

10. **Revin A. A.** *Povyshenie effektivnosti, ustoychivosti i upravlyaemosti pri tormozhenii avtotransportnykh sredstv* (Efficiency, stability and control during braking of motor vehicles), Doctors thesis, Volgograd, 1983, 601 p. (in Russian).

11. **Revin A. A.** *Kompleksnaya tekhnologiya modelirovaniya tormoznoy dinamiki avtomobilya* (Integrated modeling technology of the braking dynamic of the car), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2000, 92 p. (in Russian).

12. **Revin A. A.** *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv mnogoosnykh avtomobiley i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya: Uchebnoe posobie* (The theory of operational properties of multiaxial cars and trucks with anti-lock braking system in braking mode), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 1997, 95 p. (in Russian).

13. **Revin A. A.** *Teoriya ekspluatatsionnykh svoystv avtomobiley i avtopoezdov s ABS v rezhime tormozheniya* (The theory of operational properties of cars and trucks with anti-lock braking system in braking mode), Volgograd, Izdatel'stvo VolgGTU, 2002, 372 p. (in Russian).

14. **Samarskiy A. A., Mikhaylov A. P.** *Matematicheskoe modelirovaniye: Idei. Metody. Primery* (Mathematical modeling: ideas, methods, examples), Moscow, Nauka, 1997, 316 p. (in Russian).

15. **Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N.** *Matematicheskoe modelirovaniye i vychislitel'nyy eksperiment*, available at: <http://www.imamod.ru>.

16. **Uchaev R. S., Borzykh S. V., Shchiblev Yu. N.** *Materialy Yubileynoi XV Mezhdunarodnoi Internet—konferencii po sovremennym problemam mashinovedeniya*. Korolev, RKK Energiya im. S. P. Koroleva, Moscow, Izdatel'stvo IMASH RAN, 2003. (in Russian).

17. **Fedin A. P.** *Obespecheniye adekvatnosti modelirovaniya rabochikh protsessov elementov avtomobilya pri ispytaniyakh na virtual'no-fizicheskikh standakh-trenazherakh* (The adequacy of the modeling workflow elements of the car at testing on a virtual-physical stands simulators), Doctors thesis, Volgograd, 2006, 239 p.

18. **Khodes I. V.** *Metodologiya prognozirovaniya upravlyaemosti kolesnoy mashiny* (Methodology of forecasting controllability of the wheeled vehicles), Doctors thesis, Volgograd, 2007, 377 p.

Corresponding author:

Balakina Ekaterina V., D. Sc. (Engineering), Professor of Chair "Operation and Maintenance of Automobiles", Volgograd State Technical University, Lenin avenue, 28, 400005, Volgograd, Russian Federation, phone office (8442) 248461, e-mail: balakina@vstu.ru

УДК 681.513.5

О. В. Горячев, д-р техн. наук, проф., зав. каф., info@sau.tsu.tula.ru,

А. Г. Ефромеев, ассистент, age@sau.tsu.tula.ru,

Тульский государственный университет

Алгоритм управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта с вращающимся основанием

Представлена методика синтеза алгоритма управления приводом стабилизации и изменения углового положения объекта, особенностью которого является тот факт, что ротор связан с вращающимся с переменной частотой под действием внешних сил основанием, а угол поворота статора должен быть стабилизирован в заданном положении, при этом максимальная угловая скорость поворота статора строго ограничена.

Ключевые слова: алгоритм управления, бесконтактный двигатель постоянного тока, моментный двигатель, система стабилизации, электропривод

Введение

Исполнительные электрические приводы некоторых систем стабилизации и управления специального назначения, работающие на подвижном основании, устроены таким образом, что ротор исполнительного двигателя вращается за счет действия момента внешних сил, а положением статора необходимо управлять относительно неподвижной системы отсчета. При этом на характер переходного процесса накладывают жесткие требования: отсутствие перерегулирования и ограничение на максимальную скорость отработки входных сигналов. Кроме того, предъявляются требования к точности: как правило, ошибка по углу при переменной частоте вращения основания не должна превышать единиц мрад. Вопросам создания систем управления для электрических приводов стабилизации и наведения посвящено большое число научных работ, например [1–4]. Но известные методики проектирования систем управления электроприводов стабилизации и управления не позволяют эффек-

