

EDN: EYPOUM

УДК 621.3.078.4

Observers of the State of Asynchronous Electric Drive Based on the Kalman Filter

Alexander N. Pakhomov*,
Aleksandr A. Fedorenko and Konstantin S. Fediy
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 13.02.2023, received in revised form 21.06.2023, accepted 07.07.2023

Abstract. In asynchronous electric drive control systems, a vector method of variable control is used to increase dynamic performance. At the same time, in order to reduce the cost of the control system, it is advisable to use various observers of the state of the coordinates of the electric drive. The purpose of the work is to study the operation of the Kalman filter as an observer of the state of variables of an asynchronous motor, as well as to check its sensitivity to variations in the parameters of the control object. To achieve this goal, methods of the theory of automatic control, including the method of state variables, were used. Numerical studies of processes in the identification system under development were performed in the MATLAB computing environment (SIMULINK application software package). The conducted studies have shown that the quality of the status identifier of an asynchronous motor having the lowest sensitivity to variations in its parameters is the Kalman filter in the variable stator current – rotor flow coupling, which makes it possible to recommend it for use as a state observer in sensorless asynchronous electric drive systems with vector control.

Keywords: Kalman filter, asynchronous electric drive, state space, transient process, observing device.

Citation: Pakhomov, A. N., Fedorenko, A. A. and Fediy, K. S. Observers of the state of asynchronous electric drive based on the Kalman filter. *J. Sib. Fed.Univ. Eng. & Technol.*, 2023, 16(5), 575–583. EDN: EYPOUM



Наблюдатели состояния асинхронного электропривода на основе фильтра Калмана

А. Н. Пахомов, А. А. Федоренко, К. С. Федий
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В системах управления асинхронного электропривода для повышения динамических показателей используется векторный способ регулирования переменных. При этом с целью удешевления системы управления целесообразно применять различные наблюдатели состояния координат электропривода. Цель исследования – изучение работы фильтра Калмана в качестве наблюдателя состояния переменных асинхронного двигателя, а также проверка его чувствительности к вариациям параметров объекта управления. Для достижения поставленной цели использовались методы теории автоматического управления, в том числе метод переменных состояния. Численные исследования процессов в разрабатываемой идентификационной системе выполнены в вычислительной среде MATLAB (пакет прикладных программ SIMULINK). Проведенные исследования показали, что в качестве идентификатора состояния асинхронного двигателя, имеющего самую низкую чувствительность к вариации его параметров, является фильтр Калмана в переменных ток статора – потокосцепление ротора, что позволяет рекомендовать его для использования в качестве наблюдателя состояния в бездатчиковых системах асинхронного электропривода с векторным управлением.

Ключевые слова: фильтр Калмана, асинхронный электропривод, пространство состояний, переходный процесс, наблюдающее устройство.

Цитирование: Пахомов А. Н. Наблюдатели состояния асинхронного электропривода на основе фильтра Калмана / А. Н. Пахомов, А. А. Федоренко, К. С. Федий. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(5). С. 575–583. EDN: EYPOUM

В настоящее время в промышленности отмечается повышенный интерес в использовании и развитии асинхронного электропривода. Повсеместное применение частотно-регулируемого электропривода обусловлено высокими показателями регулирования, возможностью автоматизации технологического процесса, повышением энергоэффективности производства.

С целью повышения динамических показателей и возможностью регулирования момента на валу асинхронного двигателя (АД) целесообразно использовать векторный способ управления переменными АД [1]. Для исключения из системы электропривода дорогостоящих датчиков координат (скорости, момента, потокосцепления и др.) используются наблюдатели (идентификаторы) состояния, что позволяет перейти к бездатчиковому векторному управлению асинхронным электроприводом [2].

