

## Раздел I. Автоматика и управление

УДК 681.513.66

**В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.А. Шевченко**

### АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ ПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА\*

*Рассматривается задача управления приводами постоянного тока, модель которых представлена нелинейными уравнениями в переменных состояния. Исследуются особенности управления, которые возникают, например, при пуске двигателя, когда поток возбуждения отсутствует. В таких задачах в управлении могут возникать особенности, не позволяющие задавать желаемую динамику замкнутой системы в виде линейных уравнений, т.е. система не может быть линеаризована обратной связью. Задача позиционного управления решается на базе структуры адаптивных беспоисковых систем управления с эталонной моделью. Предлагается процедура синтеза базового позиционно-траекторного регулятора с линейной и нелинейной эталонными моделями. Проводится анализ асимптотической устойчивости замкнутой нелинейной эталонной системы управления методом функций Ляпунова. Предложена структура и адаптивные алгоритмы управления приводом. Адаптация полученного базового закона осуществляется на основе ПИ-алгоритма. Проведен анализ устойчивости замкнутой системы. Показано, что в линейном приближении характеристическое уравнение замкнутой системы является произведением характеристического уравнения контура эталонной модели, контура управления приводом и контура адаптации. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного метода на примере задачи стабилизации частоты вращения привода при действии постоянных и переменных возмущений.*

*Позиционно-траекторное управление; адаптивное управление; привод; эталонная модель; функция Ляпунова.*

**V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, V.A. Shevchenko**

### REFERENCE MODEL ADAPTIVE CONTROL FOR DC DRIVE

*The problem of mobile objects control is considered. The model is represented by the equations of kinematics and dynamics of rigid bodies. The features control for maneuvers requiring pitch angles of 90 degrees or more are investigated. In such problems, the determinant of the matrix of kinematics may be equal to zero. This fact does not allow to set the desired dynamics of the closed-loop system in the form of li-linear equations. In other words the system cannot be linearized by feedback. The problem is solved by applying adaptive control systems with a reference model. A procedure for the synthesis of the basic position-trajectory control is proposed. Base control for a reference model is designed on base of the method of Lyapunov functions. Adaptation of the base control is carried out by proportional and integral algorithms. The block-diagram of the closed-loop system is presented. The stability of the adaptive control systemis proved. It is shown that in the linear approximation, the characteristic equation of the closed-loop system is a product of the characteristic equation of the reference models, the mobile object, and the adaptation subsystem. Modeling results are presented.*

*Position-path control; adaptive control; mobile object; reference model; function of Lyapunov.*

\* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № НШ-3437.2014.10, грантом РФФИ 13-08-00315а, грантом РНФ 14-19-01533 и грантом ЮФУ 213.01-07/2014-01 ПЧВГ.

**Введение.** Актуальность решения задач управления приводами обусловлена рядом факторов, среди которых можно выделить требования к энергоэффективности и повышенной точности в условиях действия неизмеряемых возмущений. В частности, в связи с расширением функциональных возможностей робототехнических систем и подвижных объектов, возрастают требования к режимам функционирования их приводов. Так в [1–4] рассматриваются различные аспекты управления тяговыми приводами поездов. Так в [1–3] отмечается, что наиболее эффективные с точки зрения энергозатрат режимы наблюдаются при оптимальной скорости скольжения. В [4] предлагается алгоритм управления тяговым приводом на основе управляемой формы Жордана [5]. При этом требуется адаптация к неопределенным характеристикам скольжения и выполнение дополнительных условий, связанных с управляемостью объекта.

В данной статье для синтеза базового закона управления используется метод позиционно-траекторного управления [6], восходящий своими корнями к работам [7–9], в последнее время успешно применяется в автономных воздухоплавательных комплексах [10–13] и автономных средствах морского базирования [14–16]. Так методом позиционно-траекторного синтезированы базовые алгоритмы прототипа высотной воздухоплавательной платформы, успешно прошедшей испытания в декабре 2013 г. в Чаньша (Китай). В марте 2014 года в Таганрогском заливе успешно испытан прототип безэкипажного катера, осуществляющий автономное движение по заданным маршрутам и способный автоматически обнаруживать и обходить препятствия.

Адаптация базового закона управления осуществляется в рамках бесперебойных адаптивных систем, основы которых заложены в ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН [17–19]. К настоящему времени данный подход доказал свою эффективность и состоятельность и продолжает развиваться [20, 21]. Так как ряд задач управления приводами (высокоточное позиционирование в условиях возмущений) требует выполнения заданного качества управления в динамике, то в настоящей статье используется идеология систем с эталонными моделями [22–24], которые позволяют адаптироваться в переходных процессах.

**1. Синтез адаптивного управления с линеаризацией обратной связью.** Рассмотрим номинальную модель привода вида [25]

$$\begin{aligned} J\dot{\omega}_m &= c_m I_{vm} I_m - m_{sm}, \\ L\dot{I}_m &= u_{1m} - c_m I_{vm} \omega_m - r I_m, \\ L_v \dot{I}_{vm} &= u_{2m} - r_v I_{vm}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega_m$  – частота вращения вала,  $I_m$  – ток якоря,  $I_{vm}$  – ток цепи возбуждения,  $m_{sm}$  – момент сопротивления,  $u_{1m}$ ,  $u_{2m}$  – напряжения якоря и обмотки возбуждения,  $c_m$ ,  $J$ ,  $L$ ,  $r$ ,  $L_v$ ,  $r_v$  – постоянные параметры.