тивно и в полной мере решить задачу разработки алгоритма управления рассматриваемым приводом, у которого скорость вращения ротора исполнительного двигателя под действием внешних сил значительно превышает (практически на два порядка) максимально допустимую скорость поворота объекта управления, связанного со статором исполнительного двигателя. С учетом изменяющейся во времени скорости вращения ротора авторами разработан специальный алгоритм управления приводом на базе квазиоптимального по быстродействию алгоритма с установленным ограничением скорости изменения углового положения объекта.

Построение математической модели исполнительного двигателя

Для синтеза алгоритма управления необходимо сначала получить математическую модель исполнительного двигателя. Воспользуемся исходной моделью бесконтактного двухфазного моментного двигателя в неподвижной системе координат, опи-

санной, например, в трудах И. Е. Овчинникова [5] и С. Г. Герман-Галкина [6]. Учитывая, что ротор двигателя вращается с частотой ω_p , на основе исходной получим модель вида

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{L}(u_A - Ri_A + c_e \varpi \sin(Z_p \varpi t)); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L}(u_B - Ri_B - c_e \varpi \cos(Z_p \varpi t)); \\ M = c_M(\cos(Z_p \varpi t)i_B - \sin(Z_p \varpi t)i_A); \\ J_{пр} \frac{d\omega}{dt} = M - M_{тр}; \\ \varpi = -\omega_p + \omega, \end{cases} \quad (1)$$

где u_A, u_B — напряжения на обмотках двигателя; i_A, i_B — силы тока в обмотках двигателя; L, R — индуктивность и сопротивление обмотки двигателя; c_e — коэффициент противоЭДС; ϖ — частота вращения статора относительно ротора двигателя; M — формируемый двигателем момент; c_M — коэффициент момента; Z_p — число пар полюсов; $J_{пр}$ — приведенный момент инерции вала двигателя; ω — частота вращения объекта управления (и статора двигателя) в неподвижной системе координат; $M_{тр}$ — момент трения; ω_p — частота вращения ротора в неподвижной системе координат.

Перейдем к модели эквивалентного двигателя постоянного тока вида

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{R}{L} \left(-i + \frac{1}{R} U - \frac{1}{R} c_e \varpi \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{пр}} (c_M i - M_{тр}); \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \varpi = -\omega_p + \omega, \end{cases} \quad (2)$$

где R, L, i, U — эквивалентные сопротивление обмотки, индуктивность обмотки, сила тока и напряжение соответственно.

Структурная схема эквивалентной модели двигателя постоянного тока представлена на рис. 1.

Поскольку электромагнитная постоянная времени в данном случае много меньше электромеханической, то производной по току в системе (2) при синтезе алгоритма управления можно пренебречь. Таким образом, от системы уравнений (2) перейдем к системе вида

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt} = \omega; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_{пр}} \left(\frac{c_M}{R} U - \frac{c_e c_M}{R} \varpi - M_{тр} \right); \\ \varpi = -\omega_p + \omega. \end{cases} \quad (3)$$

Синтез системы управления

Для удобства синтеза алгоритма управления введем переменные состояния $x_1 = \varphi$ и $x_2 = \omega$ и преобразуем систему (3) к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{c_e c_M}{J_{пр} R} x_2 + \left(\frac{c_M}{J_{пр} R} U + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Для нахождения фазовой траектории разделим второе уравнение системы (4) на первое:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta}{x_2}. \quad (5)$$

Тогда

$$dx_1 = \frac{x_2}{-\lambda_1 x_2 + \Delta} dx_2,$$

$$\text{где } \lambda_1 = \frac{c_e c_M}{J_{пр} R}; \Delta = \frac{c_M}{J_{пр} R} U + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}}.$$

Проинтегрировав выражение (5), получим следующее уравнение фазовых траекторий:

$$x_1 - x_{10} = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ (x_{20} - x_2) - \frac{\Delta}{\lambda_1} \ln \left| \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta}{-\lambda_1 x_{20} + \Delta} \right| \right\},$$

где x_{10}, x_{20} — начальные значения переменных x_1, x_2 .