В статье рассматривается применение фильтра Калмана в качестве наблюдателя состояния переменных АД. Для обеспечения универсальности электропривода и повышения его надежности ставится задача идентификации текущего значения угловой скорости ротора АД. Актуальность задачи обусловлена стремлением разработчиков асинхронного электропривода исключить датчик скорости вращения ротора АД с целью удешевления системы и повышения её отказоустойчивости. Особенностью бездатчиковых систем управления электроприводов

является повышенная чувствительность к параметрическим возмущениям [3]. Поэтому в задаче исследований входит проверка робастности бездатчиковых электроприводов с различными идентификаторами состояния при изменении параметров двигателя.

Для реализации наблюдателей используются математические модели АД, состоящие из системы нелинейных дифференциальных уравнений. Рассмотрим два варианта математических моделей АД, различие которых заключается в выборе переменных состояния. В работе используется математическая модель обобщенной электрической машины в неподвижной системе координат α, β [4]. Для упрощения записи математических моделей АД и наблюдателей применяется аппарат пространства состояний.

В первом случае используется вектор состояния X и вектор управляющих воздействий U :

$$X = [i_{S\alpha} \ i_{S\beta} \ \psi_{R\alpha} \ \psi_{R\beta} \ \omega]^T \text{ и } U = [u_{S\alpha} \ u_{S\beta}]^T,$$

где $i_{S\alpha}, i_{S\beta}, u_{S\alpha}, u_{S\beta}$ – компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора АД; $\psi_{R\alpha}, \psi_{R\beta}$ – компоненты пространственного вектора потокосцепления ротора; ω – скорость вращения вала АД.

Тогда уравнения состояния АД можно записать в виде:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \text{ и } Y = CX,$$

где $Y = [i_{S\alpha} \ i_{S\beta}]^T$ – вектор выходных переменных; матрицы динамики A , входа B и выхода C равны:

$$A = \begin{Bmatrix} -a_{11} & 0 & a_{12} & a_{13} & 0 \\ 0 & -a_{11} & -a_{13} & a_{12} & 0 \\ a_{14} & 0 & -a_{15} & -a_{16} & 0 \\ 0 & a_{14} & a_{16} & -a_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}; B = \begin{Bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}; C = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

Следует отметить, что для упрощения матриц принято допущение постоянства (стабилизации) скорости АД, т.е. $d\omega / dt = 0$.

Коэффициенты матриц A, B, C можно определить согласно выражениям [5]:

$$a_{11} = \frac{R_S L_R^2 + R_R L_m^2}{(L_R L_S - L_m^2) L_R}; a_{12} = \frac{R_R L_m}{(L_R L_S - L_m^2) L_R}; a_{13} = \frac{L_m Z_p \omega}{L_R L_S - L_m^2};$$

$$a_{14} = R_R \frac{L_m}{L_R}; a_{15} = \frac{R_R}{L_R}; a_{16} = Z_p \omega; b_1 = \frac{1}{\sigma L_S},$$

где L_S, L_R, L_m – индуктивности статора, ротора и контура намагничивания АД; R_S, R_R – активные сопротивления статора и ротора АД; Z_p – число пар полюсов АД.

Второй вариант математической модели АД отличается составом переменных состояния:

$$X = [i_{S\alpha} \ i_{S\beta} \ i_{R\alpha} \ i_{R\beta} \ \omega]^T,$$

где $i_{R\alpha}, i_{R\beta}$ – компоненты пространственного вектора тока ротора АД.

В результате меняются матрицы A и B :

$$A = \begin{pmatrix} -a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 \\ -a_{22} & -a_{21} & -a_{24} & a_{23} & 0 \\ a_{25} & -a_{26} & -a_{27} & -a_{28} & 0 \\ a_{26} & a_{25} & a_{28} & -a_{27} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} b_{21} & 0 \\ 0 & b_{21} \\ -b_{22} & 0 \\ 0 & -b_{22} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты матриц A, B можно определить согласно выражениям [6]:

$$\begin{aligned} a_{21} &= \frac{R_S}{L_S} + \frac{L_m^2 R_S}{L_S(L_S L_R - L_m^2)}; & a_{22} &= \frac{L_m^2 R_S Z_p \omega}{L_S L_R - L_m^2}; & a_{23} &= \frac{L_m R_R}{L_S L_R - L_m^2}; & a_{24} &= \frac{L_m L_R Z_p \omega}{L_S L_R - L_m^2}; \\ a_{25} &= \frac{L_m R_S}{L_S L_R - L_m^2}; & a_{26} &= \frac{L_S L_m Z_p \omega}{L_S L_R - L_m^2}; & a_{27} &= \frac{L_S R_R}{L_S L_R - L_m^2}; & a_{28} &= \frac{L_S L_R Z_p \omega}{L_S L_R - L_m^2}; \\ b_{21} &= \frac{1}{L_S} + \frac{L_m^2}{L_S(L_S L_R - L_m^2)}; & b_{22} &= \frac{L_m}{L_S L_R - L_m^2}. \end{aligned}$$

Уравнения наблюдателя состояния системы, выполняемого, как правило, на базе микропроцессорных устройств, включают в себя вектор измерений Y_k на k -ом шаге расчета (вектор из компонентов тока статора $i_{S\alpha}$ и $i_{S\beta}$) и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_k &= A \cdot X_{k-1} + B \cdot U_{k-1}; \\ X_k &= \tilde{X}_k + K_k \cdot (Y_k - C \cdot \tilde{X}_k), \end{aligned}$$

где \tilde{X}_k – вектор оценки состояний системы; K_k – матричный коэффициент, определяемый фильтром Калмана на основе выполненных измерений.

Оптимальное значение коэффициентов матрицы усиления Калмана K_k зависит от характера шумов и случайных возмущений и обновляется на каждом шаге с помощью специального алгоритма, который реализован в соответствии с идеей адаптивной фильтрации:

$$K_k = \tilde{P}_k \cdot C^T \cdot (C \cdot \tilde{P}_k \cdot C^T + R)^{-1},$$

где R – матрица ожидаемой дисперсии ошибки измерений, определяемой средней погрешностью измерений тока статора σ_i (при нулевом среднем дисперсия ошибки равна матожиданию погрешности во второй степени):

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_i^2 & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 \end{pmatrix};$$

\tilde{P}_k – предсказанная на k -ом шаге оценки \tilde{X}_k матрица ковариации ошибки:

$$\tilde{P}_k = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q.$$

В последнем выражении используется матрица ковариации случайных воздействий Q , значения которой определяются дисперсией соответствующих случайных переменных состояния системы, и скорректированная на $(k-1)$ -ом шаге матрица ошибки ковариации:

$$P_{k-1} = \tilde{P}_{k-1} - K_{k-1} \cdot C \cdot \tilde{P}_{k-1}.$$

На каждом шаге рекуррентной процедуры обновляется матричный коэффициент K_k таким образом, чтобы влияние шумов процесса и измерений на качество оценки вектора X_k минимизировалось [5–7].

На рис. 1 показана схема имитационного моделирования АД (блок AD) с наблюдателем (блок $IDENT$) в программной среде $MATLAB Simulink$. В качестве исследуемого АД был принят двигатель типа АИР 90L4 с номинальной мощностью $P_n = 2,2$ кВт и синхронной частотой вращения $n_0 = 1500$ об/мин.

Блоки AD и $IDENT$ созданы с помощью S -функций, содержащих уравнения АД, и наблюдателя в виде программного кода встроенного языка программирования $MATLAB$. В качестве математического описания АД принята классическая модель в переменных i_s, ψ_R [8]. На вход блока AD подаются компоненты вектора напряжения статора $u_{S\alpha}$ и $u_{S\beta}$, созданные блоком $Source$ [9], а также момент нагрузки M_c . Входными сигналами для наблюдателя являются статорные напряжения $u_{S\alpha}, u_{S\beta}$ и токи $i_{S\alpha}, i_{S\beta}$ эталонной модели АД.

На рис. 2 представлены графики переходных процессов угловой скорости ω_n с помощью рассмотренных вариантов фильтра Калмана при пуске вхолостую и последующем набросе номинальной нагрузки. В начале пуска видно отклонение графиков переходных процессов идентифицированной скорости от «эталонной», однако при приближении к установившемуся режиму и при набросе нагрузки фильтр Калмана достаточно точно позволяет оценить скорость АД.