Синтезируем для номинальной модели (1) управление, обеспечивающее стабилизацию частоты и потока. В соответствии с методом позиционно-траекторного управления [6] введем ошибки в виде

$$\Psi_{\varepsilon T1} = \omega_m - \omega^0, \quad \Psi_{\varepsilon T2} = I_{vm} - I_v^0. \quad (2)$$

Первые производные по времени от ошибок (2) с учетом уравнений (1) имеют вид

$$\dot{\Psi}_{\varepsilon T1} = \frac{c_m I_{vm} I_m - m_{sm}}{J}, \quad \dot{\Psi}_{\varepsilon T2} = \frac{u_{2m} - r_v I_{vm}}{L_v}. \quad (3)$$

Вторая производная от ошибки  $\Psi_{\varepsilon T1}$  равна

$$\ddot{\Psi}_{\varepsilon T1} = \frac{c_m \dot{I}_{vm} I_m + c_m I_{vm} \dot{I}_m - \dot{m}_{sm}}{J} = \frac{c_m \frac{u_{2m} - r_v I_{vm}}{L_v} I_m + c_m I_{vm} \frac{u_{1m} - c_m I_{vm} \omega_m - r I_m}{L} - \dot{m}_{sm}}{J}, \quad (4)$$

Потребуем, что бы ошибки (2) удовлетворяли следующим эталонным дифференциальным уравнениям

$$\ddot{\Psi}_{\varepsilon T1} + a_{11} \dot{\Psi}_{\varepsilon T1} + a_{01} \Psi_{\varepsilon T1} = 0, \quad (5)$$

$$\dot{\Psi}_{\varepsilon T2} + a_{02} \Psi_{\varepsilon T2} = 0. \quad (6)$$

где  $a_{11}$ ,  $a_{01}$ ,  $a_{02}$  – постоянные коэффициенты.

Подставив выражения (2)–(4) в уравнения (5), (6), получим систему, из которой находим выражения для эталонных управлений:

$$u_{1m} = c_m I_{vm} \omega_m + r I_m + \frac{L}{c_m I_{vm}} \left[ c_m a_{02} (I_{vm} - I_v^0) I_m + \dot{m}_{sm} - a_{11} (c_m I_{vm} I_m - m_{sm}) - J a_{01} (\omega_m - \omega^0) \right], \quad (7)$$

$$u_{2m} = r_v I_{vm} - L_v a_{02} (I_{vm} - I_v^0). \quad (8)$$

Предполагается, что производная момента сопротивления вычисляется, оценивается или измеряется.

Рассмотрим теперь модель двигателя

$$J \dot{\omega} = c_m I_v I - m_s,$$

$$L \dot{I} = u_1 - c_m I_v \omega - r I, \quad (9)$$

$$L_v \dot{I}_v = u_2 - r_v I_v,$$

Все переменные в модели объекта (9) совпадают по смыслу с переменными номинальной модели. Параметры модели (9) совпадают с параметрами номинальной модели (1).

Сформирует цель управления для привода аналогично (2):

$$\Psi_1 = \omega - \omega^0, \quad \Psi_2 = I_v - I_v^0. \quad (10)$$

Дополним модель привода (9) интеграторами:

$$\dot{z}_1 = \Psi_1 - \Psi_{1\varepsilon T}, \quad \dot{z}_2 = \Psi_2 - \Psi_{2\varepsilon T}, \quad (11)$$

где  $z_1$ ,  $z_2$  – дополнительные переменные адаптивного регулятора.

Введем ошибки управления в виде

$$e_1 = \Psi_1 - \Psi_{1\varepsilon T} + b_1 z_1 = \omega - \omega_m + b_1 z_1, \quad e_2 = \Psi_2 - \Psi_{2\varepsilon T} + b_2 z_2 = I_v - I_{vm} + b_2 z_2, \quad (12)$$

где  $b_1$ ,  $b_2$  – параметры настройки регулятора.

Потребуем, чтобы ошибки (12) удовлетворяли эталонным уравнениям, аналогичным (5), (6):

$$\ddot{e}_1 + a_{11} \dot{e}_1 + a_{01} e_1 = 0, \quad (13)$$

$$\dot{e}_2 + a_{02} e_2 = 0. \quad (14)$$

В общем случае, коэффициенты уравнений (5), (6) и (13), (14) могут отличаться друг от друга. Их равенство означает, что для объекта управления и номинальной модели используется одинаковый критерий качества, связь с которым указанных коэффициентов можно найти, например в [26].

