

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-35-43

УДК 681.51

**Анализ точности оценивания состояний асинхронного электропривода
алгоритмами Люенбергера и Калмана**

**Виктор Григорьевич Букреев¹, Елена Борисовна Шандарова²,
Филипп Владимирович Перовщиков³**

^{1,2,3} Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация

¹ bukreev@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

² shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

³ fvp2@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7932-2744>

Аннотация

Предмет исследования. В сложных электромеханических объектах, содержащих электроприводы с асинхронными двигателями, часто затруднена или невозможна установка датчиков выходных переменных величин. В этом случае для определения выходных координат двигателя в систему управления электропривода необходимо введение наблюдателей состояния. Основные проблемы создания наблюдателей — наличие шумов и помех в измерительных цепях системы управления, которые влияют на точность оценки неизмеряемых переменных состояния. В работе представлено сравнение точности оценок, полученных в результате работы алгоритмов наблюдателя на основе фильтра Калмана и наблюдателя Люенбергера в системе асинхронного электропривода с векторным регулированием при зашумленности каналов измерения токов в обмотках статора асинхронного двигателя. **Методы.** Для синтеза алгоритмов наблюдателей состояния использованы методы теории идентификации и квазилинеаризация нелинейных моделей рассматриваемого объекта управления. Имитационная модель асинхронного двигателя построена на классической векторной полеориентированной системе управления, где в качестве сигнала обратной связи использована оценка угловой скорости вала двигателя. Модель реализует следующие блоки: математическую модель асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат α - β ; структуру алгоритма наблюдателей; процедуру преобразования базиса вектора тока и управляющего напряжения из неподвижного во вращающийся и наоборот; пропорционально-интегральные регуляторы тока, потокосцепления и скорости. S-образный задатчик интенсивности формирует кривую задания скорости. Входными сигналами для наблюдателей являются статорные напряжения и токи эталонной модели асинхронного двигателя. Коэффициенты адаптации для наблюдателя Люенбергера подобраны экспериментально из условия получения средней минимальной величины модуля разности оцениваемых величин. Ковариационные матрицы для наблюдателя на основе фильтра Калмана настроены на основании эксперимента, исходя из обеспечения минимума среднего значения абсолютной ошибки. **Основные результаты.** Получены временные зависимости переходных процессов угловой скорости вала, модуля векторов потокосцепления ротора и статорных токов. Выполнена оценка зависимостей при пуске асинхронного двигателя с номинальными значениями и значениями частоты и напряжения, составляющих 10 % от номинальных значений. Исследована работа алгоритмов оценивания при наличии шумовой составляющей, а также при изменении параметров схемы замещения асинхронного двигателя на ± 10 %. Получены результаты моделирования работы электропривода в пусковых режимах с механической нагрузкой, равной номинальному значению при частоте питающего напряжения 50 Гц и при 10 % от номинала для напряжения 1 Гц. Показано, что наибольшие относительные ошибки оценивания возникают в пусковом режиме работы электропривода, а максимальная точность достигается в случае применения нелинейного фильтра Калмана. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы при разработке систем автоматического управления бездатчиковыми электроприводами и частотно-регулируемого электропривода центробежных насосных установок добычи нефти.

Ключевые слова

нелинейный фильтр Калмана, наблюдатель Люенбергера, полеориентированное управление, векторное управление, асинхронный двигатель

Ссылка для цитирования: Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Перевошчиков Ф.В. Анализ точности оценивания состояний асинхронного электропривода алгоритмами Люенбергера и Калмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 35–43. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-35-43

State estimation accuracy analysis of an induction electric drive by the algorithms of Luenberger and Kalman

Victor G. Bukreev^{1✉}, Elena B. Shandarova², Filipp V. Perevoshchikov³

^{1,2,3} Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation

¹ bukreev@tpu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

² shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

³ fvp2@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7932-2744>

Abstract

In complex electromechanical objects containing electric drives with induction motors, it is often difficult or impossible to install sensors of output variables. In this case, to determine the output coordinates of the motor, it is necessary to introduce state observers into the control system of the electric drive. The main problems of creating observers are the presence of noise and interference in the measuring circuits of the control system which affect the accuracy of the estimation of immeasurable state variables. The paper presents a comparison of the accuracy of estimates obtained as a result of the work of the observer algorithms based on the Kalman filter and the observer of the Luenberger in the induction electric drive system, with vector control at the noise level of the current measurement channels in the stator windings of the induction motor. To synthesize algorithms for state observers, methods of identification theory and quasi-linearization of nonlinear models of the control object under consideration were used. The simulation model of an induction motor is based on a classical vector field-oriented control system where an estimate of the angular speed of the motor shaft is used as a feedback signal. The model implements the following blocks: a mathematical model of an induction motor in a two-phase fixed coordinate system α - β ; the structure of the observer algorithm; the procedure for converting the basis of the current vector and the control voltage from stationary to rotating and vice versa; proportional-integral regulators of current, flux linkage and angular speed. The S-shaped intensity setter forms a speed setting curve. The input signals for observers are the stator voltages and currents of the reference model of an induction motor. The adaptation coefficients for the Luenberger observer were selected experimentally from the condition of obtaining the average minimum value of the difference modulus of the estimated values. The covariance matrices for the observer based on the Kalman filter are configured on the basis of the experiment, ensuring a minimum of the average value of the absolute error. The time dependences of the transients of the angular speed of the shaft, the modulus of the flux linkage vectors of the rotor and stator currents are obtained. The dependencies were evaluated when starting an induction motor with nominal values and values of frequency and voltage amounting to 10 % of the nominal values. The work of estimation algorithms in the presence of a noise component, as well as when changing the parameters of the induction motor replacement circuit by $\pm 10\%$, is investigated. The results of modeling the operation of the electric drive in starting modes with a mechanical load equal to the nominal value at a supply voltage frequency of 50 Hz and at 10 % of the nominal value for a voltage of 1 Hz are obtained. It is shown that the greatest relative estimation errors occur in the starting mode of the electric drive, and the maximum accuracy is achieved in the case of using a nonlinear Kalman filter. The results of the work can be used in the development of automatic control systems for sensorless electric drives and frequency-controlled electric drive of centrifugal pumping units for oil production.

