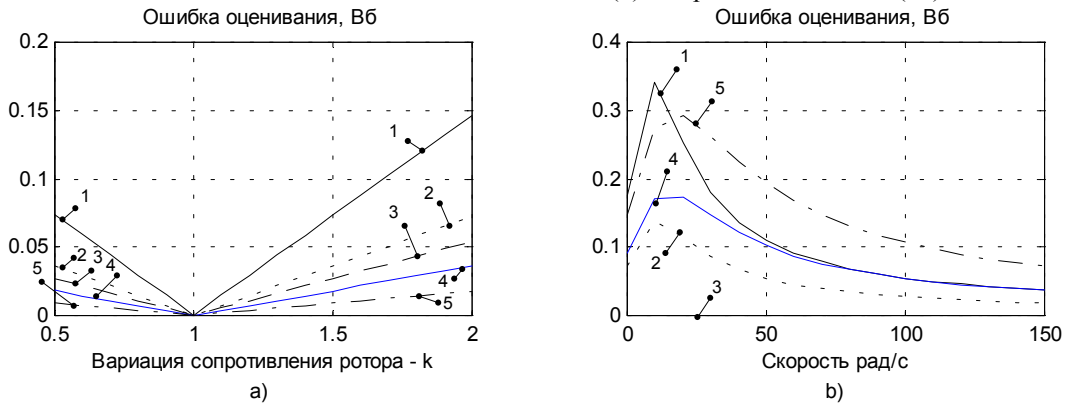


Рис. 9. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (15)

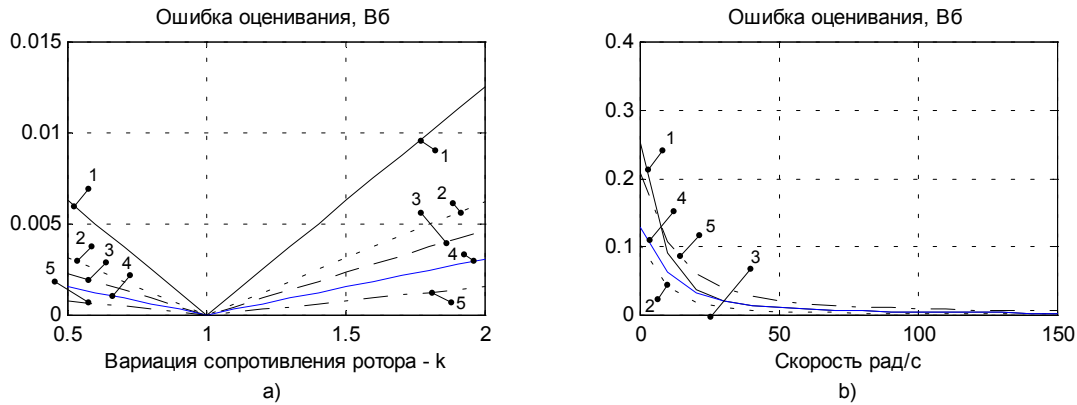


Рис. 10. Ошибки оценивания наблюдателя (5) с обратными связями (16)

Введение в наблюдатель (5) обратных связей (10) (Рис.4) или (11) (Рис. 5) позволяют существенно улучшить качество оценивания разомкнутого наблюдателя (4), т. е. ошибка оценивания будет составлять 0.0724 Вб и 0.0797 Вб соответственно. Использование варианта обратной связи (12) (т. е. при одновременном использовании обратных связей (10) и (11)) повышает точность оценки до величины 0.066 Вб. Модификация обратных связей до варианта (13) не вносит значительных изменений в точность оценки, ошибка составляет 0.064 Вб. Наблюдатель (5) с вариантами обратных связей (10) – (13) на низких скоростях дает существенно большие ошибки оценивания, чем на скоростях близких к номинальной.

Качество работы наблюдателя ухудшается (по сравнению с вариантом обратных связей (13)) при модификации обратных связей до (14). Ошибка оценивания при этом составляет 0.072 Вб, а работа на низких скоростях существенно ухудшается (Рис. 8). Модификация (14) до (15) дает примерно тот же результат что и переход от (12) до (13).

Самые высокие показатели демонстрирует наблюдатель с обратными связями (16), ошибка оценивания составляет 0.00624 Вб, что в десять раз лучше по сравнению с лучшим из рассмотренных вариантов (13). Кроме того зависимость ошибки оценивания от скорости менее ярко выражена по сравнению с предыдущими вариантами.

На основании анализа полученных результатов, можно сделать вывод о том, что наиболее целесообразным является применение замкнутых наблюдателей с вариантами обратных связей (12) или (16) которые обеспечивают самую высокую точность оценки. Использование наблюдателя с обратными связями (13), (14), (15) нецелесообразно, так как по вычислительным затратам они соизмеримы с наблюдателем (16) а качество работы последнего существенно выше.

При рассмотрении наблюдателей с обратными связями (14) – (16) (Рис.8 – Рис. 10), интересно отметить, что ошибка оценивания существенно ниже, когда реальное сопротивление двигателя в два раза выше чем его величина используемая в наблюдателе ($k=0.5$), чем в случае когда $k=2$. Т. е. для системы построенной с использованием этих наблюдателей, при неизвестном точном сопротивлении ротора двигателя, лучше задавать его немного выше, что позволит работать в области $k=0.5 - 1$ (Рис. 8.а – Рис. 10.а), а значит с меньшими ошибками оценивания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пересада С. М. Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор. Вестник ДГТУ 1999 г., с. 1 – 23.
- [2] G.C.Vergheze and S.R. Sanders, "Observers for flux estimation in induction machines", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.35,pp.85 – 94, 1988.
- [3] S. Peresada, A. Tonielli, S. Kovbasa, A. Tilli "Passivity – based design of the flux observers for induction motors", Технічна електродинаміка, ч. 6, 2000 г., с 29 – 33.