Производные выражений (12) по времени равны

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= \frac{c_m I_v I - m_s}{J} - \frac{c_m I_{vm} I_m - m_{sm}}{J} + b_1 (\omega - \omega_m), \\ \dot{e}_2 &= \frac{u_2 - r_v I_v}{L_v} - \frac{u_{2m} - r_v I_{vm}}{L_v} + b_2 (I_v - I_{vm}).\end{aligned}\quad (15)$$

Вторая производная от ошибки  $e_1$  равна

$$\begin{aligned}\ddot{e}_1 &= \frac{c_m \frac{u_2 - r_v I_v}{2p w_v} I + c_m I_v \frac{u_1 - c_m I_v \omega - rI}{L} - \dot{m}_s}{J} - \\ &- \frac{c_m \frac{u_{2m} - r_v I_{vm}}{L_v} I_m + c_m I_{vm} \frac{u_{1m} - c_m I_{vm} \omega_m - rI_m}{L} - \dot{m}_{sm}}{J} + b_1 \left( \frac{c_m I_v I - m_s}{J} - \frac{c_m I_{vm} I_m - m_{sm}}{J} \right)\end{aligned}\quad (16)$$

Подставив выражения (15), (16) в уравнения (13), (14), найдем управляющие воздействия в виде:

$$\begin{aligned}u_2 &= r_v I_v + L_v \left[ -a_{02} (I_v - I_v^0) - b_2 (I_v - I_{vm}) - a_{02} b_2 z_2 \right] \\ u_1 &= c_m I_v \omega + rI + \frac{L}{c_m I_v} \left\{ \dot{m}_s + c_m \left[ a_{02} (I_{vm} - I_v^0) + b_2 (I_v - I_{vm}) + a_{02} (I_v - I_{vm} + b_2 z_2) \right] I - \right. \\ &- a_{11} (c_m I_{vm} I_m - m_{sm}) - J a_{01} (\omega_m - \omega^0) - J b_1 \left( \frac{c_m I_v I - m_s}{J} - \frac{c_m I_{vm} I_m - m_{sm}}{J} \right) - \\ &\left. - J a_{11} \left( \frac{c_m I_v I - m_s}{J} - \frac{c_m I_{vm} I_m - m_{sm}}{J} + b_1 (\omega - \omega_m) \right) - J a_{01} (\omega - \omega_m + b_1 z_1) \right\}\end{aligned}\quad (17)$$

Выражения (7), (8) и (17), (18) содержат деление на ток возбуждения. В этой связи в системах управления приводами вначале создается поток возбуждения, а после установления тока возбуждения начинается процесс регулирования приводом по каналу тока якоря. Такой подход обусловлен тем фактом, что канал управления током возбуждения является независимым. В связи с вышесказанным проведем анализ устойчивости замкнутой системы управления при постоянных токах  $I_v = I_v^0, I_{vm} = I_{vm}^0$ . Подставив выражения (7), (8), (17), (18) в уравнения (1), (9) и положив внешние воздействия и уставки равными нулю, получим уравнения линейную систему для анализа устойчивости:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{c_m I_v^0}{J} I, \\ \dot{I} &= -\frac{J}{c_m I_v^0} (a_{10} + a_{11} b_1) \omega - (b_1 + a_{11}) I - \frac{J a_{10} b_1}{c_m I_v^0} z_1 + \frac{J a_{11} b_1}{c_m I_v^0} \omega_m + b_{11} I_m \\ \dot{z}_1 &= \omega - \omega_m, \\ \dot{\omega}_m &= \frac{c_m I_v^0}{J} I_m, \\ \dot{I}_m &= -\frac{J a_{01}}{c_m I_v^0} \omega_m - a_{11} I_m,\end{aligned}\quad (19)$$

Характеристический полином системы (19) равен

$$D(s) = (s^2 + a_{11}s + a_{10})(s + b_1)(s^2 + a_{11}s + a_{10}).\quad (20)$$

Таким образом, система управления в линейном приближении является асимптотически устойчивой при условиях

$$a_{11} > 0, a_{10} > 0, b_1 > 0. \tag{21}$$

Отметим, что полином (20) является произведением характеристических полиномов эталонной модели, базового контура управления и контура адаптации. Это позволяет настраивать параметры адаптации  $b_1$  и  $b_2$  независимо от параметров базового регулятора. Структура адаптивной системы управления представлена на рис. 1, из которого видно, что система управления двигателем строится как следующая за выходами эталонной модели система. В линейном приближении адаптацию к возмущениям обеспечивает астатизм первого порядка. Отметим, что в классических адаптивных системах с эталонной моделью [17–19] настраиваются коэффициенты регуляторов  $a_{11}, a_{10}, a_{20}, b_1, b_2$  по известным алгоритмам.