Keywords

nonlinear Kalman filter, Luenberger observer, field-oriented control, vector control, induction motor

For citation: Bukreev V.G., Shandarova E.B., Perevoshchikov F.V. State estimation accuracy analysis of an induction electric drive by the algorithms of Luenberger and Kalman. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 35–43 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-35-43

Введение

Современный электропривод представляет собой совокупность электромеханического преобразователя энергии, силового преобразователя и устройства управления. В некоторых случаях исполнительный механизм технологического оборудования и силовая часть электропривода — единый конструктивный модуль, расположенный на значительном удалении от системы управления. Это обуславливает невозможность получения измерительной информации о переменных состояниях электропривода исполнительного механизма [1–5].

В настоящее время высокий уровень микропроцессорной техники создает предпосылки для реализации в режиме реального времени процедуры вычисления

неизмеряемых переменных состояния в различных цифровых системах с помощью математических алгоритмов, называемых наблюдателями. Этот факт предопределяет более качественное решение задачи управления многими сложными электромеханическими объектами [6, 7].

Все более актуально для промышленного применения — использование бездатчиковой системы управления автоматизированным электроприводом, являющегося нелинейным объектом и обладающим стохастическими свойствами, связанными со случайными внешними воздействиями, шумами в каналах измерения и сетевыми помехами [8–10]. Помимо этого, особый интерес представляет качество работы алгоритма оценки при отличающихся расчетных параметрах

схемы замещения от реальных, так как идентификация параметров электропривода с необходимой точностью весьма сложна. Отметим, что в процессе работы двигателя неизбежно возникает дрейф заданных значений, которые изменяют параметры математической модели объекта управления, а, соответственно, и наблюдателя состояния. Данные изменения могут привести к неадекватной оценке переменных состояния и необратимо ухудшить заданные показатели качества бездатчикового электропривода, который ориентируется на вычисленные переменные состояния, как сигналы обратной связи. В настоящей работе выполнен анализ различных вариаций характеристик наблюдателя состояния при введении в имитационную модель перечисленных возмущающих воздействий.

Способы решения задач оценивания неизмеряемых переменных состояния

Для решения задачи управления электропривода необходимо иметь полную информацию о его векторе состояния. Так как из-за конструктивных особенностей технологического оборудования использование датчика скорости невозможно, вектор переменных состояния имеет вид $\mathbf{X} = [\mathbf{Y} \ \mathbf{Z}]^T$, где $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{Z}$ — вектора измеряемых и неизмеряемых переменных состояния. В таких системах рационально использовать наблюдающее устройство (наблюдатель), которое позволяет получить оценку неизмеряемой компоненты вектора состояния объекта.

На рис. 1 представлена классификация подходов наиболее часто используемых решений в задаче оценивания неизмеряемых переменных состояния объекта или системы [11].

В данной работе рассмотрены алгоритмы оценки неизмеряемых переменных состояния на основе фильтра Калмана и адаптивного наблюдателя Льюенбергера, которые используют уравнения электромагнитных процессов асинхронного двигателя [12–14].

Моделирование алгоритмов наблюдателей переменных состояния

Наблюдатель Льюенбергера для оценки частоты вращения асинхронного двигателя. Математическая модель электромагнитных процессов асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат α – β может быть записана в векторно-матричной форме [15]:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}(\omega)\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases} \quad (1)$$

где вектора: $\mathbf{X} = [i_{1\alpha} \ i_{1\beta} \ \psi_{2\alpha} \ \psi_{2\beta}]^T$ — переменных состояния объекта, $\mathbf{Y} = [i_{1\alpha} \ i_{1\beta}]^T$ — измеряемых величин, $\mathbf{U} = [U_{1\alpha} \ U_{1\beta}]^T$ — управляющих воздействий; матрицы:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{E} \ \mathbf{0}] \text{ — выхода, } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ — единичная, } \mathbf{A}(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} \mathbf{E} & \frac{A_r K_r}{L_e} \mathbf{E} - \frac{Z_p K_r \omega}{L_e} \mathbf{D} \\ K_r R_2 \mathbf{E} & -A_r \mathbf{E} + Z_p \omega \mathbf{D} \end{bmatrix} \text{ — параметров собствен-}$$

ной динамики объекта, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ — оператора по-

ворота на 90° , $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_e} \mathbf{E} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ — параметров управления;

компоненты пространственных векторов: $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, $U_{1\alpha}$, $U_{1\beta}$ — тока и напряжения статора, $\psi_{2\alpha}$, $\psi_{2\beta}$ — потокосцепления ротора; $R_e = R_1 + R_2 K_r^2$, $L_e = L_1 - \frac{L_m^2}{L_1}$, $K_r = \frac{L_m}{L_2}$, $A_r = \frac{R_2}{L_2}$ — коэффициенты, учитывающие параметры асинхронного двигателя; R_1 и R_2 — активные сопротивления статора и ротора; L_1 и L_2 — полные индуктивности статора и ротора; L_m — индуктивность цепи намагничивания; Z_p — количество пар полюсов; ω — угловая скорость вала двигателя.