Таким образом, оба варианта фильтра Калмана позволяют получить одинаковый результат идентификации скорости АД. Отклонение в динамических режимах можно объяснить отклонением стартовых значений матрицы ковариации, а также допущений, принятых при построении модели наблюдателя.

Рассмотрим работу наблюдателей при вариации параметров АД. На рис. 3 и 4 представлены графики переходных процессов оценки скорости вращения АД с помощью фильтра Калмана в переменных i_s, i_R при изменении на 10% значений активных сопротивлений обмоток двигателя.

Нетрудно видеть, что при увеличении активного сопротивления статора (рис. 3б) и уменьшении сопротивления ротора (рис. 4а) фильтр Калмана в переменных i_s, i_R не справляется с задачей идентификации скорости АД.

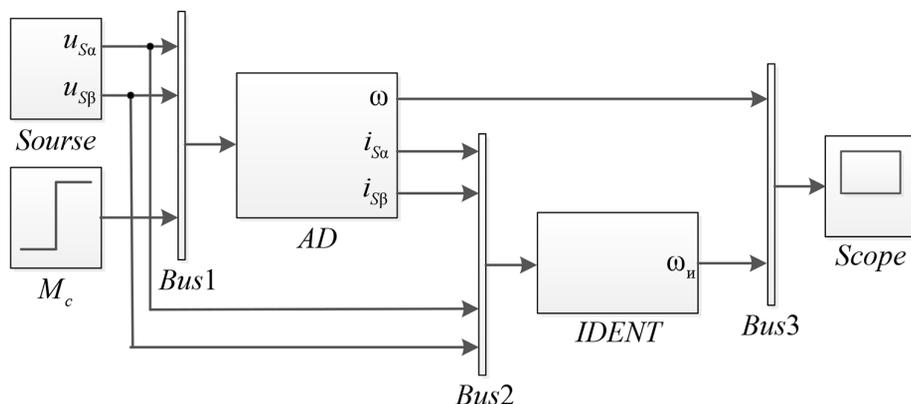


Рис. 1. Схема имитационной модели в среде $MATLAB Simulink$

Fig. 1. The scheme of the simulation model in the $MATLAB Simulink$ environment

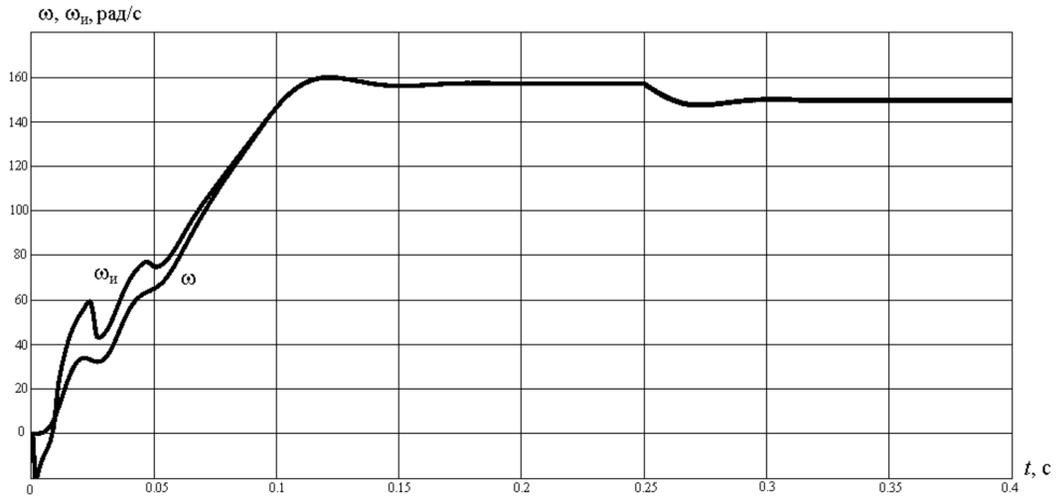


Рис. 2. Переходные процессы угловой скорости АД и её оценки фильтром Калмана

Fig. 2. Transients of the angular velocity of AD and its estimates by the Kalman filter