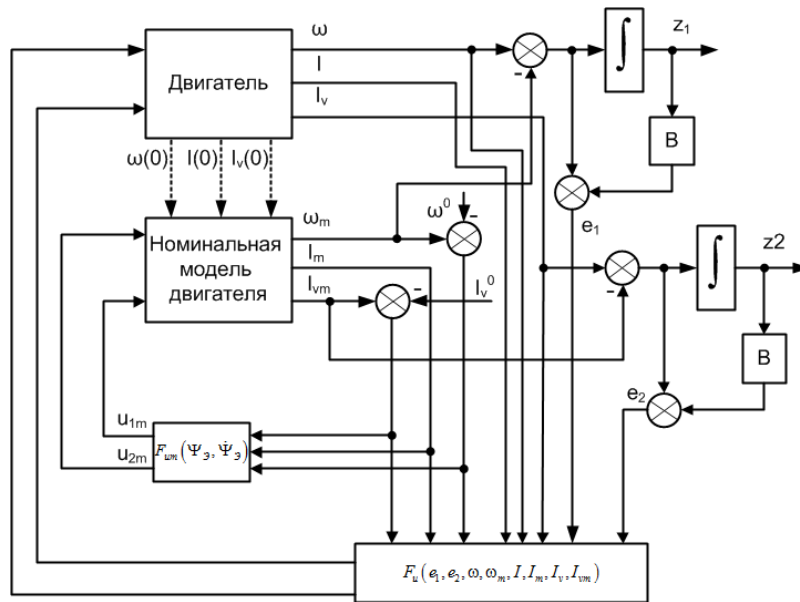


Рис. 1. Структура адаптивной системы управления двигателем

Результаты моделирования системы (1), (2), (7) – (12), (17), (18) представлены на рис. 2–4. Моделирование проведено при следующих параметрах:  $c_m=10; J=0.5; r=1; L=0.05; r_v=3; L_v=0.1; b_1=100; b_2=100; a_{01}=9; a_{02}=3; a_{11}=6; \omega^0=100; I_v^0=0.5$ . Момент возмущения номинальный  $m_s = m_{sm} = 0$ , а реальный момент, действующий на вал двигателя  $\Delta m_s = 5 \sin(3t)$ . На рис. 2 представлены частота вращения вала двигателя и эталонной модели, на рис. 3 – ток якоря и эталонной модели, а на рис. 4 – ток возбуждения двигателя и эталонной модели.

Как видно из рис. 2–4 нелинейная система с интегральным алгоритмом адаптации с высокой точностью следит и за выходами эталонной модели. В линейном приближении можно вычислить значения коэффициентов  $b_1, b_2$ , обеспечивающих заданную точность. Отметим, что в данном подходе в явном виде выделяются контур эталонной модели и контур адаптации. В этой связи можно независимо друг от друга настраивать коэффициенты  $a_{11}, a_{10}, a_{20}$  и  $b_1, b_2$ .

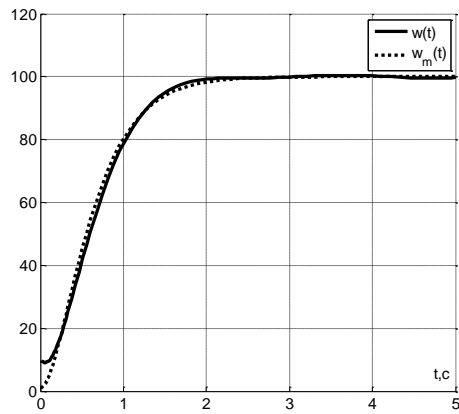


Рис. 2. Частота вращения двигателя и номинальной модели

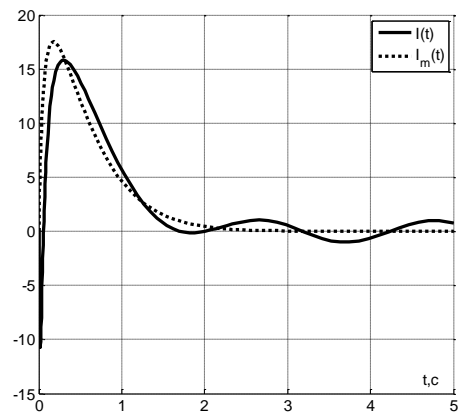


Рис. 3. Ток якоря двигателя и номинальной модели

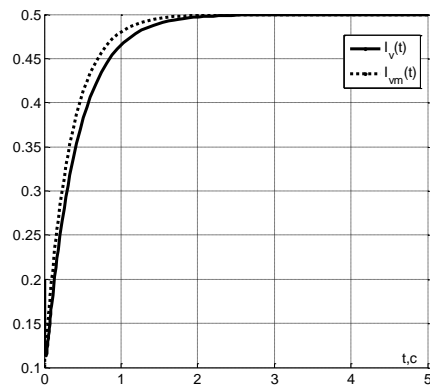


Рис. 4. Ток возбуждения двигателя и номинальной модели

Результаты моделирования также показывают эффективность предлагаемой структуры для парирования параметрических возмущений.

Таким образом, предлагаемая структура, представленная на рис. 1, обеспечивает совместное использование известных алгоритмов настройки коэффициентов регулятора и интегральной адаптации. Например, моделирование системы (1), (2), (7)–(12), (17), (18) с алгоритмами настройки коэффициентов адаптации в виде [27]

$$\dot{b}_1 > -\gamma_1 (\omega - \omega^0) \omega, \quad \dot{b}_2 > -\gamma_2 (I_v - I_v^0) I_v. \quad (22)$$

показывает, что при действии возмущения  $\Delta m_s = 5 \sin(3t)$ , погрешностями до 100 % по значениям сопротивления якоря  $r$ , и индуктивности  $L$  ошибка системы управления по частоте вращения вала двигателя составляет около 0,01 %. На рис. 5 представлено изменение коэффициента адаптации  $b_1$  в соответствии с выражением (22).

Таким образом, использование алгоритмов настройки коэффициентов интегральных составляющих  $b_1, b_2$  управления (17), (18) позволяет автоматически подстроить указанные коэффициенты непосредственно в ходе функционирования системы управления.