Запишем уравнения перенастраиваемой модели асинхронного двигателя на основе системы уравнений (1) в виде [16]:

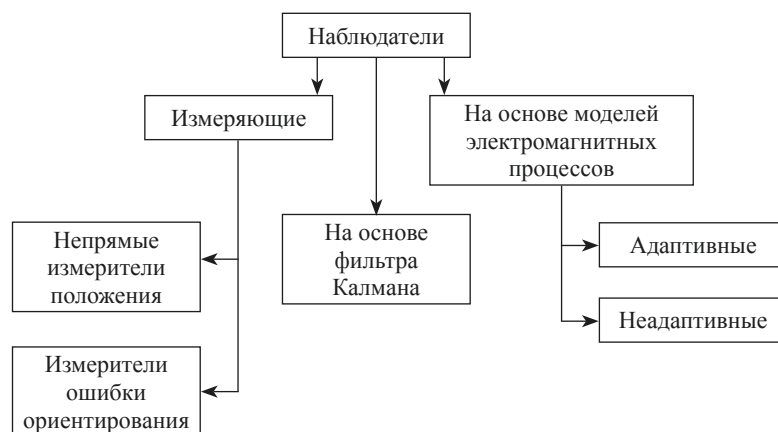


Рис. 1. Классификация наблюдателей состояния

Fig. 1. Classification of observers

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\mathbf{X}}}{dt} = \hat{\mathbf{A}}(\hat{\omega})\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{L}(\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y}), \\ \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{i}_{1\alpha} \ \hat{i}_{1\beta} \ \hat{\psi}_{2\alpha} \ \hat{\psi}_{2\beta}]^T$ и $\hat{\mathbf{Y}} = [\hat{i}_{1\alpha} \ \hat{i}_{1\beta}]^T$ — оценки векторов переменных состояния и измеряемых величин;

$$\hat{\mathbf{A}}(\hat{\omega}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} \mathbf{E} & \frac{A_r K_r}{L_e} \mathbf{E} - \frac{Z_p K_r \hat{\omega}}{L_e} \mathbf{D} \\ K_r R_2 \mathbf{E} & -A_r \mathbf{E} + Z_p \hat{\omega} \mathbf{D} \end{bmatrix} — перенастраиваемая матрица параметров собственной динамики.$$

Для обеспечения глобальной устойчивости алгоритма адаптации, при выполнении отрицательной определенности производной функции Ляпунова, запишем закон изменения оценки частоты вращения асинхронного двигателя [16, 17]:

$$\dot{\hat{\omega}}(t) = \frac{1}{Z_p} [K_i (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y})^T \mathbf{D} \hat{\Psi}_2 + K_p (\hat{\mathbf{Y}} - \mathbf{Y})^T \mathbf{D} \hat{\Psi}_2], \quad (3)$$

где $\hat{\Psi}_2 = [\hat{\psi}_{2\alpha} \ \hat{\psi}_{2\beta}]^T$ — оценка вектора потокоцепления; K_i и K_p — интегральный и пропорциональный коэффициенты закона адаптации. Явный вид стабилизирующей добавки $\mathbf{L}$ в уравнении системы (2) имеет вид:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -\hat{\omega} Z_p \frac{R_1}{R_2} \frac{L_2}{L_e} \mathbf{D} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Структура коэффициентов добавки и ее влияние на процесс оценивания рассмотрена, например в работах [16, 17].

На основе уравнений (2)–(4) реализуем модель наблюдателя в среде математического моделирования MATLAB Simulink. Подберем экспериментально коэффициенты закона адаптации (3) из условия минимума модуля средней разности оцениваемых величин. Входными сигналами для наблюдателя примем статорные напряжения и токи статора эталонной модели асинхронного двигателя в двухфазной неподвижной системе координат. В результате моделирования получим временные зависимости переходных процессов скорости вала и модулей векторов потокоцепления

ротора и статорных токов. Проведем оценку переходных процессов при пуске асинхронного двигателя на номинальных значениях частоты и напряжения (рис. 2), а также при работе двигателя на частоте и напряжении, равных десятой части от номинальных значений. В результате получим графики переходных процессов при идеальном измерении составляющих токов статора (рис. 2, а) и при наложении аддитивной шумовой составляющей (рис. 2, б).

Алгоритм нелинейного фильтра Калмана для оценивания частоты вращения асинхронного двигателя

Классический вариант оценки неизмеряемых переменных состояния стохастической непрерывной системы — расширенный фильтр Калмана. Для рассматриваемого случая математическую модель электро-механической системы запишем следующим образом [8, 10, 18]:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}(\omega)\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{w} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U}), \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{v} \end{cases}, \quad (5)$$

где $\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U})$ — дифференцируемая нелинейная функция динамики системы; $\mathbf{X} = [i_{1\alpha} \ i_{1\beta} \ \psi_{2\alpha} \ \psi_{2\beta} \ \omega]^T$ — расширенный вектор переменных состояния асинхронного двигателя с включением угловой скорости вращения вала двигателя; $\mathbf{A}(\omega) =$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} \mathbf{E} & \frac{A_r K_r}{L_e} \mathbf{E} - \frac{Z_p K_r \omega}{L_e} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ K_r R_2 \mathbf{E} & -A_r \mathbf{E} + Z_p \omega \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} — матрица параме-$$

тров собственной динамики объекта; $\mathbf{w}$ и $\mathbf{v}$ — нормальный случайный процесс и белый гауссовский шум измерений с нулевыми математическими ожиданиями $E[\mathbf{w}] = \mathbf{0}$ и $E[\mathbf{v}] = \mathbf{0}$ соответственно. Отметим, что нелинейная система (5) составлена в предположении о доминирующем значении электро-механической постоянной времени асинхронного двигателя по сравнению со значениями его электромагнитных постоянных. Это предопределяет равенство нулю производной угловой

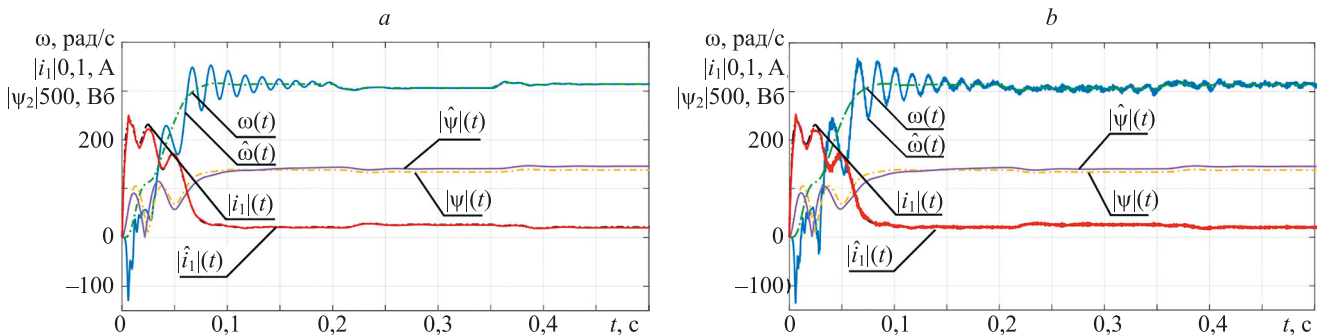


Рис. 2. Динамика изменения переменных состояния асинхронного двигателя при пуске на частоту 50 Гц при использовании наблюдателя Люенбергера без наложения шумовой компоненты в каналы измерений (а); с наложением шумовой составляющей (б)