Общий вид линии переключения показан на рис. 2. В отличие от классической симметричной линии переключения для объекта второго порядка (показана пунктиром на рис. 2) она состоит из трех непрерывных участков, каждый из которых рассмотрим в отдельности.

Участок 1: $x_2 < 0$, скорость вращения статора направлена навстречу скорости вращения, следовательно, $M_{тр}$ — тормозящий момент; противоЭДС двигателя увеличивается на величину $c_e \omega_p$:

$$\Delta_1 = \frac{c_M}{J_{пр} R} u_{\max} + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}}.$$

Уравнение для линии переключения на первом участке:

$$-x_{10} = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_{20} + \frac{\Delta_1}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_{20} + \Delta_1}{\Delta_1} \right\}.$$

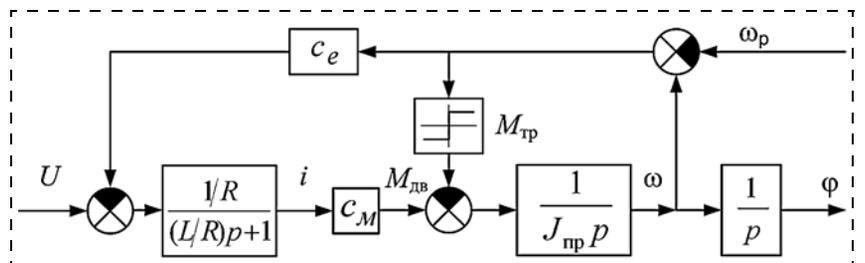


Рис. 1. Структура эквивалентной математической модели двигателя

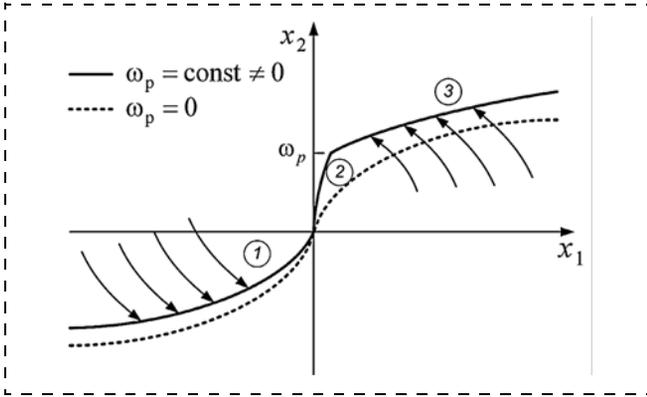


Рис. 2. Общий вид линии переключения

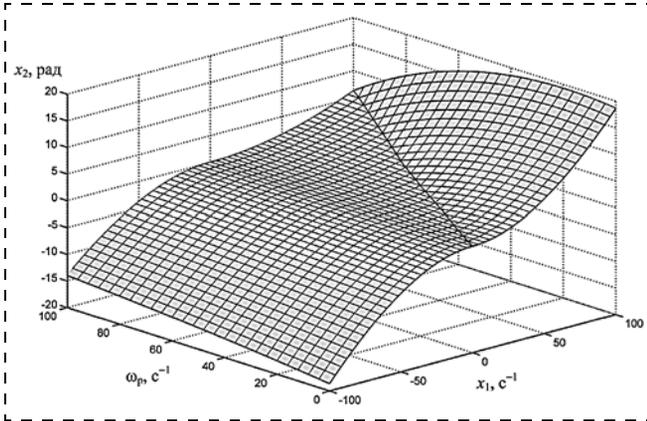


Рис. 3. Поверхность переключения:

x_1 — частота вращения объекта управления, ω_p — частота вращения ротора исполнительного двигателя, x_2 — ошибка отработки угла поворота объекта управления

Переходя к координатам (x_1, x_2) , получаем

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_2 + \frac{\Delta_1}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta_1}{\Delta_1} \right\}. \quad (6)$$