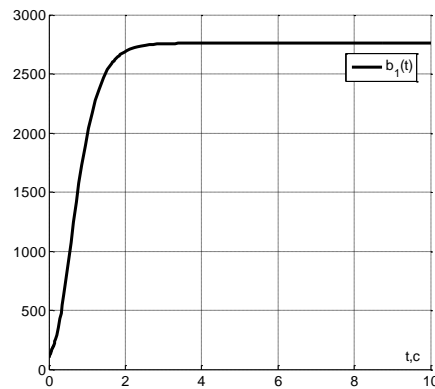


Рис. 5. Коэффициент адаптации  $b_1$

## 2. Синтез адаптивного управления без линеаризации обратной связью.

Как отмечалось в законах управления (17), (18) имеется особенность, связанная с заданием эталонных уравнений (5), (6) и (13), (14) в линейной форме. Чтобы устранить данную особенность воспользуемся формализмом функций Ляпунова.

Рассмотрим квадратичную функцию вида

$$V_{\mathcal{E}T1} = 0.5 \Psi_{\mathcal{E}T1}^2 = 0.5 (\omega_m - \omega^0)^2. \quad (23)$$

Производная по времени от (23) в силу уравнений (1) при нулевом моменте сопротивления равна

$$\dot{V}_{\mathcal{E}T1} = (\omega_m - \omega^0) \frac{c_m}{J} I_{vm} I_m. \quad (24)$$

Чтобы обеспечить отрицательную определенность функции (24) зададим желаемое изменение тока якоря  $I_m$  в виде:

$$I_m = -q_1 I_{vm} (\omega_m - \omega^0), \quad (25)$$

где  $q_1$  – положительно определенная матрица.

Правая часть в выражении (25) является желаемым изменением тока якоря номинальной модели (1) в течение переходного процесса. На основании (25) формируется ошибка системы управления номинальной моделью в виде

$$\Psi'_{\varepsilon T1} = I_m + q_1 I_{vm} (\omega_m - \omega^0), \Psi_{\varepsilon T2} = I_{vm} - I_v^0. \quad (26)$$

Потребуем, чтобы ошибки (26) удовлетворяли следующим дифференциальным уравнениям:

$$\dot{\Psi}'_{\varepsilon T1} + a_{01} \Psi'_{\varepsilon T1} = 0, \dot{\Psi}_{\varepsilon T2} + a_{02} \Psi_{\varepsilon T2} = 0, \quad (27)$$

где  $T_1$  – положительно определенная матрица настроек регулятора.

Производная по времени от выражения (26) с учетом номинальной модели (1) равна

$$\dot{\Psi}'_{\varepsilon T1} = \frac{u_{1m} - c_m I_{vm} \omega_m - r I_m}{L} + q_1 \frac{u_{2m} - r_v I_{vm}}{L_v} (\omega_m - \omega^0) + q_1 I_{vm} \frac{c_m I_{vm} I_m - m_s}{J}. \quad (28)$$

Подставив выражения (26), (28) и (3) в уравнение (27), находим, что  $u_{2m}$  определяется (8), а  $u_{1m}$  – следующим выражением

$$u_{1m} = c_m I_{vm} \omega_m + r I_m + \left[ q_1 a_{02} (I_{vm} - I_v^0) (\omega_m - \omega^0) - q_1 I_{vm} \frac{c_m I_{vm} I_m - m_s}{J} - a_{01} (I_m + q_1 I_{vm} (\omega_m - \omega^0)) \right], \quad (29)$$

Сравнивая (29) с (7) видим, что в управлении (29) отсутствует деление на ток возбуждения и производная от момента сопротивления.

Далее по аналогии с (26) и сформируем следующие выражения

$$\Psi'_1 = I + q_1 I_v (\omega - \omega^0), \Psi_2 = I_v - I_v^0. \quad (30)$$

Тогда уравнения (11) принимают вид

$$\dot{z}_1 = \Psi'_1 - \Psi'_{\varepsilon T1}, \dot{z}_2 = \Psi_2 - \Psi_{\varepsilon T2}. \quad (31)$$

Соответственно выражения (12) преобразуются к виду

$$e'_1 = \Psi'_1 - \Psi'_{\varepsilon T1} + b_1 z_1 = I - I_m + q_1 (I_v (\omega - \omega^0) - I_{vm} (\omega_m - \omega^0)) + b_1 z_1, \quad (32)$$

$$e_2 = \Psi_2 - \Psi_{\varepsilon T2} + b_2 z_2 = I_v - I_{vm} + b_2 z_2.$$

Потребуем, чтобы ошибки (32) удовлетворяли уравнениям

$$\dot{e}'_1 + a_{01} e'_1 = 0, \dot{e}_2 + a_{02} e_2 = 0. \quad (33)$$

Вычислив производные по времени от (32), подставив их в уравнения (33) и решив полученную систему относительно напряжений  $u_1$  и  $u_2$ , получим, что управление  $u_2$  определяется выражением (17), а  $u_1$  – следующим выражением

$$u_1 = c_m I_v \omega + r I + L \left\{ -a_{01} (I + q_1 I_v (\omega - \omega^0)) + q_1 a_{02} (I_v - I_v^0) + q_1 b_2 (I_v - I_{vm} - a_{02} b_2 z_2) - q_1 I_v \frac{c_m I_v I - m_s}{J} - b_1 (I - I_m + q_1 (I_v (\omega - \omega^0) - I_{vm} (\omega_m - \omega^0))) \right\} \quad (34)$$

На рис. 6 представлено изменение частоты вращения вала двигателя в замкнутой системе управления (1), (8), (9), (17), (22), (29), (31), (34).