Fig. 2. Dynamics of the change in the variables of the state of the induction motor when starting at a frequency of 50 Hz and using the Luenberger observer without superimposing a noise component into the measurement channels (a); with the superimposition of a noise component (b)

скорости вращения вала асинхронного двигателя на малом интервале дискретности расчетов и появлению нулевых значений параметров соответствующих компонент матрицы $\mathbf{A}(\omega)$.

Для дальнейшей организации вычислительного алгоритма оценки переменных состояния представим уравнения (5) в разностной форме [14, 15, 18]:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{U}_k + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{Y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{cases}, \quad (6)$$

где $\mathbf{A}_k \approx \mathbf{A}h + \mathbf{I} =$

$$= \begin{bmatrix} \frac{-R_e h}{L_e} + 1 & 0 & \frac{A_r K_r h}{L_e} & \frac{\omega_k K_r Z_p h}{L_e} & 0 \\ 0 & \frac{-R_e h}{L_e} + 1 & \frac{-\omega_k K_r Z_p h}{L_e} & \frac{A_r K_r h}{L_e} & 0 \\ K_r R_2 h & 0 & -A_r h + 1 & \omega_k Z_p h & 0 \\ 0 & K_r R_2 h & \omega_k Z_p h & -A_r h + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

и $\mathbf{B}_k = \mathbf{B}h$ — дискретные матрицы параметров собственной динамики и параметров управления; $\mathbf{C}_k = \mathbf{C}$ — матрица выхода; h — интервал интегрирования; k — номер интервала расчета.

Численная реализация алгоритма фильтрации (6) состоит из этапа экстраполяции и этапа коррекции [18]. Первоначально запишем модель для экстраполяции:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_k \mathbf{U}_k, \\ \mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{\Phi}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{\Phi}_k^T + \mathbf{Q}_k \end{cases}, \quad (7)$$

где $\hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1}$ — апостериорная оценка вектора переменных состояния; $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ — априорная оценка вектора переменных состояния; $\mathbf{P}_{k-1|k-1} = \text{cov}(\mathbf{X}_{k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1})$ — апостериорная ковариационная матрица вектора переменных состояния, включающая в себя оценку дисперсий погрешности вычисленного состояния; $\mathbf{P}_{k|k-1} = \text{cov}(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})$ — априорная ковариационная матрица вектора переменных состояния; $\mathbf{\Phi}_k \approx$

$$\approx \left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} (\mathbf{A}(\omega) \mathbf{X} + \mathbf{B} \mathbf{U}) \right)_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}} h + \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \frac{-R_e h}{L_e} + 1 & 0 & \frac{A_r K_r h}{L_e} & \frac{\omega_k K_r Z_p h}{L_e} & \frac{\Psi_{2\beta_k} Z_p h}{L_e} \\ 0 & \frac{-R_e h}{L_e} + 1 & \frac{-\omega_k K_r Z_p h}{L_e} & \frac{A_r K_r h}{L_e} & \frac{-\Psi_{2\alpha_k} Z_p h}{L_e} \\ K_r R_2 h & 0 & -A_r h + 1 & \omega_k Z_p h & -\Psi_{2\beta_k} Z_p h \\ 0 & K_r R_2 h & \omega_k Z_p h & -A_r h + 1 & \Psi_{2\alpha_k} Z_p h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} —$$

дискретизированная матрица собственной динамики линеаризованной системы уравнений (5), где производная матрицы $\mathbf{A}(\omega)$ по векторному аргументу представляет собой матрицу Якоби; $\mathbf{Q}_k = \text{cov}(\mathbf{w}_k) = \mathbf{E}[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T]$ — ковариационная матрица случайного процесса, которая при некоррелируемых случайных величинах преобразуется в матрицу $\mathbf{Q}_k = \text{diag}(\sigma_{\mathbf{X}}^2)$, на главной диагонали которой расположены дисперсии компонент вектора

переменных состояния. После экстраполяции произведем коррекцию согласно системе уравнений [18]:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{Y}}_k, \\ \mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{E} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \end{cases}, \quad (8)$$

где $\mathbf{H}_k = \frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} (\mathbf{C} \mathbf{X})|_{\mathbf{X}=\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}}$ — линеаризованная матрица выхода; $\tilde{\mathbf{Y}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ — отклонение вектора измеряемых величин и его оценки; $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{S}_k^{-1}$ — оптимальная по Калману матрица усиления отклонения вектора измеряемых величин; $\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k = \text{cov}(\tilde{\mathbf{Y}}_k)$ и $\mathbf{R}_k = \text{cov}(\mathbf{v}_k) = \mathbf{E}[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T]$ — ковариационные матрицы вектора отклонения и шума измерений.