Участок 2: $\omega_p > x_2 > 0$, $M_{тр}$ — движущий момент. ПротивЭДС от вращения статора стремится разогнать двигатель:

$$\Delta_2 = \frac{c_M}{J_{пр} R} (-u_{max}) + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p + \frac{M_{тр}}{J_{пр}};$$

$$x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_2 + \frac{\Delta_2}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta_2}{\Delta_2} \right\}. \quad (7)$$

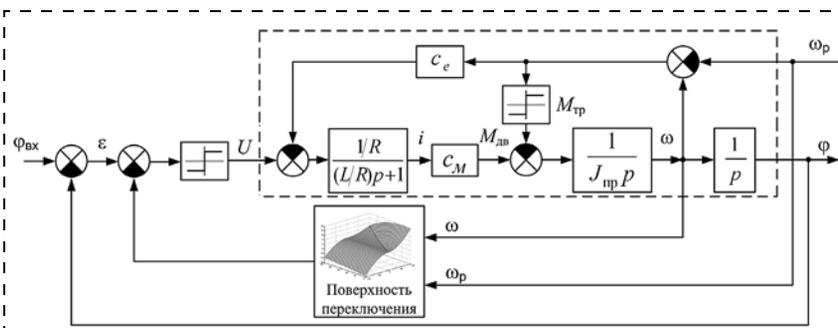


Рис. 4. Структурная схема системы управления

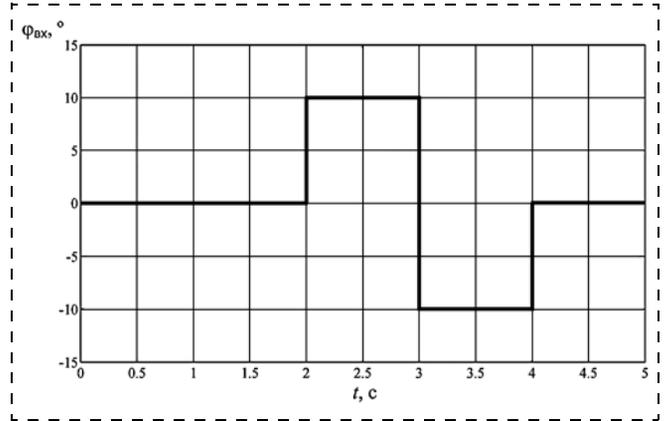


Рис. 5. Заданный угол поворота объекта управления, связанного со статором исполнительного двигателя

Участок 3: $x_2 > \omega_p$, $M_{тр}$ — тормозящий момент,

$$\Delta_3 = \frac{c_M}{J_{пр} R} (-u_{max}) + \frac{c_e c_M}{J_{пр} R} \omega_p - \frac{M_{тр}}{J_{пр}}.$$

Для расчета линии переключения на третьем участке необходимо предварительно найти точку излома:

$$\begin{cases} x_2 = \omega_p = x_{2K}; \\ x_1 = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ \omega_p + \frac{\Delta_2}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 \omega_p + \Delta_2}{\Delta_2} \right\} = x_{1K}. \end{cases}$$

Уравнения линии переключения на третьем участке:

$$x_{1K} - x_{10} = \frac{1}{\lambda_1} \left\{ x_{2K} - x_{20} + \frac{\Delta_3}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_{20} + \Delta_3}{-\lambda_1 x_{2K} + \Delta_3} \right\};$$

$$x_1 = -x_{1K} + \frac{1}{\lambda_1} \left\{ (x_{2K} - x_2) + \frac{\Delta_3}{\lambda_1} \ln \frac{-\lambda_1 x_2 + \Delta_3}{-\lambda_1 x_{2K} + \Delta_3} \right\}. \quad (8)$$

Таким образом, система уравнений (6), (7) и (8) образует уравнение искомой линии переключения.

Поскольку в реальной системе скорость вращения ротора может изменяться, целесообразно использовать семейство линий переключения, построенных для различных частот вращения ротора, которые вместе образуют поверхность переключения (рис. 3).

Структурная схема разработанной системы управления показана на рис. 4.

Выполним численное моделирование работы системы, реализующей синтезированный алгоритм управления. На вход системы подан сигнал, изображенный на рис. 5, при этом частота вращения ротора изменяется в соответствии с зависимостью, изображенной на рис. 6. Результаты численного моделирования представлены на рис. 7 и 8.