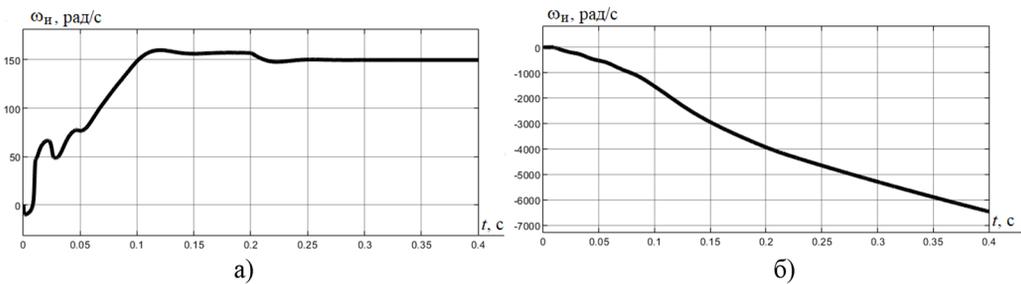


Рис. 3. Переходные процессы в электроприводе с фильтром Калмана в переменных i_S, i_R при снижении (а) и увеличении (б) активного сопротивления статора

Fig. 3. Transients in an electric drive with a Kalman filter in variables i_S, i_R , with a decrease (a) and an increase (б) in the active resistance of the stator

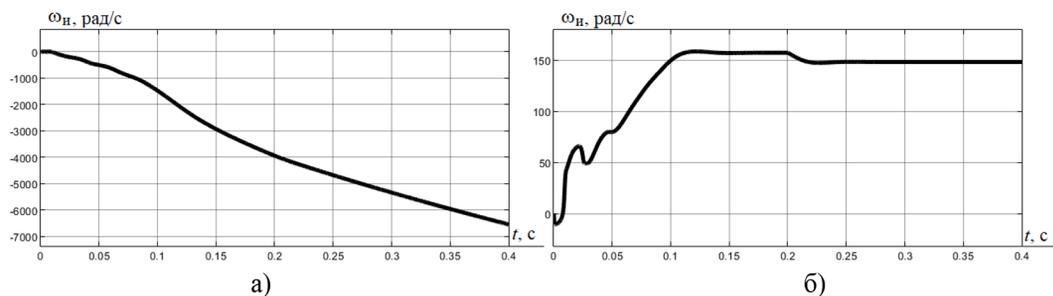


Рис. 4. Переходные процессы в электроприводе с фильтром Калмана в переменных i_S, i_R при снижении (а) и увеличении (б) активного сопротивления ротора

Fig. 4. Transients in an electric drive with a Kalman filter in variables i_S, i_R , with a decrease (a) and an increase (б) in the active resistance of the rotor

На рис. 5, 6 представлены переходные процессы идентифицированной угловой скорости вращения вала АД фильтром Калмана в переменных i_S, ψ_R при изменении на 10 % значений активных сопротивлений обмоток двигателя. Оценка фильтром переходных процессов угловой скорости выполняется во всех случаях.

На рис. 7 приведены переходные процессы оценки угловой скорости вращения вала двигателя рассмотренными вариантами фильтров Калмана при увеличении эквивалентного момента инерции в 5 раз. Причиной изменения указанного параметра может послужить подключение механизма к электроприводу, работавшему на холостом ходу. Фильтр Калмана в переменных i_S, i_R (рис. 7а) также не справляется с задачей идентификации скорости АД. Фильтр Калмана в переменных i_S, ψ_R выполняет поставленную задачу.

Проведенные исследования показали, что в качестве идентификатора состояния АД, имеющего самую низкую чувствительность к вариации его параметров, является фильтр Калмана в переменных i_S, ψ_R , что позволяет рекомендовать его для использования в качестве наблюдателя состояния АД в бездатчиковых системах асинхронного электропривода с векторным управлением.