В соответствии с уравнениями (5)–(8) создадим скрипт в MATLAB Simulink. Алгоритм оценки начнем с инициализации вектора $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$, матрицы $\mathbf{P}_{k|k-1}$ и вектора измерений $\mathbf{Z}_k$, элементы которых имеют первоначально нулевые значения. Далее вычислим значения компонент матрицы $\mathbf{K}_k$, которые в свою очередь позволят рассчитать скорректированное значение вектора $\hat{\mathbf{X}}_{k|k}$ переменных состояния и матрицу $\mathbf{P}_{k|k}$. Экстраполяция значений вектора $\hat{\mathbf{X}}_{k|k}$ переменных состояния производится по результатам вычисления $\mathbf{K}_k$ до момента времени следующего наблюдения вектора $\mathbf{Z}_k$ измеряемых переменных. Такую последовательность действий повторим в каждом интервале вычислений алгоритма оценивания. Проведем исследование работоспособности алгоритма оценки на тестовых массивах данных с шумовой составляющей и без нее. В результате установлена высокая степень сходимости вычислительного алгоритма при изменении значений матрицы $\mathbf{A}(\omega)$ параметров, зависящих от частоты вращения асинхронного двигателя. Ковариационные матрицы настроены экспериментальным образом на основе минимума среднего значения абсолютной ошибки оценки ω . На рис. 3 представлены графики переходных процессов частоты вращения, потокоцепления ротора, тока статора асинхронного двигателя и их оценки, полученные в результате моделирования. Временные зависимости, при идеальном измерении вектора $\mathbf{Y}$, показаны на рис. 3, а, а в условиях электромагнитных помех, воздействующих на датчики — на рис. 3, б.

Для численного определения качества оценок рассмотренных алгоритмов наблюдателей воспользуемся средним арифметическим значением относительных ошибок оценивания, которое вычислим по формуле:

$$\eta_x = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{|x_j(t_j) - \hat{x}_j(t_j)|}{|x_j(t_j)|}, \quad (9)$$

где $x_j(t_j)$ и $\hat{x}_j(t_j)$ — компонента и оценка компоненты векторов переменных состояния в момент времени t_j .

В табл. 1 приведены значения ошибок оценивания компонент вектора переменных состояния по исходным данным без и с шумами, рассчитанных по формуле (9).

В интервале времени 0,2–0,35 с электродвигателю подключена ступенчатая нагрузка, равная номинальной

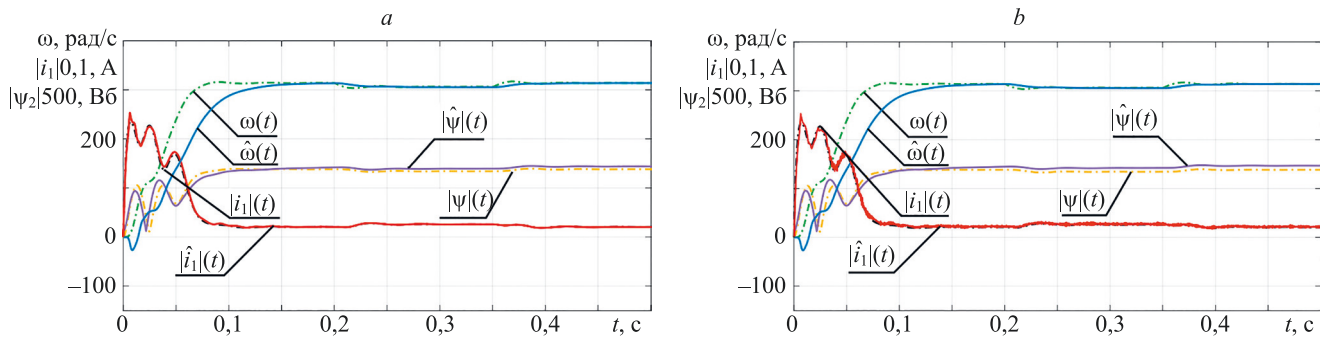


Рис. 3. Динамика изменения переменных состояния асинхронного двигателя при пуске на частоту 50 Гц при использовании фильтра Калмана без наложения шумовой компоненты в каналы измерений (а); с наложением шумовой составляющей (б)

Fig. 3. Dynamics of the change in the variables of the induction motor state when starting at a frequency of 50 Hz and using the Kalman filter without superimposing a noise component into the measurement channels (a); with the superimposition of a noise component (b)

нагрузке в случае работы на частоте 50 Гц и равная 10 % от номинальной нагрузки в случае запуска на частоте 1 Гц.

Во временном интервале 0,35–0,5 с произошел сброс приложенной ранее нагрузки.

Из анализа представленных данных видно, что во всех режимах работы и при отклонениях параметров схемы замещения электродвигателя в диапазоне $\pm 10\%$ от номинальных оценка вектора тока в разы лучше при использовании наблюдателя на основе фильтра Калмана. Аналогичный вывод можно сделать об оценке вектора потокоцепления за исключением моментов

пуска, где расхождение ошибок больше, чем в 10 раз. Похожая тенденция наблюдается при оценке угловой скорости. Точность вычисления при использовании фильтра Калмана выше, но периодически видны нарушения. Так, например, при пуске на номинальную скорость (в интервале 0,35–0,5 с) без наложения шумовой составляющей в каналы измерения с увеличенными параметрами схемы замещения, оценка на основе фильтра Калмана хуже, чем у наблюдателя Люенбергера в 2,58 раз, что не наблюдается в аналогичных модельных экспериментах при уменьшении параметров двигателя и наличии помех в сигналах тока и напряжения.

Таблица 1. Ошибки оценивания без и с введением шумовой компоненты в каналы измерения

Table 1. Estimation errors without superimposing a noise component into the measurement channels

