

УДК 681.518.22

Сравнительный анализ наблюдателей состояния асинхронного двигателя

В.В. Беспалов

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

E-mail: vvbespalov@itmo.ru

А.А. Ведяков

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

E-mail: vedyakov@itmo.ru

А.О. Ведякова

Санкт-Петербургский государственный университет

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

E-mail: vediakova@gmail.com

Ключевые слова: наблюдатели состояния, асинхронный двигатель

Аннотация: В работе проводится сравнение двух методов синтеза адаптивных наблюдателей для нелинейных систем на примере решения задачи оценивания переменных состояния нелинейной модели асинхронного двигателя. На основе измерений силы тока и напряжения на обмотках статора требуется получить оценки мгновенных значений магнитного потока и скорости вращения ротора. Задача решалась двумя методами: первый позволяет синтезировать градиентный наблюдатель, второй сводит задачу к оцениванию постоянных параметров, связанных с начальными условиями. В отличие от известных результатов наблюдатели синтезированы для модели, учитывающий трение при вращении ротора. С помощью компьютерного моделирования проиллюстрирована их работа.

1. Введение

В настоящее время достаточно активно развивается область бездатчикового управления электроприводом, в частности, управление скоростью вращения ротора по измерениям только электрических сигналов: сил тока и напряжений обмоток статора. Одним из способов решения задачи является использование наблюдателей для оценивания переменных состояния.

Однако в силу ограничений самих используемых подходов нелинейная модель привода так или иначе упрощается, в частности, считается, что трением при вращении ротора можно пренебречь [1, 2]. Вместе с тем недавно были предложены

два метода синтеза наблюдателей [3, 4], которые могут решить задачу оценивания переменных состояния асинхронного двигателя, не пренебрегая моментом трения.

Первый, модифицированная версия DREМBAO (англ. DREM-based Adaptive Observers), описанная в статье [3]. Метод заключается в получении модели, похожей на регрессионную, где вектор неизвестных содержит неизвестные параметры и переменные состояния. Применение процедуры динамического расширения и смешивания регрессора (англ. Dynamic Regressor Extension and Mixing, DREM) [5] к полученной модели дает независимое скалярное соотношение для каждого неизвестного. С помощью стандартного метода градиентного спуска оцениваются неизвестные параметры на основе соответствующих соотношений. Соотношения, содержащие неизвестные переменные состояния, используются для синтеза градиентного наблюдателя. Второй метод, называемый GPEBO (англ. Generalized Parameter Estimation Based Observer), сводит задачу к оцениванию постоянных параметров, часть из которых связана с неизвестными начальными условиями переменных состояния.

С помощью указанных методов в работе получены новые решения задачи оценивания состояния нелинейной модели асинхронного двигателя, в которых удалось учесть трение при вращении ротора. Проведено сравнение полученных наблюдателей с помощью компьютерного моделирования.

2. Постановка задачи

Рассматривается динамическая модель асинхронного двигателя [6]:

$$(1) \quad \dot{\lambda} = - \left(\frac{R_r}{L_r} I_2 - n_p \mathcal{J} \omega \right) \lambda + R_r \beta i,$$

$$(2) \quad L_s \sigma \frac{di}{dt} = -(R_s + R_r \beta^2) i + \beta \left(\frac{R_r}{L_r} I_2 - n_p \mathcal{J} \omega \right) \lambda + v,$$

$$(3) \quad J \dot{\omega} = -n_p \beta \lambda^\top \mathcal{J} i - L - k_v \omega,$$

где $\lambda, i, v \in \mathbb{R}^2$ – поток ротора, ток статора и управляющее напряжение соответственно, $\omega \in \mathbb{R}$ – угловая скорость ротора, $L_s, R_r, L_r, R_s, n_p, \sigma$ являются положительными константами, представляющими индуктивность статора, сопротивление ротора, индуктивность ротора, сопротивление статора, количество пар полюсов и параметр рассеивания соответственно, $\beta := \frac{M}{L_r}$, M – взаимная индуктивность, $\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right)$, $\mathcal{J} := \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, J – момент инерции ротора, а L – момент нагрузки, который считается постоянным, k_v – коэффициент вязкого трения. Здесь и далее для краткости зависимость от времени у функций опущена, например $\omega := \omega(t)$.

Требуется синтезировать наблюдатель магнитного потока λ и угловой скорости ротора ω , считая параметры двигателя известными, силу тока i и напряжение v обмоток статора измеряемыми, а момент нагрузки L постоянным. Предполагается, что внешние сигналы v и L таковы, что в системе (1)–(3) все сигналы ограничены.