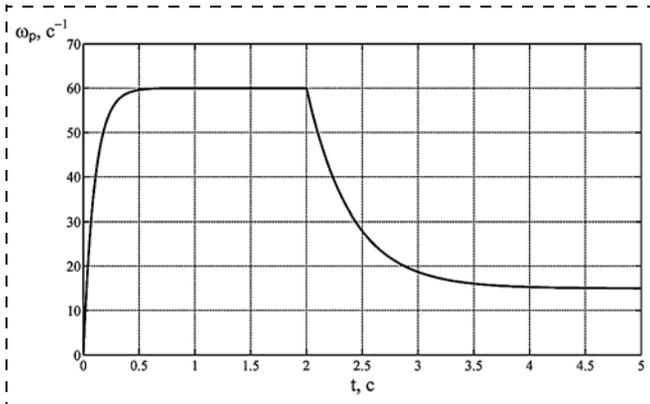


Рис. 6. Частота вращения основания, связанного с ротором исполнительного двигателя

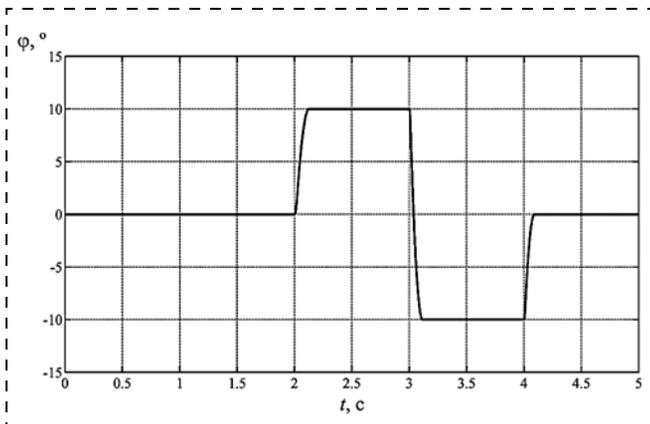


Рис. 7. Угол поворота объекта при управлении без ограничения угловой скорости отработки

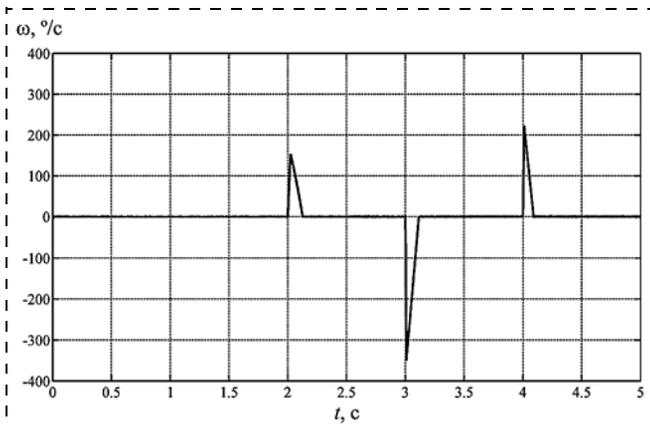


Рис. 8. Угловая скорость объекта управления

Модификация алгоритма с учетом ограничения максимальной скорости регулирования

Для ограничения угловой скорости отработки входного сигнала достаточно ограничить линию переключения по оси x_2 (ω) максимально допустимым значением угловой скорости ω_{\max} , как показано на рис. 9.

Результаты численного моделирования работы системы с теми же входными сигналами, но с ог-

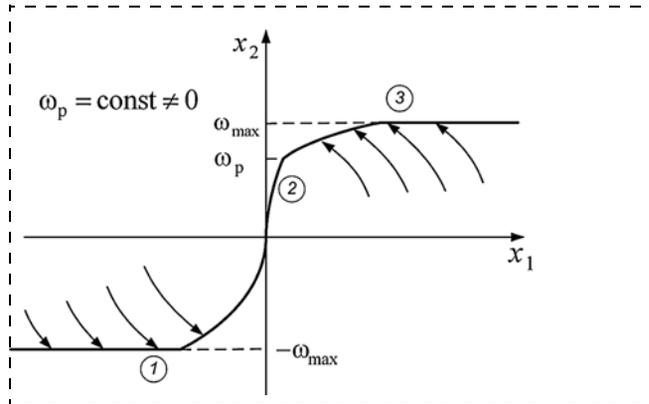


Рис. 9. Общий вид линии переключения с учетом ограничения на максимальную угловую скорость