Время, с	ω , %				$ i_1 $, %				$ \psi_2 $, %			
	наблюдатель Люенбергера		фильтр Калмана		наблюдатель Люенбергера		фильтр Калмана		наблюдатель Люенбергера		фильтр Калмана	
	$\omega \cdot 10$	$\omega/10$	$\omega \cdot 10$	$\omega/10$	$ i_1 \cdot 10$	$ i_1 /10$	$ i_1 \cdot 10$	$ i_1 /10$	$ \psi_2 \cdot 10$	$ \psi_2 /10$	$ \psi_2 \cdot 10$	$ \psi_2 /10$
Без введения шумовой компоненты в каналы измерения												
0–0,2 (Пуск 50 Гц)	110,4	81,08	31,98	32,94	2,60	5,58	2,54	0,57	11,99	22,41	30,82	14,65
0,2–0,35	0,18	0,93	0,49	0,52	2,20	4,34	0,17	0,18	4,50	6,08	1,25	0,75
0,35–0,5	0,19	0,34	0,48	0,26	3,80	4,02	0,24	0,13	5,28	5,62	0,56	0,60
0–0,2 (Пуск 1 Гц)	338,9	203,9	116,6	85,22	3,97	7,96	1,30	0,99	3,46	15,99	55,15	21,18
0,2–0,35	0,64	2,433	5,05	0,81	4,32	3,35	0,34	0,11	5,45	4,92	5,58	1,39
0,35–0,5	0,99	4,08	1,07	1,52	3,71	2,94	0,13	0,14	5,52	5,73	2,67	2,49
С введением шумовой компоненты в каналы измерения												
0–0,2 (Пуск 50 Гц)	147,5	167,9	31,89	32,47	5,98	7,02	2,59	1,80	12,65	21,08	30,88	14,93
0,2–0,35	1,21	1,14	0,49	0,52	6,39	6,91	0,35	1,44	4,56	5,94	1,23	0,77
0,35–0,5	1,10	1,59	0,48	0,26	6,58	6,93	0,49	1,50	5,34	5,56	0,56	0,62
0–0,2 (Пуск 1 Гц)	375,7	293,2	118,6	79,68	4,04	7,97	1,30	0,93	3,42	15,93	55,33	19,18
0,2–0,35	3,22	2,43	5,06	0,81	4,30	3,35	0,35	0,11	5,43	4,92	5,59	1,39
0,35–0,5	3,82	5,11	1,08	1,51	3,69	2,92	0,15	0,17	5,56	5,76	2,67	2,48

Моделирование бездатчиковой системы управления регулируемым электроприводом

Для исследования режимов работы бездатчикового электропривода создана имитационная модель его системы управления с использованием закона векторного регулирования (рис. 4).

Модель представляет классическую реализацию векторной полеориентированной системы управления, которая использует в качестве сигнала обратной связи оценку по угловой скорости. Блок «Induction motor» включает в себя нелинейные уравнения асинхронного двигателя (1); блок «Observer» реализует структуру алгоритма наблюдателей, описанных с помощью формул (2), (6), (7); блок «Regulators» состоит из ПИ-регуляторов тока, потокосцепления и скорости; блоки «Parke transform» и «Reverse Parke transform» проводят процедуру преобразования базиса вектора тока и управляющего напряжения из неподвижного во вращающийся и наоборот; блок «Intensity setter» формирует кривую задания скорости. В данном случае использован S-образный задатчик интенсивности.

Используя S-задатчик интенсивности задания частоты вращения асинхронного двигателя, выполним численное моделирование системы управления при отработке следующих режимов:

№ 1 – пуск двигателя до номинального значения ω_n частоты вращения;

№ 2 – работа на номинальной частоте вращения ω_n ;

№ 3 – уменьшение частоты вращения до $0,5\omega_n$;

№ 4 – работа с частотой вращения $0,5\omega_n$;

№ 5 – уменьшение частоты вращения до $0,1\omega_n$;

№ 6 – работа с частотой вращения $0,1\omega_n$;

№ 7 – торможение и остановка двигателя.

В результате моделирования получены зависимости переходных процессов всех компонент вектора переменных состояния. Приведем переходные процессы угловой скорости вращения вала двигателя $\omega(t)$, задающего значения скорости $\omega_s(t)$ и электромагнитного момента $M_e(t)$ при использовании наблюдателя Люенбергера (рис. 5, а) и фильтра Калмана (рис. 5, б).

Для вычисления относительной ошибки ξ_ω применим соотношение:

$$\xi_\omega = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|\omega_s(t_i) - \omega(t_i)|}{|\omega(t_i)|}. \quad (10)$$

Табл. 2 показывает значения относительных ошибок регулирования при работе векторной системы управления, замкнутой по оценке угловой скорости. Значения получены при помощи формулы (10).

Исходя из полученных количественных данных табл. 2, видно, что незначительно лучше в номинальном режиме (№ 1) работы электропривода себя показывает наблюдатель Люенбергера, так как его относительная ошибка на 11,3 % меньше, чем ошибка в аналогичном режиме работы, полученная при вычислении по алгоритму фильтра Калмана. Несмотря на это, в остальных шести режимах работы двигателя существенный выигрыш в качестве оценки имеет наблюдатель на основе фильтра Калмана. Так, например, абсолютный максимум разности ошибок виден в статике на скорости $0,1\omega_n$, где ошибка ξ_ω фильтра Калмана в 10,74 раза меньше, чем у наблюдателя Люенбергера.

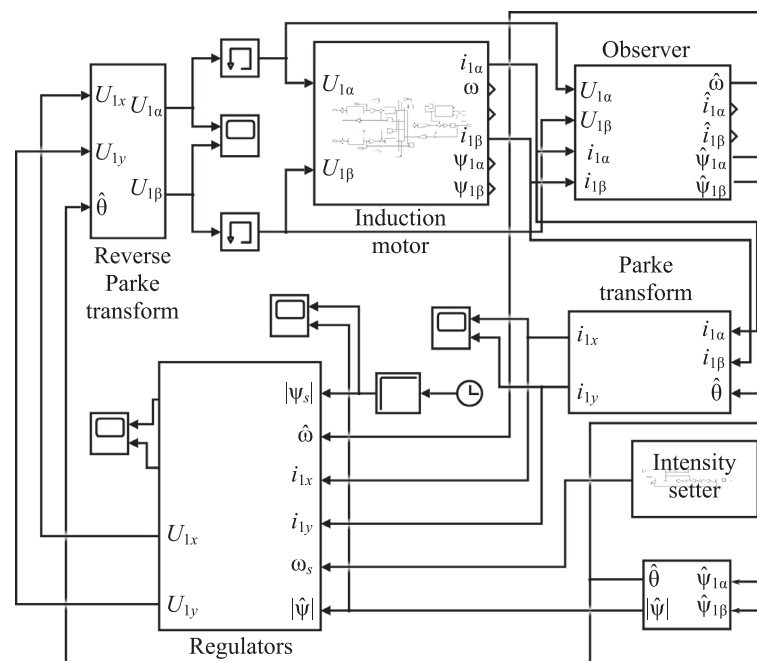


Рис. 4. Имитационная модель векторной бездатчиковой системы управления асинхронного двигателя, где U_{1x} , U_{1y} , i_{1x} , i_{1y} — проекции вектора напряжения и тока статора во вращающейся системе координат xy ; $|\psi_s|$, ω_s — задание на модуль потокосцепления и угловую скорость вращения ротора; $\hat{\theta}$ — оценка аргумента вектора потокосцепления