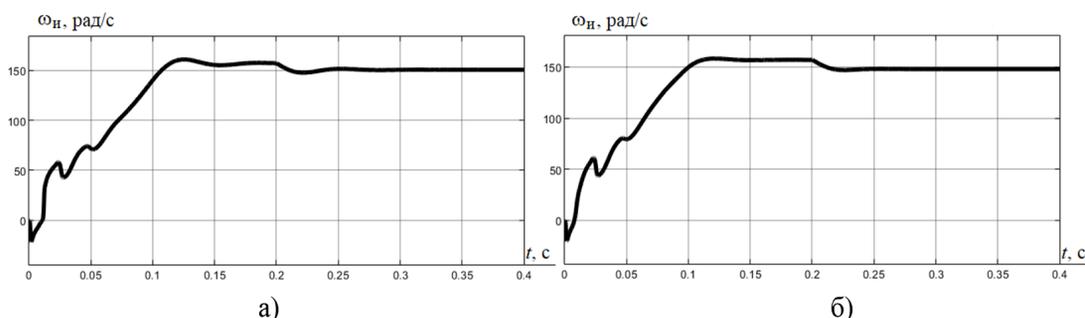


Рис. 5. Переходные процессы в электроприводе с фильтром Калмана в переменных i_S, ψ_R при снижении (а) и увеличении (б) активного сопротивления статора

Fig. 5. Transients in an electric drive with a Kalman filter in variables i_S, ψ_R , with a decrease (a) and an increase (б) in the active resistance of the stator

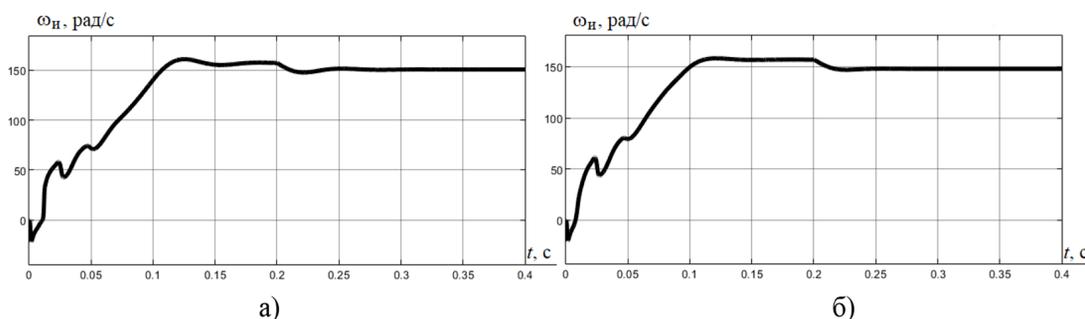


Рис. 6. Переходные процессы в электроприводе с фильтром Калмана в переменных i_S, ψ_R при снижении (а) и увеличении (б) активного сопротивления ротора

Fig. 6. Transients in an electric drive with a Kalman filter in variables i_S, ψ_R , with a decrease (a) and an increase (б) in the active resistance of the rotor

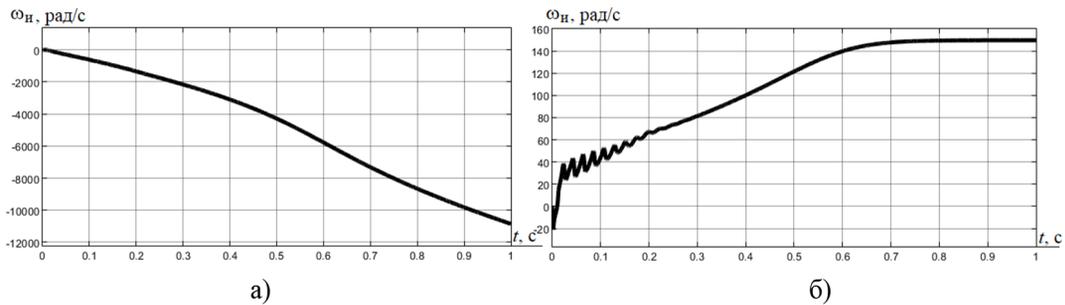


Рис. 7. Переходные процессы при увеличении момента инерции в бездатчиковом электроприводе с фильтром Калмана в переменных i_S, i_R (а) и i_S, ψ_R (б)