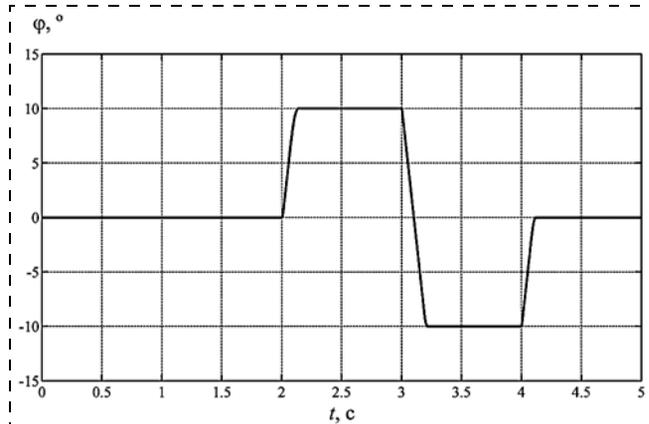


Рис. 10. Угол поворота объекта при управлении с ограничением угловой скорости отработки в $100^\circ/\text{с}$

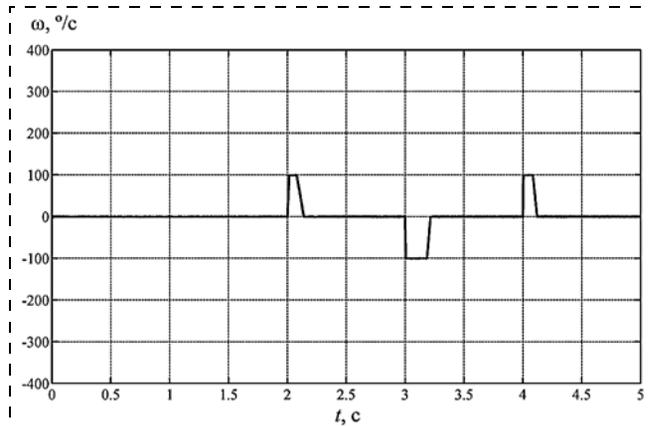


Рис. 11. Угловая скорость объекта управления с учетом заданного ограничения $100^\circ/\text{с}$

раничением угловой скорости отработки, представлены на рис. 10 и 11. При этом максимальная угловая скорость была задана равной $100^\circ/\text{с}$.

Как видно из графиков на рис. 10 и 11, синтезированная система обеспечивает стабилизацию угла крена в условиях вращения ротора исполнительного двигателя с переменной частотой до 60 Гц и при этом не допускает превышения заданной допустимой угловой скорости поворота объекта управления.

Таким образом, разработан удовлетворяющий заданным требованиям к характеру переходного процесса алгоритм управления приводом стабилизации и изменения угла поворота статора бесконтактного двигателя постоянного тока с независимо вращающимся с переменной частотой ротором. Результаты численного моделирования показали, что представленный в статье алгоритм управления обеспечивает стабилизацию угла поворота объекта с точностью 1 мрад при вращении основания с переменной частотой от 0 до 60 Гц.

Рассмотренная методика синтеза алгоритма управления использована при разработке привода стабилизации для модуля коррекции малогабаритного вращающегося по крену летательного аппарата. Экспериментальные испытания показали работоспособность предложенного алгоритма управления.

1. **Горячев О. В.** Цифровые электрические следящие приводы постоянного тока систем наведения и стабилизации (математические модели и алгоритмы управления). Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 190 с.
2. **Следящие** приводы. В 3 т. Т. 2. Электрические следящие приводы / Ред. Б. К. Чемоданов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 880 с.
3. **Терехов В. М.** Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр "Академия", 2005. 304 с.
4. **Электропривод** летательных аппаратов: учебник для вузов / В. А. Полковников, Б. И. Петров, Б. Н. Попов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
5. **Овчинников И. Е.** Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): Курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2006.
6. **Герман-Галкин С. Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.
7. **Andre Veltman, Duco W. J. Pulle and R. W. de Doncker.** Fundamentals of Electrical Drives. Springer, 2007. 345 p.
8. **Krishnan R.** Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Prentice Hall, 2001. 652 p.
9. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти тт. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.