3. Наблюдатель на основе DREМBAO

Задача синтеза наблюдателя для асинхронного двигателя без учета силы трения на основе DREМBAO уже была рассмотрена в статье [1]. Так как уравнения, описывающие динамику магнитного потока и силы тока (1)–(2), не зависят от силы трения и не отличаются от используемых в этой работе, то предлагается использовать для оценивания магнитного потока алгоритм, приведенный в статье [1].

Для оценивания момента нагрузки предлагается использовать градиентный алгоритм оценивания:

$$(4) \quad \dot{\hat{L}}_d = \gamma_L \varphi \left(\psi - \varphi \hat{L}_d \right),$$

где $\gamma_L > 0$, $\varphi := \frac{\beta}{J} n_p \mathcal{J} H_{\alpha_1} \left[\int_0^t e^{-\frac{k_v}{J}(t-\tau)} d\tau \times \lambda \right]$, $\psi := L_s \sigma p H_{\alpha_1} [i] + (R_s + R_r \beta^2) H_{\alpha_1} [i] - H_{\alpha_1} [u] - \beta \frac{R_r}{L_r} I_2 H_{\alpha_1} [\lambda] - \frac{(\beta n_p)^2}{J} \mathcal{J} H_{\alpha_1} [T_{int} \lambda]$, $\alpha > 0$ – настраиваемый параметр фильтра, $T_{int} := \int_0^t e^{-\frac{k_v}{J}(t-\tau)} \lambda^T \mathcal{J} i d\tau$, $H_{\alpha} [\cdot] := \frac{\alpha}{p+\alpha} [\cdot]$, $p := \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Для оценивания скорости вращения модели двигателя (1)–(3) можно получить следующую линейную модель, схожую с регрессионной:

$$(5) \quad \psi_w = \phi_w [w \quad L]^T + \epsilon_1,$$

где ϵ_1 – экспоненциально затухающий сигнал, $\phi_w = [\varphi_w \quad \varphi_L]$,

$$\begin{aligned} \psi_w = & L_s \sigma p H_{\alpha_2} [i] + (R_s + R_r \beta^2) H_{\alpha_2} [i] - H_{\alpha_2} [u] - \beta \frac{R_r}{L_r} H_{\alpha_2} [\lambda] \\ & + \beta n_p \mathcal{J} \left(- \frac{k_v \beta}{J^2 \alpha_2} H_{\alpha_2} [T_{int} H_{\alpha_2} [\lambda]] + \frac{n_p \beta}{J \alpha_2} H_{\alpha_2} [\lambda^T \mathcal{J} i H_{\alpha_2} [\lambda]] \right), \end{aligned}$$

здесь $\varphi_w = -\beta n_p \mathcal{J} H_{\alpha_2} [\lambda]$, $\varphi_L = \frac{-\beta n_p}{\alpha_2} \mathcal{J} \left(- \frac{k_v}{J^2} H_{\alpha_2} \left[\int_0^t e^{-\frac{k_v}{J}(t-\tau)} d\tau \times H_{\alpha_2} [\lambda] \right] + \frac{1}{J} H_{\alpha_2} [H_{\alpha_2} [\lambda]] \right)$.

После применения шага смешивания процедуры DREM можно получить следующий градиентный наблюдатель для оценивания скорости вращения ротора:

$$(6) \quad \dot{\hat{w}}_d = -\frac{k_v}{J} \hat{w}_d - \frac{n_p \beta}{J} \hat{\lambda}^\top \mathcal{J} i - \frac{\hat{L}_d}{J} + \gamma_w \Delta_\omega (Z_w - \hat{w}_d \Delta_\omega),$$

где $\gamma_w > 0$ – настраиваемый коэффициент, $Z_w = [1 \quad 0] \times \text{Adj}\{\phi_w\} \psi_w$, $\Delta_\omega = \det\{\phi_w\}$.

4. Наблюдатель на основе GREBO

Для рассматриваемой модели двигателя, следуя методу GREBO [4], возможно получить регрессионную модель

$$(7) \quad \psi_\eta = [\phi_{\eta^T \eta} \quad \phi_\eta] [\eta^T \eta \quad \eta]^T,$$

$$(8) \quad \psi_\eta = p H_{\gamma_1} [\chi^T \chi] + 2 \frac{R_r}{L_r} H_{\gamma_1} [\chi^T \chi] - 2 R_r \beta H_{\gamma_1} [\chi^T i],$$

$$(9) \quad \phi_{\eta^T \eta} = p H_{\gamma_1} [1] - 2 \frac{R_r}{L_r} H_{\gamma_1} [1], \phi_\eta = -2 p H_{\gamma_1} [\chi^T] - 4 \frac{R_r}{L_r} H_{\gamma_1} [\chi^T] + 2 R_r \beta H_{\gamma_1} [i^T],$$