Fig. 4. Simulation model of a vector sensorless induction motor control system with the projections of the stator voltage and current vector in the rotating coordinate system xy ; $|\psi_s|$, ω_s is the task for the flux linkage module and the angular speed of the rotor; $\hat{\theta}$ is the evaluation of the flux vector argument

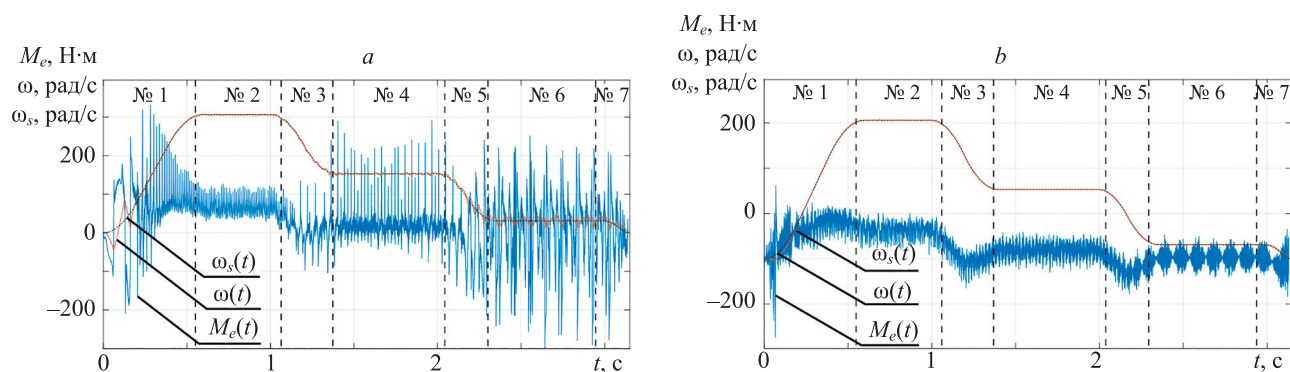


Рис. 5. Динамика изменения частоты вращения вала двигателя и электромагнитного момента при использовании: наблюдателя Люенбергера (а); фильтра Калмана (б)

Fig. 5. Dynamics of changes in the shaft speed and electromagnetic torque when using the Luenberger observer (a) and the Kalman filter (b)

Таблица 2. Ошибки регулирования при использовании бездатчиковой векторной системы управления, %

Table 2. Control errors when using a sensorless vector control system, percent

Номер режима	Наблюдатель Люенбергера	Фильтр Калмана
1	22,860	5,692
2	0,246	0,274
3	0,668	0,243
4	0,891	0,172
5	3,580	0,425
6	3,157	0,294
7	4,107	2,024

Это связано в первую очередь с тем, что закон адаптации угловой скорости наблюдателя Люенбергера имеет фиксированную структуру с постоянными параметрами пропорциональной и интегральной части в отличие от постоянно меняющейся матрицы $\mathbf{K}_k$, компоненты которой оптимальны и позволяют получить лучшую оценку в условиях зашумленности сигнала. Однако «платой» за лучшее качество служит обилие матричных операций и сложность подбора семи ковариаций в отличие от

наблюдателя Люенбергера, где нужно настроить лишь два параметра закона адаптации.

Заключение

В работе исследован асинхронный электропривод насосного агрегата. В программном комплексе MATLAB построена имитационная модель асинхронного двигателя, основанная на системе дифференциальных уравнений в неподвижной системе координат.

Для решения задачи бездатчикового векторного управления асинхронным электроприводом насосного агрегата реализованы алгоритмы оценки неизмеримых переменных, позволяющие провести оценку угловой скорости асинхронного двигателя, реализующие наблюдатель Люенбергера и нелинейный фильтр Калмана.

В процессе вычислительных экспериментов установлено, что наилучшую оценку при наличии шума в измерительных каналах во всех режимах работы электропривода позволяет получить фильтр Калмана, ошибка оценивания при работе которого в несколько раз меньше, чем при использовании наблюдателя Люенбергера. Однако следует отметить, что наблюдатель Люенбергера существенно быстрее реагирует на возмущения во всех режимах работы электропривода.

Литература

1. Виноградов А.Б., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2006. № 9. С. 50–55.
2. Вдовин В.В., Панкратов В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 4. С. 147–153.
3. Краснова С.А., Уткин В.А. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем. М.: Наука, 2006. 272 с.
4. Данг Б., Пыркин А.А., Бобцов А.А., Ведяков А.А. Синтез адаптивного наблюдателя для нестационарных нелинейных систем с неизвестными полиномиальными параметрами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 3. С. 374–379. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-374-379>

References

1. Vinogradov A.B., Sibirtcev A., Kolodin I. Adaptive-vector control system of a sensorless asynchronous explosion-proof electric drive (EPV series). *Silovaya Elektronika*, 2006, no. 9, pp. 50–55. (in Russian)
2. Vdovin V.V., Pankratov V.V. Synthesis of an adaptive coordinate observer of a sensorless asynchronous electric drive. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 147–153. (in Russian)
3. Krasnova S.A., Utkin V.A. *Cascade Synthesis of the State Observers for the Dynamic Systems*. Moscow, Nauka Publ., 2006, 272 p. (in Russian)
4. Dang B., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Vedyakov A.A. Adaptive observer design for time-varying nonlinear systems with unknown polynomial parameters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 374–379. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-374-379>