Fig. 7. Transients with an increase in the moment of inertia in a sensorless electric drive with a Kalman filter in variables i_S, i_R (a) and i_S, ψ_R (б)

Список литературы / References

[1] Виноградов А. Б. *Векторное управление электроприводами переменного тока*. Иваново.: ГОУВПО ИГЭУ, 2008. 298 с. [Vinogradov A. B. *Vector control of AC electric drives*. Ivanovo.: GOUVPO IGEU, 2008. 298 p. (in Russian)]

[2] Панкратов В. В., Маслов М. О. Синтез и исследование одной структуры бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением. *Электротехника*, 2007, № 9, 9–14 [Pankratov V. V., Maslov M. O. Synthesis and investigation of one structure of a sensorless asynchronous electric drive with vector control. *Electrical Engineering*, 2007, No. 9, 9–14 (in Russian)]

[3] Ланграф С. В., Глазырин А. С., Глазырина Т. А., Афанасьев К. С., Тимошкин В. В., Козлов Л. Е. Исследования параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана. *Известия Томского политехнического университета*, 2010, Т. 317, № 4, 120–123 [Langraf S. V., Glazyrin A. S., Glazyrina T. A., Afanasyev K. S., Timoshkin V. V., Kozlov L. E. Studies of parametric robustness of a sensorless vector asynchronous electric drive with Kalman identifiers. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol.317, No. 4, 120–123 (in Russian)]

[4] Копылов И. П. *Математическое моделирование электрических машин*. М.: Высш. школа, 2001. 327 с. [Kopylov I. P. *Mathematical modeling of electric machines*. Moscow: Higher School, 2001. 327 p. (in Russian)]

[5] Калачев Ю. Н. *Наблюдатели состояния в векторном электроприводе*. М.: ЭФО, 2015. 80 с. [Kalachev Yu. N. *State observers in a vector electric drive*. Moscow: EFO, 2015. 80 p. (in Russian)]

[6] Ланграф С. В., Глазырин А. С. Применение фильтра Калмана в моментном асинхронном электроприводе с векторным бездатчиковым управлением. *Известия вузов. Электромеханика*, 2009, № 6, 61–64 [Langraf S. V., Glazyrin A. S. Application of the Kalman filter in a torque asynchronous electric drive with vector sensorless control. *News of universities. Electromechanics*, 2009, No. 6, 61–64 (in Russian)]

[7] Глазырин А. С., Ланграф С. В. Идентификация скорости и момента асинхронного асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана. *Электричество*, 2009, № 12, 61–63 [Glazyrin A. S., Langraf S. V. Identification of the speed and torque of an asynchronous asynchronous motor using a Kalman filter. *Electricity*, 2009, No.12, 61–63 (in Russian)]

[8] Пахомов А. Н., Коротков М. Ф., Федоренко А. А. Сравнительная оценка качества управления асинхронным электроприводом конденсатного насоса с подчиненным и модальными регуляторами. *Вестник СибГАУ*, 2016, Том 17, № 2, 423–430 [Pakhomov A. N., Korotkov M. F., Fedorenko A. A. Comparative assessment of the quality of control of an asynchronous electric drive of a condensate pump with subordinate and modal regulators. *Bulletin of SibGAU*, 2016, Volume 17, No. 2, 423–430 (in Russian)]

[9] Брылев В. Е., Пахомов А. Н. Сравнительный анализ наблюдателей состояния асинхронного электропривода. *Перспектив Свободный – 2022: материалы XVIII Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*, Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2022, 2980–2983 [Brylev V. I., Pakhomov A. N. Comparative analysis of the observed values of an asynchronous electric drive. *Svobodny Prospekt – 2022: materials of the XVIII International conference of students, postgraduates and young scientists*, Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2022, 2980–2983 (in Russian)]