где $\gamma_1 > 0$ – настраиваемый параметр фильтра, $\psi_\eta \in \mathbb{R}$, $\phi_{\eta^T \eta} \in \mathbb{R}$, $\phi_\eta \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ и

$$(10) \quad \eta = \lambda(0) + \frac{R_s}{\beta} \nu_2(0) - \frac{1}{\beta} \nu_1(0) + \frac{\sigma L_s}{\beta} i(0), \chi = -\frac{R_s}{\beta} \nu_2 + \frac{1}{\beta} \nu_1 - \frac{\sigma L_s}{\beta} i(t)$$

с $\dot{\nu}_1 = u$, $\dot{\nu}_2 = i$ и неизвестными начальными условиями $\nu_1(0)$ и $\nu_2(0)$.

Затем, используя три фильтра с различными параметрами $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 > 0$ и следуя процедуре DREM, можно получить расширенную модель:

$$(11) \quad \Psi_\eta = \Phi_\eta \begin{bmatrix} \eta^T \eta & \eta \end{bmatrix}^T,$$

где $\Psi_\eta \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, $\Phi_\eta \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. После применения шага смешивания процедуры DREM и метода градиентного спуска, может быть получена оценка потока:

$$(12) \quad \dot{\hat{\eta}} = \gamma_\eta \Delta_\eta (z_\eta - \Delta_\eta \hat{\eta}), \quad \hat{\lambda} = \hat{\eta} + \chi,$$

где $\gamma_\eta > 0$ – коэффициент настройки, $\Delta_\eta = \det\{\Psi_\eta\}$ – определитель матрицы Ψ_η , а $z_\eta = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \text{Adj}\{\Phi_\eta\} \Psi_\eta$, $\text{Adj}\{\Phi_\eta\}$ – союзная матрица для Φ_η .

Для оценки момента нагрузки можно использовать градиентный алгоритм:

$$(13) \quad \dot{\hat{L}}_g = \gamma_\kappa \phi_\kappa \left(\psi_\kappa - \phi_\kappa \hat{L}_g \right),$$

где $\gamma_\kappa > 0$ – коэффициент настройки, $\phi_\kappa = n_p \mathcal{J} H_{\gamma_2} [\lambda \Omega]$,

$$(14) \quad \psi_\kappa = p H_{\gamma_4} [\hat{\lambda}] + \frac{R_r}{L_r} H_{\gamma_2} [\hat{\lambda}] - R_r \beta H_{\gamma_4} [i] - n_p \mathcal{J} H_{\gamma_4} [\hat{\lambda} z(t)],$$

здесь $\gamma_4 > 0$ – настраиваемый параметр фильтра и

$$(15) \quad \dot{z} = -\frac{k_v}{J} z - \frac{n_p \beta}{J} \hat{\lambda}^T \mathcal{J} i, \quad z(0) = 0; \quad \dot{\Omega} = -\frac{k_v}{J} \Omega - \frac{1}{J}, \quad \Omega(0) = 0.$$

Учитывая полученную оценку момента нагрузки, наблюдатель скорости вращения ротора примет следующий вид:

$$(16) \quad \hat{w}_g = z(t) + \Omega(t) \hat{L}_g.$$

5. Сравнение наблюдателей

Заметим, что наблюдатель магнитного потока в случае DREMBAO [1] имеет намного более сложную форму. Оценивание же момента нагрузки и скорости вращения сопоставимо по сложности. Кроме того, методы имеют много общего, в частности использование процедуры DREM, градиентного алгоритма оценивания, из-за этого их настройка во многом схожа.

Моделирование в программной среде Matlab/Simulink показало, что исследуемые алгоритмы обладают схожей чувствительностью к помехам измерения. На рис. 1 представлены результаты одного из моделирований, демонстрирующие работу наблюдателей. Параметры двигателя использовались следующие: $L_s = 140$ мГн, $L_r = 140$ мГн, $M = 117$ мГн, $R_s = 1.7$ Ом, $R_r = 3.9$ Ом,

$J = 0.00011$ кг·м², $n_p = 1$, $k_v = 0.01$ Н·м·с. В качестве метода управления был выбран стандартный векторный закон управления [6], где $\lambda_{ref} = [0.0455; 0]$ Вб, $w_{ref} = 15$ рад/с, а коэффициенты ПИД-регуляторов: $K_{p,i} = 100$, $K_{i,i} = 100$, $K_{\lambda,p} = 100$, $K_{\lambda,i} = 100$, $K_{\omega,p} = 100$, $K_{\omega,i} = 100$. Начальное значение момента нагрузки было равно $L = 0.1$ Н·м и сменилось ступенчатым образом на $L = 0.2$ Н·м после времени $t = 1$ с. Начальное значение скорости вращения $w(0) = 10$ рад/с. К сигналу силы тока была добавлена помеха измерения в виде равномерно распределенного случайного сигнала на отрезке $[-0.05 \ 0.05]$ с частотой 10 кГц.