5. Арановский С.В., Бобцов А.А., Никифоров В.О. Синтез наблюдателя для нелинейного объекта в условиях гармонического возмущения, приложенного к выходной переменной // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 3(67). С. 32–38.
6. Mouna B.H., Lassaad S. Speed sensorless indirect stator field oriented control of induction motor based on Luenberger observer // Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. V. 3. 2006. P. 2473–2478. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2006.295961>
7. Khadar S., Kouzou A., Hafaifa A. Sensorless direct torque control of induction motor with an open-end stator winding using an adaptive Luenberger observer // Proc. of the 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). 2018. P. 1355–1362. <https://doi.org/10.1109/SSD.2018.8570691>
8. Пилаев С.Н., Еремин М.Ю., Аксенов И.И., Афоничева Д.Д. Моделирование наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя на основе фильтра Калмана в программе Simintech // Наука в центральной России. 2021. № 6(54). С. 67–76. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-6-67-76>
9. Белов М.П., Фюонг Ч.Х., Носилов И.С. Управление электроприводом крупного радиотелескопа с линейно-квадратичным гауссовским регулятором // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 9. С. 52–58.
10. Гаргаев А.Н., Каширских В.Г. Применение фильтра Калмана для динамической идентификации двигателей постоянного тока // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 128–130.
11. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2015. 60 с.
12. Yin Z., Bai C., Du N., Du C., Liu J. Research on internal model control of induction motors based on Luenberger disturbance observer // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. V. 36. P. 8155–8170. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3048429>
13. Zerdali E. Adaptive extended Kalman filter for speed-sensorless control of induction motors // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2019. V. 34. N 2. P. 789–800. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2866383>
14. Zhao Q., Yang Z., Sun X., Ding Q. Speed-sensorless control system of a bearingless induction motor based on iterative central difference Kalman filter // International Journal of Electronics. 2020. V. 107. N 9. P. 1524–1542. <https://doi.org/10.1080/00207217.2020.1727026>
15. Nos O.V. Matrix transformations in mathematical models of an induction motor // Proc. of the 2008 9th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. V. 1. 2008. P. 142–144. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2008.4897073>
16. Вдовин В.В. Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск: НГТУ, 2014. 244 с.
17. Панкратов В.В., Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов. Новосибирск: НГТУ, 2012. 162 с.
18. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 1998. 760 p.
5. Aranovskiy S., Bobtsov A., Nikiforov V. Observer design of an unknown sinusoidal output disturbance for nonlinear plant. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 3(67), pp. 32–38. (in Russian)
6. Mouna B.H., Lassaad S. Speed sensorless indirect stator field oriented control of induction motor based on Luenberger observer. *Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. V. 3*, 2006, pp. 2473–2478. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2006.295961>
7. Khadar S., Kouzou A., Hafaifa A. Sensorless direct torque control of induction motor with an open-end stator winding using an adaptive Luenberger observer. *Proc. of the 2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2018, pp. 1355–1362. <https://doi.org/10.1109/SSD.2018.8570691>
8. Pilyaev S., Eremin M., Aksenov I., Afonicheva D. Simulation of an asynchronous state observer electric motor based on the kalman filter in the simintech program. *Science in Central Russia*, 2021, no. 6(54), pp. 67–76. (in Russian). <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-6-67-76>
9. Belov M.P., Phuong T.H., Nosirov I.S. Large radio telescope control system with linear-quadratic gaussian controller. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University Journal*, 2017, no. 9, pp. 52–58. (in Russian)
10. Gargaev A.N., Kashirskih V.G. Application of Kalman filter for dynamic identification of DC motors. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2013, no. 1, pp. 128–130. (in Russian)
11. Kalachev Yu.N. *State Observers in Vector Electric Drives*. Moscow, 2015, 60 p. (in Russian)
12. Yin Z., Bai C., Du N., Du C., Liu J. Research on internal model control of induction motors based on Luenberger disturbance observer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, pp. 8155–8170. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3048429>
13. Zerdali E. Adaptive extended Kalman filter for speed-sensorless control of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 789–800. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2866383>
14. Zhao Q., Yang Z., Sun X., Ding Q. Speed-sensorless control system of a bearingless induction motor based on iterative central difference Kalman filter. *International Journal of Electronics*, 2020, vol. 107, no. 9, pp. 1524–1542. <https://doi.org/10.1080/00207217.2020.1727026>
15. Nos O.V. Matrix transformations in mathematical models of an induction motor. *Proc. of the 2008 9th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. V. 1*, 2008, pp. 142–144. <https://doi.org/10.1109/APEIE.2008.4897073>
16. Vdovin V.V. *Adaptive algorithms for coordinate estimation of the sensorless AC electric drives with an extended control range*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Novosibirsk, NSTU, 2014, 244 p. (in Russian)
17. Pankratov V.V., Kotin D.A. *Adaptive Algorithms For Sensorless Vector Control of Asynchronous Electric Drives of Carrying and Lifting Machines*. Novosibirsk, NSTU, 2012, 143 c. (in Russian)
18. Vas P. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. Oxford University Press, 1998, 760 p.

Авторы

Букреев Виктор Григорьевич — доктор технических наук, профессор, профессор, Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 7005611043](https://orcid.org/0000-0001-9861-9765), <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>, bukreev@tpu.ru

Шандарова Елена Борисовна — кандидат технических наук, доцент, Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 6506850084](https://orcid.org/0000-0001-7473-2771), <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>, shandarovaelena@mail.ru

Перевощиков Филипп Владимирович — студент, Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 57216875510](https://orcid.org/0000-0002-7932-2744), <https://orcid.org/0000-0002-7932-2744>, fvp2@tpu.ru

Authors

Victor G. Bukreev — D.Sc., Full Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 7005611043](https://orcid.org/0000-0001-9861-9765), <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>, bukreev@tpu.ru

Elena B. Shandarova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 6506850084](https://orcid.org/0000-0001-7473-2771), <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>, shandarovaelena@mail.ru

Filipp V. Perevoshchikov — Student, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 57216875510](https://orcid.org/0000-0002-7932-2744), <https://orcid.org/0000-0002-7932-2744>, fvp2@tpu.ru