Отметим, в данном случае ошибка системы составляет порядка 0,5 %, что существенно выше, чем в системе, линеаризованной обратной связью, рассмотренной в разделе 1.



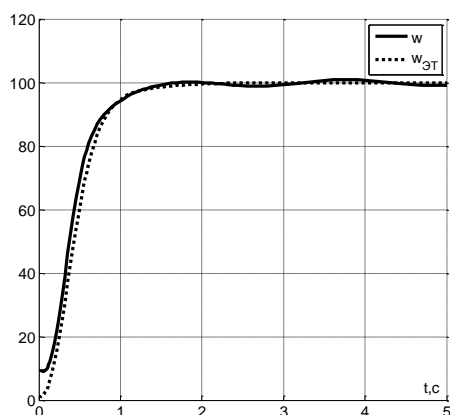


Рис. 6. Частота вращения в системе без линеаризации обратной связи

**Заключение.** Решается задача адаптивного управления приводом постоянного тока. Система управления базируется на адаптивном бесперебойном управлении с явной эталонной моделью. Предлагается два варианта базового регулятора, синтезированного методом позиционно-траекторного управления. В первом варианте осуществляется линеаризация системы обратной связи с обеспечением астатизма первого порядка. Параметрическая адаптация реализована на известных алгоритмах. Во втором варианте, чтобы устранить в законе управления деление на ток возбуждения, использован метод функций Ляпунова и метод позиционно-траекторного управления. Адаптация также осуществлена к внешним воздействиям с помощью дополнительных интеграторов, а к параметрам – с помощью известных алгоритмов, разработанных в [17–19]. Основными достоинствами структуры, представленной на рис. 1, является возможность независимой настройки эталонной модели и алгоритмов адаптации. Для систем, линеаризуемых обратной связью, имеется возможность использовать классические алгоритмы адаптации.

Отметим, что в данной работе эталонная модель выделена в явной форме для наглядности. Данная модель может также быть задана в неявной форме. Кроме того, для обеспечения адаптации к внешним возмущениям, она может включать дополнительные интеграторы, обеспечивающие астатизм заданного порядка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшихонов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Беляев В.Е., Полуянович Н.К., Волощенко Ю.П. Энергосберегающее управление тяговыми приводами электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 192-200.
2. Пшихонов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Шевченко В.Е. Энергосберегающее управление электропоездом в условиях неоднородности профиля пути // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3(140). – С. 162-168.
3. Зарифьян А.А., Колтахчян П.Г., Пшихонов В.Х., Медведев М.Ю. Проблемы разработки энергосберегающих систем регулирования тягового электропривода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3(140). – С. 176-183.
4. Гайдук А.Р., Пшихонов В.Х., Медведев М.Ю., Плаксиенко Е.А., Шаповалов Е.О. Управляемая форма Жордана и синтез нелинейных систем управления // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления. ВСПУ 2014. Москва, 16–19 июня 2014. – С. 521-531. ISBN 978-5-91450-151-5.
5. Гайдук А.Р. Синтез нелинейных систем на основе управляемой формы Жордана // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 7. – С. 3-13.
6. Пшихонов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с. ISBN 978-5-02-037509-3.

7. *Еругин Н.П.* Построение всего множества систем дифференциальных уравнений, имеющих заданную интегральную кривую // Прикладная математика и механика. – 1952. – Вып. 6. – С. 659-670.
8. *Бойчук Л.М.* Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.
9. *Галиуллин А.С.* Методы решения обратных задач динамики. – М.: Наука, 1986. – 224 с.
10. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 6. – С. 14-21.
11. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А.* Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2013. – № 7. – С. 13-20.
12. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V.* Position-trajectory control system for robot on base of airship // Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. – 2013. – P. 3590-3595.
13. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmalev V.A., Gurenko.* Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. Preprints of the B.V. 19th World Congress the International Federation of Automatic Control. Cape Town, South Africa. – August 24-29, 2014. – P. 8953-8958.
14. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Y., and Gurenko B.V.* Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle // Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014). – P. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.
15. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V.* Control system design for autonomous underwater vehicle// Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013, Article number 6693274, – P. 77-82.
16. *Pshikhopov V.Kh., Ali A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments // 2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 – Proceedings, Article number 5971345. – P. 540-545.
17. *Li G., Na, J., Stoten D.P., Ren X.* Adaptive feedforward control for dynamically substructured systems based on neural network compensation // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2011. – Vol. 18, Issue PART 1. – P. 944-949.
18. *Рутковский В.Ю., Крутова И.Н.* Принцип построения и некоторые вопросы теории одного класса самонастраивающихся систем с моделью // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10–14 декабря 1963). – М., 1965. – С. 46-63.
19. *Рутковский В.Ю., Скорин-Чайков В.Н.* Самонастраивающиеся системы с пробным сигналом // Самонастраивающиеся автоматические системы: Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике самонастраивающихся систем (10–14 декабря 1963). – М., 1965. – С. 93-111.
20. *Zemlyakov S.D.* Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system // Proc. of International Symposium, England, Teddington, 1965. New-York: P.H. Hummon Plenum Press, 1966. – P. 175-179.
21. *Рутковский В.Ю.* Работы института проблем управления в области беспилотных адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С. 42-49.
22. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* О некоторых результатах развития теории и практики применения беспилотных адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 7. – С. 103-121.
23. *Рутковский В.Ю., Глузов В.М., Суханов В.М.* Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 8. – С. 96-108.
24. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – P. 35-44.

25. Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М. Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 5. – С. 131-146.
26. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2006. – № 6. – С. 17-22.
27. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб., 2003. – 752 с.
28. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов по спец. «Автоматика и упр. в техн. системах». – М.: Высш. шк., 1989. – 263 с.

## REFERENCES

1. Pshikhopov V.Kh., Gayduk A.R., Medvedev M.Yu., Belyaev V.E., Poluyanovich N.K., Voloshchenko Yu.P. Energoberegayushchee upravlenie tyagovymi privodami elektropodvizhnogo sostava [Power saving control for electrical train], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 192-200.
2. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Shevchenko V.E. Energoberegayushchee upravlenie elektropoezdom v usloviyakh neodnorodnosti profilya puti [Power saving control of an electric train in the conditions of heterogeneity of a track profile], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3(140), pp. 162-168.
3. Zarif'yan A.A., Kolpakch'yan P.G., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Problemy razrabotki energoberegayushchikh sistem regulirovaniya tyagovogo elektroprivoda [Problems of development of energy-efficient electric traction control systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 176-183.
4. Gayduk A.R., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Plaksienko E.A., Shapovalov E.O. Upravlyaemaya forma Zhordana i sintez nelineynykh sistem upravleniya [Controllable Jordan form and synthesis of nonlinear control systems], *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya. VSPU 2014. Moskva, 16–19 iyunya 2014* [Proceedings of the XII all-Russian conference on the problems of management. The EVERYTHING 2014. Moscow, 16-19 June 2014], pp. 521-531. ISBN 978-5-91450-151-5.
5. Gayduk A.R. Sintez nelineynykh sistem na osnove upravlyaemoy formy Zhordana [Synthesis of nonlinear systems on the basis of the controllable Jordan form], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2006, No. 7, pp. 3-13.
6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p. ISBN 978-5-02-037509-3.
7. Erugin N.P. Postroyeniye vsego mnozhestva sistem differentsial'nykh uravneniy, imeyushchikh zadannuyu integral'nuyu krivuyu [The construction of the entire set of systems of differential equations with a given integral curve], *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Journal of Applied Mathematics and Mechanics], 1952, Issue 6, pp. 659-670.
8. Boychuk L.M. Metod strukturnogo sinteza nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya [The method of structural synthesis of nonlinear systems of automatic control]. Moscow: Energiya, 1971, 112 p.
9. Galiullin A.S. Metody resheniya obratnykh zadach dinamiki [Methods for solving inverse problems of dynamics]. Moscow: Nauka, 1986, 224 p.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektorного upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [System position-trajectory control of robotic aeronautic platform: mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2013, No. 6, pp. 14-21.
11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektorного upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: algoritmy upravleniya [System position-trajectory control of robotic aeronautic platform: the control algorithms], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2013, No. 7, pp. 13-20.
12. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M., Gaiduk A., Belyaev V., Fedorenko R., Krukhmalev V. Position-trajectory control system for robot on base of airship, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2013, pp. 3590-3595.

13. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmalev V.A., Gurenko. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship. Preprints of the B.V., *19th World Congress the International Federation of Automatic Control*. Cape Town, South Africa. – August 24-29, 2014, pp. 8953-8958.
14. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., and Gurenko B.V. Homing and Docking Autopilot Design for Autonomous Underwater Vehicle, *Applied Mechanics and Materials Vols. 490-491 (2014)*, pp. 700-707. Trans Tech Publications, Switzerland. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.490-491.700.
15. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V. Control system design for autonomous underwater vehicle, *Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013, Article number 6693274*, pp. 77-82.
16. Pshikhopov V.Kh., Ali A.S. Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments, *2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 – Proceedings, Article number 5971345*, pp. 540-545.
17. Li G., Na, J., Stoten D.P., Ren X. Adaptive feedforward control for dynamically substructured systems based on neural network compensation, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2011, Vol. 18, Issue PART 1, pp. 944-949.
18. Rutkovskiy V.Yu., Krutova I.N. Printsip postroeniya i nekotorye voprosy teorii od-nogo klassa samonastrayayushchikhsya sistem s model'yu [The principle of construction and some problems of the theory of one class of self-adjusting systems with model], *Samonastrayayushchiesya avtomaticheskie sistemy: Trudy I Vsesoyuznoy konferentsii po teorii i praktike samonastrayayushchikhsya sistem (10–14 dekabrya 1963)* [Self-adjusting automatic systems: proceedings of the I all-Union conference on the theory and practice of self-tuning systems (10-14 December 1963)]. Moscow, 1965, pp. 46-63.
19. Rutkovskiy V.Yu., Ssorin-Chaykov V.N. Samonastrayayushchiesya sistemy s probnym signalom [A self-tuning system with the test signal], *Samonastrayayushchiesya avtomaticheskie sistemy: Trudy I Vsesoyuznoy konferentsii po teorii i praktike samonastrayayushchikhsya sistem (10–14 dekabrya 1963)* [Self-adjusting automatic systems: proceedings of the I all-Union conference on the theory and practice of self-tuning systems (10-14 December 1963)]. Moscow, 1965, pp. 93-111.
20. Zemlyakov S.D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system, *Proc. of International Symposium, England, Teddington, 1965*. New-York: P.H. Hummon Plenum Press, 1966, pp. 175-179.
21. Rutkovskiy V.Yu. Raboty instituta problem upravleniya v oblasti bespoiskovykh adaptivnykh sistem i sistem upravleniya kosmicheskimi apparatami [The Institute of problems of management in the field of instant adaptive systems and control systems of spacecraft], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1999, No. 6, pp. 42-49.
22. Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu. O nekotorykh rezul'tatakh razvitiya teorii i praktiki primeneniya bespoiskovykh adaptivnykh sistem [About some results of the theory and practice of application of the instant adaptive systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2001, No. 7, pp. 103-121.
23. Rutkovskiy V.Yu., Glumov V.M., Sukhanov V.M. Fizicheski realizuemyy algoritm adaptivnogo upravleniya s etalonnoy model'yu [Physically implemented algorithm for the adaptive control with reference model], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2011, No. 8, pp. 96-108.
24. Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu. Algoritm funktsionirovaniya adaptivnoy sistemy s etalonnoy model'yu, garantiruyushchiy zadannuyu dinamicheskuyu tochnost' upravleniya nestatsionarnym dinamicheskim ob'ektom v usloviyakh neopredelennosti [The algorithm of functioning of the adaptive system with a reference model that guarantees a given dynamic precision management for nonstationary dynamic object in conditions of uncertainty], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2009, No. 10. pp. 35-44.
25. Glumov V.M., Zemlyakov S.D., Rutkovskiy V.Yu., Sukhanov V.M. Primenenie printsipa postroeniya adaptivnykh sistem s etalonnoy model'yu k zadacham monitoringa tekushchego sostoyaniya transmissionnykh valov [The application of the principle of building adaptive systems with a reference model to the tasks of monitoring the current status of transmission shafts], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2003, No. 5, pp. 131-146.

26. *Medvedev M.Yu.* Algoritmy adaptivnogo upravleniya ispolnitel'nymi privodami [Adaptive control algorithms for Executive drives], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2006, No. 6, pp. 17-22.
27. *Bessekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg, 2003, 752 p.
28. *Aleksandrov A.G.* Optimal'nye i adaptivnye sistemy: Ucheb. posobie dlya vuzov po spets. «Avtomatika i upr. v tekhn. sistemakh» [Optimal and adaptive systems: textbook for high schools on a speciality "Automatics and management in technical systems"]. Moscow: Vyssh. shk, 1989, 263 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Павленко.

**Пшихопов Вячеслав Хасанович** – Южный федеральный университет; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел./факс: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

**Шевченко Виктор Александрович** – e-mail: droogg@mail.ru; тел.: +79054550532; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

**Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich** – Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone/fax: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

**Medvedev Mikhail Yur'evich** – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

**Shevchenko Viktor Alexandrovich** – e-mail: droogg@mail.ru; phone: +79054550532; the department of electrical engineering and mechatronics; postgraduate student.

УДК 621.82

Л.К. Самойлов

### СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

*Предлагается структурный подход к выбору значения частоты дискретизации сигналов датчиков и исполнительных устройств системы управления, когда сигнал каждого  $i$ -го датчика (из  $n$  возможных) принимает участие в выработке управляющего сигнала для  $j$ -го исполнительного устройств (из  $s$  возможных) с учетом коэффициента влияния; в основе структурного подхода лежит использование двух частот дискретизации по каждому из  $S \cdot n$  каналов системы ( $f_{\Delta}^{jin}$  – частота дискретизации с точки зрения погрешности наложения спектров ( $\gamma_{H}^{ij}$ ) и  $f_{\Delta}^{jgs}$  – частота дискретизации с точки зрения методической погрешности восстановления ( $\gamma_{вос}^{ijM}$ )); каждая из  $2 \cdot n \cdot s$  частот дискретизации определяется на основе решения прямой задачи распределения погрешностей для каждого из  $S \cdot n$  каналов относительно погрешностей  $\gamma_{H}^{ij}$  и  $\gamma_{вос}^{ijM}$ ; итоговая частота дискретизации по каждому из  $S \cdot n$  каналов определяется как максимальная из пары ( $f_{\Delta}^{jgs}$ ;  $f_{\Delta}^{jgs}$ ), а также может быть оптимизирована ( $f_{\Delta}^{jgs} = f_{\Delta}^{jgs}$ ) в результате итерационного процесса перераспределения погрешностей  $\gamma_{H}^{ij}$*