Наблюдатели были настроены для обеспечения одинакового быстродействия для случая без помех. В наблюдателе на основе DREMBAO использовались следующие параметры: $\alpha_{\lambda 1} = 10$, $\alpha_{\lambda 2} = 50$; $\alpha_{\lambda 3} = 100$, $\gamma_{\lambda} = 1$, $\alpha_1 = 100$, $\alpha_2 = 500$, $\gamma_L = 10$, $\gamma_{\omega} = 10$. Для наблюдателя на основе GREBO были выбраны следующие параметры: $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 50$, $\gamma_3 = 100$, $\gamma_{\eta} = 0.5$, $\gamma_4 = 100$, $\gamma_{\kappa} = 8$.

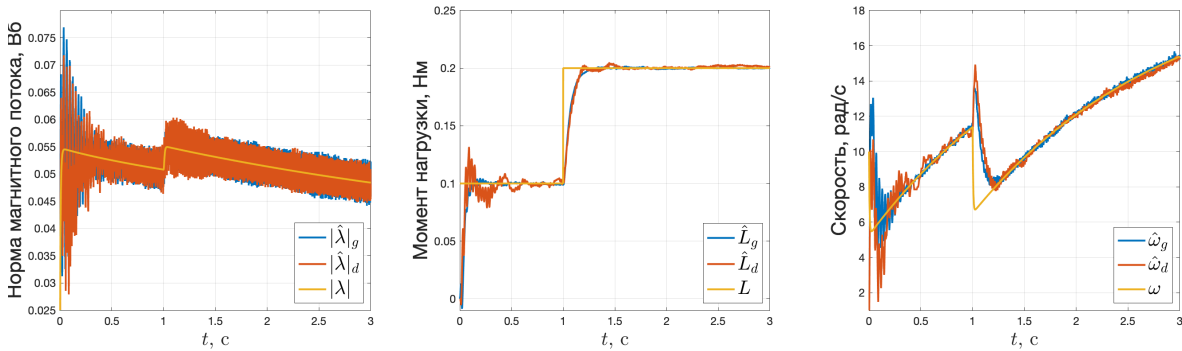


Рис. 1. Переходные процессы оцениваемых величин

6. Заключение

В работе получено два новых решения задачи оценивания состояния нелинейной модели асинхронного двигателя, в которых в отличие от известных результатов удалось учесть трение при вращении ротора. Сравнение решений показало небольшое преимущество метода GREBO, заключающееся в более простой форме получаемого алгоритма оценивания. Наблюдатель на основе DREMBAO имеет более сложную структуру в части оценивания магнитного потока. В остальном наблюдатели оказались сопоставимы. В части оценивания момента нагрузки и скорости вращения наблюдатели имеют схожую сложность. Настройка алгоритмов существенно не отличается. Чувствительность к помехам в измеряемом сигнале силы тока исследовалась с помощью компьютерного моделирования, где наблюдатели показали сопоставимые результаты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>.

Список литературы

1. Pyrkin A. et al. A flux and speed observer for induction motors with unknown rotor resistance and load torque and no persistent excitation requirement //International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2021. V. 35. №. 8. P. 1578-1593.
2. Ren Y. et al. Speed sensorless nonlinear adaptive control of induction motor using combined speed and perturbation observer //Control Engineering Practice. 2022. Т. 123. С. 105166.
3. Vedyakov A. et al. An Extension of Adaptive State Observers Using Dynamic Regressor Extension and Mixing With Relaxed Excitation Conditions //IFAC-PapersOnLine. 2022. V. 55. №. 12. P. 330-335.
4. Ortega R. et al. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical–biological reactors //Automatica. 2021. V. 129. P. 109635.
5. Aranovskiy S. et al. Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing //2016 American Control Conference (ACC). –IEEE, 2016. P. 6971-6976.
6. Nam K. H. AC motor control and electrical vehicle applications. CRC press, 2018.