Algorithm for Control of the Stabilization Drive of an Object with a Rotating Basis

O. V. Goryachev, info@sau.tsu.tula.ru, A. G. Efromeev, age@sau.tsu.tula.ru,
Tula State University, 300012, Tula, Russia

Date received: 24.09.14

The article describes the technique of synthesis of the algorithm for control of the stabilization drive. The actuating element of the control system is a brushless direct current motor. So, the rotor of the executive motor rotates due to an external torque, and the position of the stator should be controlled. The objectives imposed on the transient process: no position overshoot and the maximum allowed range of the controlled object rotation velocity. A feature of the considered drive is the fact that the rotor of the executive motor rotates with a variable frequency and the rotation angle of the stator should be stabilized in its value. The velocity of the rotation of the drive rotor under an external torque significantly exceeds (almost two orders of the magnitude) the maximum allowed rotation velocity of the controlled object associated with the motor stator. The above requirements to the time-varying rotation velocity are satisfied by the developed control algorithm. The article describes the system of mathematical models of the executive motor, which takes into account its features, the algorithm of the synthesis of quasi-optimal control law and its modification with the maximum speed limit. The article presents the results of the computer simulation of the systems with such control algorithm, which prove the efficiency of the proposed system. The technique is used in the development of the stabilization drive of correction module for the small-size roll rotating aircraft. Experimental tests have shown the efficiency of the developed control algorithm.

Keywords: brushless direct current motor; electric drive; control algorithm; stabilization drive

For citation:

Goryachev O. V., Efromeev A. G. Algorithm for Control of the Stabilization Drive of an Object with a Rotating Basis, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 182–186.

DOI: 10.17587/mau.16.182-186

References

1. **Goryachev O. V.** *Tsifrovye elektricheskie sledyashchie privody postoyannogo toka sistem navedeniya i stabilizatsii (matematicheskie modeli i algoritmy upravleniya)* (Digital electric DC servo drives for guidance and stabilization systems (mathematical models and control algorithms)), Tula, Izdatel'stvo TulGU, 2009, 190 p. (in Russian).
2. **Chemodanov B. K.** *Sledyashchie privody. Vol. 2. Elektricheskie sledyashchie privody* (Electric servo drives), Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2003, 880 p. (in Russian).
3. **Terekhov V. M.** *Sistemy upravleniya elektroprivodov* (Control systems of electric drives), Moscow, Akademiya, 2005, 304 p. (in Russian).
4. **Polkovnikov V. A., Petrov B. I., Popov B. N.** *Elektroprivod letatel'nykh apparatov: uchebnyk dlya vuzov* (Aircraft electric drives: textbook for high schools), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 352 p. (in Russian).

5. **Ovchinnikov I. E.** *Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove (malaya i srednyaya moshchnost')* (Brushless electric motors and drive (small and medium power)), Sankt-Peterburg, KORONA-Vek, 2006 (in Russian).
6. **German-Galkin S. G.** *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* (Matlab & Simulink. The design of mechatronic systems on PC), Saint-Peterburg, KORONA-Vek, 2008 (in Russian).
7. **Andre Veltman, Duco W. J. Pulle and R. W. de Doncker.** *Fundamentals of Electrical Drives*, Springer, 2007. 345 p.
8. **Krishnan R.** *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001. 652 p.
9. **Pupkov K. A., Egupov N. D.** *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnyk v 5-ti tt. T. 4: Teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya* (The methods of classical and modern automatic control theory: Tutorial. Vol. 4: Automatic control systems optimization theory), Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2004 (in Russian).

Corresponding author:

Goryachev Oleg V., Head of Department, Doctor of Engineering Science, Professor, Tula State University, Lenin Avenue, 95, 300012, Tula, Russian Federation; phone: +7 (4872) 35-38-35; e-mail: info@sau.tsu.tula.ru